



El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala

EDITORES

Mario Melgar

Adlai Meneses

Héctor Orozco

Ovidio Pérez

Rodolfo Espinosa

Artemis Edinter

El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, CENGICANA, fue creado por la Asociación de Azucareros de Guatemala, ASAZGUA, en 1992 para apoyar el avance tecnológico de la Agroindustria Azucarera, con el objetivo de mejorar la producción y la productividad del cultivo de la caña de azúcar y sus derivados, es financiado por los ingenios que conforman la Agroindustria Azucarera de Guatemala, que hacen sus aportes al presupuesto del Centro, proporcionales a la producción de azúcar obtenida.

De acuerdo al Plan Estratégico 2005-2015 nuestra visión es **“Ser líderes en generar tecnología para incrementar la competitividad de la Agroindustria Azucarera en la región”** y nuestra misión es **“Ser la organización de la Agroindustria Azucarera responsable de generar, adaptar y transferir tecnología de calidad para su desarrollo rentable y sostenible”**.

La Junta Directiva del Centro, esta conformada con representantes de los ingenios. El Plan Estratégico y los Planes Operativos son elaborados con Junta Directiva, Comité Técnico Asesor y Comité Técnico Industrial. Las líneas de investigación son determinadas con personal gerencial y técnico de los ingenios con quienes se desarrolla coordinadamente investigación aplicada y específica. La coordinación de las actividades está a cargo de la Dirección General. El Sistema de Gestión de Calidad de CENGICANA está certificado de acuerdo a las normas ISO 9001:2008.

Las actividades de investigación se realizan a través de los siguientes cuatro programas de investigación: Variedades, Manejo Integrado de Plagas, Agronomía e Investigación Industrial, así mismo se cuenta también con el programa de Transferencia de Tecnología y Capacitación, Servicios Analíticos de Laboratorio y la Administración.

El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala

EDITORES

Mario Melgar

Adlai Meneses

Héctor Orozco

Ovidio Pérez

Rodolfo Espinosa

CENGICAÑA

Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar

El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala

EDITORES

Mario Melgar
Adlai Meneses
Héctor Orozco
Ovidio Pérez
Rodolfo Espinosa

Diseño de portada y diagramación: Priscila López de Alvarado
(Fotografía de portada cortesía de Dr. Mario Melgar)

© Librerías **Artemis Edinter, S.A.**

ISBN: 978-9929-40-469-4

Impreso en Guatemala por:
Litografías Modernas S.A.
5ta. Calle 18-27, zona 8 de Mixco, San Cristóbal II
Tel. (502) 2478-2770

CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar).
2012. El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. Melgar, M.; Meneses, A.;
Orozco, H.; Pérez, O.; y Espinosa, R. (eds.). Guatemala. 512 p.



2014

Librerías Artemis Edinter, S.A.

12 calle 10-55, zona 1. PBX: (502) 2419 9191 Fax: (502) 2238 0866
www.artemisedinter.com
Guatemala, C.A.

CENGICAÑA

Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar

Km. 92.5 Carretera a Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala

Teléfono: (502) 7828 1000

Fax: (502) 7828 1000

Email: direccion@cengican.org

Email: centro@cengicana.org

Web: www.cengicana.org

Contenido

	Página
Acrónimos y Abreviaturas	vi
Prefacio	viii
I. Desarrollo Tecnológico de la Agroindustria Azucarera y Perspectivas <i>Mario Melgar</i>	1
II. Caracterización de la Zona Cañera <i>Braulio Villatoro, Ovidio Pérez</i>	33
III. Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar <i>Héctor Orozco, José Luis Quemé, Werner Ovalle y Fredy Rosales Longo</i>	45
IV. Biotecnología Aplicada al Cultivo de la Caña de Azúcar <i>Luis Molina y Mario Melgar</i>	79
V. Labores de Establecimiento del Cultivo	107
Preparación de Suelos para la Siembra de Caña de Azúcar <i>Joel García, Braulio Villatoro, Fernando Díaz y Gil Sandoval</i>	108
Semilleros y Siembra Comercial <i>Werner Ovalle, José Luis Quemé, Héctor Orozco y Ovidio Pérez</i>	120
VI. Manejo y Control de Malezas <i>Gerardo Espinoza</i>	131
VII. Nutrición y Fertilización <i>Ovidio Pérez</i>	149
VIII. El Riego en el Cultivo de Caña de Azúcar <i>Otto Castro</i>	177

	Página
IX. El Manejo Integrado de Plagas <i>José Manuel Márquez</i>	203
X. Enfermedades de la Caña de Azúcar <i>Werner Ovalle</i>	233
XI. Maduración de la Caña de Azúcar y Floración de la Caña de Azúcar y su Manejo	259
Maduración de la Caña de Azúcar <i>Gerardo Espinoza</i>	260
Floración de la Caña de Azúcar y su Manejo <i>Gerardo Espinoza y José Luis Quemé</i>	282
XII. La Cosecha de Caña de Azúcar <i>Adlai Meneses</i>	295
XIII. El Proceso de Fabricación de Azúcar <i>José Luis Alfaro, Enrique Velásquez, Luis Monterroso y Rodolfo Espinosa</i>	307
XIV. Diversificación de la Agroindustria Azucarera	361
Cogeneración en la Industria Azucarera <i>Mario Muñoz</i>	362
Producción de Etanol <i>Rodolfo Espinosa y Claudia Ovando</i>	382
Perspectivas de los Coproductos de la Caña de Azúcar <i>Mario Muñoz</i>	420
XV. La Meteorología en Caña de Azúcar <i>Otto Castro y Alfredo Suárez</i>	447
XVI. Cambio Climático y el Cultivo de la Caña de Azúcar <i>Alex Guerra y Alejandra Hernández</i>	479

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

De instituciones

AGG	Asociación de Gerentes de Guatemala
ASAZGUA	Asociación de Azucareros de Guatemala
ATAGUA	Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala
CAÑAMIP	Comité de Manejo Integrado de Plagas de la Caña de Azúcar
CENGICAÑA	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar
CIASA	Consultores de Ingenios Azucareros, S.A.
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
COPERSUCAR	Cooperativa de Productores de Cana-de-Açúcar e Álcool
CONCYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A.
ENCA	Escuela Nacional Central de Agricultura
ICC	Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático
ICSB	International Consortium of Sugarcane Biotechnology
ICTA	Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola
ICUMSA	International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
INTECAP	Instituto Técnico de Capacitación y Productividad
IPNI	International Plant Nutrition Institute
ISSCT	International Society of Sugar Cane Technologists
MAGA	Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación.
TECNICAÑA	Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar
URL	Universidad Rafael Landívar
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala
USDA	United States Department of Agriculture
UVG	Universidad del Valle de Guatemala

De expresiones técnicas y unidades

Atm	atmósfera
dds	días después de siembra
ha	hectárea
km	kilómetro
Mz	manzana
min	minuto
qq	quintal
TAH	toneladas métricas de azúcar por hectárea
TCH	toneladas métricas de caña por hectárea
Tchd	toneladas de caña/hombre día
t	tonelada métrica
t caña/ha	Tonelada métrica de caña por hectárea
t azúcar/ha	Tonelada métrica de azúcar por hectárea

De variedades de caña de azúcar

B	Barbados
C	Cuba
CC	CENICAÑA Colombia
CG	CENGICAÑA Guatemala
Co	Coimbatore
CP	Canal Point
CTC	Centro de Tecnología Canavieira
ECU	Ecuador
Ja	Jaronu
L	Louisiana
M	Mauricio
MEX	México
MPT	MitrPhol, Thailand
My	Mayari
NA	Norte de Argentina
PGM	Pantaleón Guatemala México
PPQK	Cuba
PR	Puerto Rico
Q	Queensland
RB	República de Brasil
SP	São Paulo

PREFACIO

Sin libros, la Historia queda silenciosa, la Literatura muda, la Ciencia tullida y el Pensamiento inmóvil.

BARBARA W. TUCHMAN

La caña de azúcar comenzó a cultivarse en Guatemala en 1536, los primeros trapiches de Guatemala se fundaron en el valle central de Guatemala y en el valle de Salamá durante el siglo XVI.

En el siglo XVII creció el número de trapiches, los más importantes estaban en manos de las órdenes religiosas. Fue hasta mediados del siglo XIX que Guatemala comenzó a exportar azúcar en cantidades menores.

En 1957 se fundó la Asociación de Azucareros de Guatemala, ASAZGUA y en 1960 Guatemala recibió su primera cuota de Estados Unidos, en ese tiempo la producción total de azúcar de Guatemala fue de 68,000 toneladas métricas. Para la historia moderna de la caña de azúcar se toma como punto de partida el año de 1960, en el mundo la era industrial estaba muy desarrollada y se avizoraban cambios en la dinámica mundial, fue entonces que los ingenios azucareros definieron su estrategia de modernización y crecimiento. La industria se transformó de una industrial local a una industria de exportación, convirtiéndose en una de las actividades agroindustriales más importantes del país.

Al expandirse las exportaciones de azúcar de Guatemala, la Asociación de Azucareros de Guatemala comenzó a desarrollar una serie de proyectos y estrategias, que fueron los impulsores de la Agroindustria Azucarera nacional. Para incrementar la producción, los ingenios introdujeron mejoras en el cultivo, la cosecha, la fábrica, la distribución y comercialización del producto, así como mejores condiciones de vida para los trabajadores de la agroindustria azucarera.

En 1971 se fundó la Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala (ATAGUA) con el fin de fomentar el intercambio de experiencias y tecnología, y la difusión de conocimientos técnicos para impulsar el desarrollo de la Agroindustria Azucarera. Esto propició la transferencia de tecnología en congresos y simposios con otras Asociaciones de Técnicos Azucareros de Centroamérica y Latinoamérica.

En la década de 1970 varios ingenios comenzaron a contratar profesionales, guatemaltecos, a técnicos azucareros y consultores extranjeros, para mejorar la eficiencia en la operación industrial, y para diseñar proyectos de ampliación y modernización de algunos ingenios.

ASAZGUA creó el Departamento de Experimentación Agrícola en 1974, y el ingenio Pantaleón en 1978 principió a desarrollar trabajos de investigación. Posteriormente lo hicieron los ingenios Santa Ana, Concepción y La Unión.

La Asociación de Azucareros de Guatemala creó FUNDAZUCAR en 1990, CENGICAÑA en 1992, EXPOGRANEL en 1994 y el Departamento de Manejo Ambiental.

A partir de 1990 la Agroindustria Azucarera comienza a posicionarse a nivel mundial, se ubica entre los diez países más importantes en volúmenes de exportación, según la International Sugar Organization (ISO) y en productividad según la LMC International, donde Guatemala ocupa el tercer lugar a nivel mundial.

En 2001 en Brisbane, Australia, Guatemala obtuvo la sede del más importante evento tecnológico de caña de azúcar a nivel mundial. El XXV congreso de la Sociedad Internacional de Tecnólogos de Caña de Azúcar (ISSCT), que se realizó exitosamente en enero del 2005 en Guatemala”.

La Agroindustria Azucarera Guatemalteca ha venido creciendo permanentemente desde 1960 hasta llegar a ubicar a Guatemala como el quinto país exportador de azúcar a nivel mundial, el segundo en Latinoamérica y el tercer lugar en productividad (toneladas métricas de azúcar/ha) a nivel mundial. El azúcar es el segundo producto agrícola en Guatemala en generación de divisas, constituyéndose en una importante contribución a la economía nacional.

El aumento en la productividad ha sido más notable en los últimos 20 años. En la década 1980-1990 se produjeron en promedio 6.77 toneladas de azúcar por hectárea (TAH), mientras que en la década 2000-2010 el promedio fue 10.11 TAH.

Los principales factores que han incidido en el desarrollo de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca son: ECOLÓGICO: las condiciones agroecológicas han sido favorables. ORGANIZACIONAL GERENCIAL: industria privada, organización gremial, terminal de exportación, diversificación (cogeneración y etanol). TECNOLÓGICO: operaciones en el campo, operaciones en fábrica, investigación, capacitación, transferencia de tecnología, benchmarking. SOCIAL: responsabilidad social empresarial.

El componente tecnológico, ha tenido un rol importante en el desarrollo de esta Agroindustria.

CENGICAÑA ha conformado un sistema de investigación y desarrollo tecnológico para la caña de azúcar. Con ello ha establecido políticas, marco normativo, planes, organización, un sistema de gestión de calidad y un sistema de gestión tecnológica.

También ha desarrollado investigación aplicada al cultivo de la caña de azúcar en diversos factores del sistema agronómico para incrementar la productividad. Las áreas en las que se ha investigado son: Fitomejoramiento, Fitopatología, Biotecnología, Manejo Integrado de Plagas, Fertilización y Nutrición Vegetal, Riegos, Agrometeorología, Sistema de Información Geográfico y Recuperación de Sacarosa. La investigación se ha realizado conjuntamente con los ingenios azucareros asociados.

Los resultados de todas las investigaciones se han presentado en más de 900 publicaciones, la mayoría de las cuales se encuentran disponibles en el Website de CENGICAÑA www.cengicana.org. En todas las áreas se han generado o adaptado conocimientos, metodologías y tecnologías.

En este libro se presenta en 13 capítulos, la experiencia en investigación y transferencia de tecnología de las áreas de cultivo de caña de azúcar en donde ha desarrollado trabajos CENGICAÑA con los ingenios.

En el Capítulo XIII se presenta El Proceso de Fabricación del Azúcar, en el Capítulo XIV Diversificación de la Agroindustria Azucarera y en el XVI un capítulo sobre Cambio Climático y el Cultivo de la Caña de Azúcar, escrito por profesionales del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático ICC, que es la organización gremial más reciente, creada por la Asociación de Azucareros de Guatemala, en 2010.

Presentamos nuestro agradecimiento a los ingenios asociados, editores, autores, coautores y colaboradores de esta publicación. Nuestro deseo es que este libro sea de utilidad para profesionales, técnicos, cañicultores, estudiantes y personal de la Agroindustria Azucarera.

Junta Directiva de CENGICAÑA 2011-2012

Presidente:	Ing. Mauricio Cabarrús	Ingenio Pantaleón - Concepción
Vicepresidente:	Ing. Max Zepeda	Ingenio Madre Tierra
Secretario:	Ing. Jorge Leal	Ingenio Magdalena
Tesorero:	Ing. Herman Jensen	Ingenio Santa Ana
Vocal Primero:	Ing. Jaime Botrán	Ingenio Tulula
Vocal Segundo:	Dr. Freddie Pérez	Ingenio San Diego - Trinidad
Vocal Tercero:	Ing. Jorge Sandoval	Ingenio La Unión
Vocal Cuarto:	Ing. Arturo Gándara	Unión de Cañeros
Vocal Adjunto:	Ing. Héctor Ranero	ASAZGUA
Asesor Financiero:	Lic. William Calvillo	ASAZGUA
Director General:	Dr. Mario Melgar	CENGICAÑA

I. DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA Y PERSPECTIVAS

DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA Y PERSPECTIVAS

Mario Melgar*

INTRODUCCIÓN

Desarrollo tecnológico es el proceso de organización sistemática del conocimiento científico y tecnológico para la producción de bienes y servicios.

La tecnología es esencialmente conocimiento, pero conocimiento organizado específicamente para la producción. El desarrollo tecnológico causa transformaciones en los procesos productivos.

Según Enríquez, 2001 “Que un país sector, organización, empresa o individuo lleguen a triunfar depende de su habilidad para entender y aplicar cambios en tecnología”.

Alvin Tofler en su libro *La tercera ola, 1982* sintetiza la historia tecnológica de la humanidad a través del impacto de tres olas, que han desencadenado tres revoluciones. La primera: la revolución agrícola; la segunda: la revolución industrial, y la tercera: la revolución de la informática. Cada una creando una nueva civilización con sus propios empleos, estilos de vida, estructuras económicas y esquemas políticos.

Richard Oliver, en *The Coming Biotech Age, 1999* plantea que el mundo esta entrando a una nueva era u ola, “La Revolución Bionanotecnológica”, la cual orientará la economía global en las primeras décadas del siglo XXI. En la Figura 1 se observa la evolución de estas eras a través del tiempo y su impacto en términos de globalización y valor agregado (producto interno bruto (PIB), per capita y esperanza de vida). La duración de cada ola ha sido más corta, debido a la acumulación previa de conocimiento.

* Ing. Agr., Ph.D., Director General de CENGICANA. www.cengicana.org

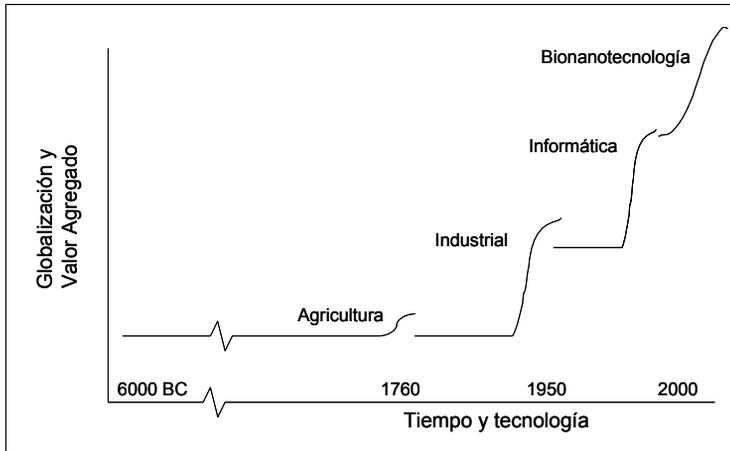


Figura 1. La tecnología crea olas económicas

Fuente: Melgar, M. 2003. No debemos perder la siguiente ola: La revolución biotecnológica ATAGUA (Gua) 3(4): 14:18.

HISTORIA TECNOLÓGICA DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN GUATEMALA

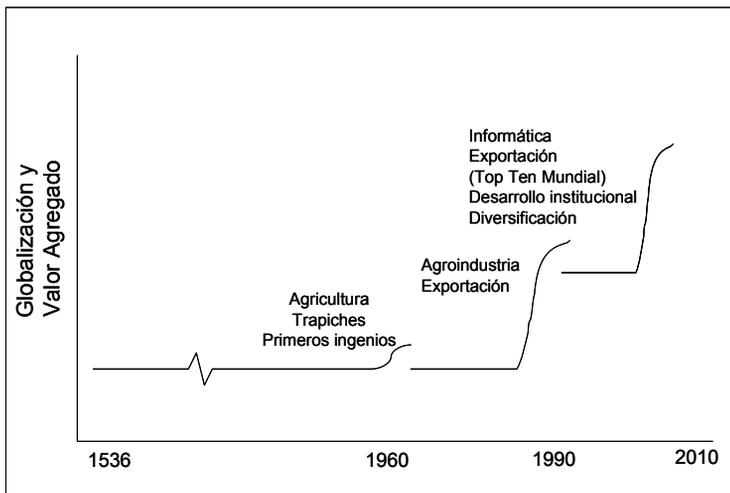


Figura 2. Olas en la Agroindustria Azucarera de Guatemala

De manera similar a las olas tecnológicas de Tofler, podemos proponer que el desarrollo tecnológico de la Agroindustria Azucarera de Guatemala ha ocurrido en tres olas, que se describen sintéticamente a continuación.

Wagner, 2007, en el libro *Historia de la caña de azúcar en Guatemala*, menciona que la caña de azúcar comenzó a cultivarse en Guatemala en 1536 en Amatitlán.

Los primeros trapiches de Guatemala se fundaron en el valle central de Guatemala y en el valle de Salamá durante el siglo XVI.

En el siglo XVII creció el número de trapiches, estando los más importantes en manos de las órdenes religiosas.

Wagner menciona que en esa época “el consumo y la producción de panela y aguardiente se volvieron tan comunes entre la población, que se encontraban trapiches en todas las regiones de clima cálido de todo el país”.

Fue hasta mediados del siglo XIX que Guatemala comenzó a exportar azúcar en cantidades menores.

En 1957 se fundó la Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA), con el fin de resolver los problemas en la producción azucarera y desarrollar programas para fomentar, mejorar y tecnificar la industria azucarera del país.

Según McSweeney, en 1960 Guatemala recibió su primera cuota de Estados Unidos, en ese tiempo la producción total de azúcar de Guatemala fue de 68,000 toneladas métricas.

En el Prólogo del libro *Historia de la caña de azúcar en Guatemala*, Fraterno Vila, 2007 menciona que para la historia moderna de la caña de azúcar se toma como punto de partida el año de 1960. En el mundo la era industrial estaba muy desarrollada y se empezaba a hablar de cambios en la dinámica mundial, fue entonces que los ingenios azucareros definieron su estrategia de modernización y crecimiento. La industria se transformó de local a una industria de exportación, y se convirtió en una de las actividades agroindustriales más importantes del país.

Al expandirse las exportaciones de azúcar de Guatemala, la Asociación de Azucareros de Guatemala comenzó a desarrollar una serie de proyectos y estrategias, que fueron los impulsores de la Agroindustria Azucarera nacional. Para incrementar la producción, los ingenios introdujeron mejoras en el cultivo, la cosecha, la fábrica, la distribución y comercialización del producto, así como mejores condiciones de vida para los trabajadores de la Agroindustria Azucarera.

En 1971 se fundó la Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala (ATAGUA) con el fin de fomentar el intercambio de experiencias y tecnología, y la difusión de conocimientos técnicos para impulsar el desarrollo de la agroindustria azucarera. Esto propició la transferencia de tecnología en congresos y simposios con otras Asociaciones de Técnicos Azucareros de Centroamérica y Latinoamérica.

En la década de 1970 varios ingenios comenzaron a contratar a profesionales guatemaltecos y a técnicos azucareros y consultores principalmente de Cuba para mejorar la eficiencia en la operación industrial, y para diseñar proyectos de ampliación y modernización de algunos ingenios.

La formación de técnicos azucareros en centros universitarios se inició en 1975, permitiendo a los nuevos profesionales ocupar posiciones importantes en los ingenios. Así comenzó la transformación de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca, que continuó evolucionando progresivamente en el cultivo, la cosecha y el transporte.

ASAZGUA creó el Departamento de Experimentación Agrícola en 1974 y el ingenio Pantaleón en 1978 principió a desarrollar trabajos de investigación. Posteriormente lo hicieron los ingenios Santa Ana, Concepción y La Unión.

La Asociación de Azucareros de Guatemala, creó FUNDAZUCAR en 1990, cuya misión es “Convertirse en un modelo de promoción de desarrollo social, replicable por otros sectores del país”; CENGICANÁ en 1992, cuya misión es “Ser la organización de la Agroindustria Azucarera responsable de generar, adaptar y transferir tecnología de calidad para su desarrollo rentable y sostenible”; EXPOGRANEL en 1994 cuya misión es “Ser la terminal de embarque que posibilita la competitividad de la industria azucarera de Guatemala a nivel mundial a través del manejo efectivo y confiable del azúcar de exportación” y en 1994 también creó el Departamento de Manejo Ambiental.

A partir de 1990 la Agroindustria Azucarera comienza a posicionarse como un modelo a nivel mundial, se ubica entre los diez países más importantes en volúmenes de exportación, según la International Sugar Organization (ISO), y en productividad según la LMC International, como se muestra en la Figura 3, donde Guatemala ocupa el tercer lugar a nivel mundial.

Muestra de ello es haber sido seleccionado como sede del XXV Congreso Mundial de Técnicos Azucareros de la ISSCT que se realizó exitosamente en enero del 2005 en Guatemala.

El Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), fue fundado por ASAZGUA en 2010, cuya misión es “Crear y promover acciones y procesos que faciliten la mitigación y la adaptación al cambio climático en la región con base en lineamientos técnico-científicos”.

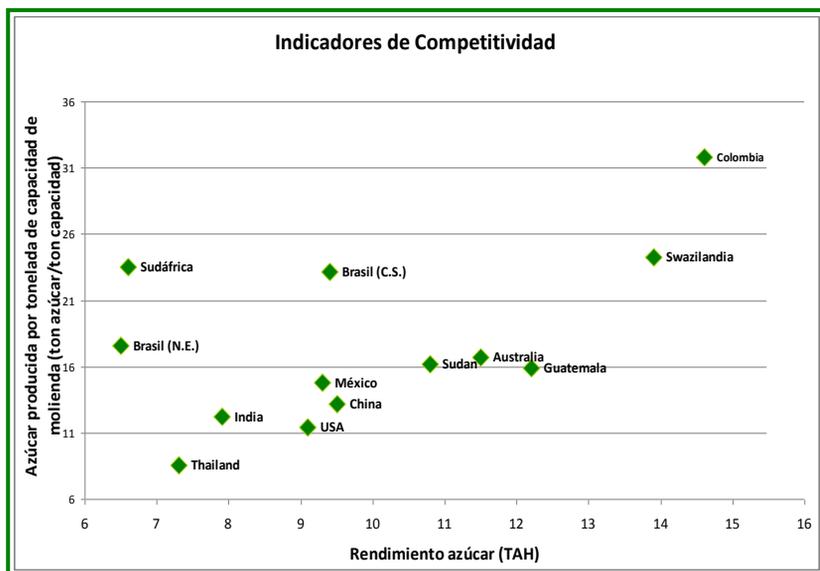


Figura 3. Indicadores de competitividad

Fuente: LMC Sugar Technical Performance - Executive Summary. September 2008.

En este capítulo se presentan, brevemente los siguientes temas, con énfasis en el período 1990-2010:

1. Factores de desarrollo de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca.
2. El sistema de innovación de la caña de azúcar.
3. Estrategias de investigación y desarrollo a nivel sectorial.
4. Cambios en los factores de la producción dentro del sistema agronómico.
5. Las perspectivas.

FACTORES DE DESARROLLO

La Agroindustria Azucarera Guatemalteca ha venido creciendo permanentemente desde 1960 hasta llegar a ubicar a Guatemala como:

- El quinto país exportador de azúcar a nivel mundial, el segundo en Latinoamérica, y el tercer lugar en productividad (toneladas métricas de azúcar/ha) a nivel mundial (Figura 3).
- El azúcar es el segundo producto agrícola en Guatemala en generación de divisas, constituyéndose en una importante contribución a la economía nacional (Cuadro 4).

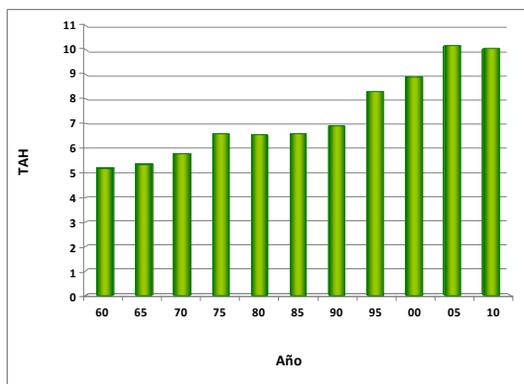
En la Figura 4 se observa que el aumento en la producción se debe a incremento en área y en productividad.

El aumento en la productividad ha sido más notable en los últimos 20 años como se muestra en la Figura 5.



Figura 4. Tendencias en área, producción y rendimiento de azúcar en Guatemala, 1960-2010

Fuente: Melgar, M. 2010. "Estrategias de la investigación tecnológica en la agroindustria azucarera de Guatemala". Presentación en Power Point en el simposio "Modelos de investigación y desarrollo tecnológico agrícola" Experiencias del sector privado. USAID-AGEXPORT. 15 de julio 2010.



Quinquenio	TCH	% Sac	TAH
1959/60*	53	9.70	5.20
1960/65	57	9.34	5.34
1965/70	62	9.24	5.76
1970/75	74	8.83	6.58
1975/80	77	8.49	6.54
1980/85	76	9.10	6.58
1985/90	71	9.66	6.90
1990/95	82	10.10	8.32
1995/00	85	10.42	8.87
2000/05	90	11.33	10.17
2005/10	94	10.75	10.05

* Solo 1959/60

Figura 5. Rendimiento de azúcar/TAH 1960-2010

Fuente: CENGICAÑA. 2007. Eventos históricos y logros 1992-2007 y actualización 2010 (Ver Anexo 1). Guatemala.

En la década 1980-1990 se produjeron en promedio 6.77 toneladas de azúcar por hectárea (TAH), mientras que para la década 2000-2010 el promedio fue 10.11 TAH.

Diversos autores describen los principales factores que han incidido en el desarrollo de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca. Estos son:

Cuadro 1. Principales factores de desarrollo de la Agroindustria Azucarera de Guatemala

FACTOR	DESCRIPCIÓN	AUTOR (ES)
Ecológico	Condiciones agroecológicas favorables	International Sugar Journal 1998
Organizacional Gerencial	Industria privada Organización gremial Método de exportación Terminal de exportación Diversificación	International Sugar Journal, 1998 Hasrajani, 2004 McSweeney, 2005
Tecnológico	Operaciones en campo Operaciones en fábrica Investigación Capacitación Transferencia de tecnología Benchmarking	Int. Sugar Jul 1998 Herrera <i>et al.</i> , 2001 Meneses <i>et al.</i> , 2003 Hasrajani, 2004 McSweeney, 2005 Menéndez y Estévez, 2005 Tay y Huete, 2006
Social	Condiciones de los trabajadores Responsabilidad Social	Herrera <i>et al.</i> , 2001 McSweeney, 2005

Fuente: CENGICAÑA. 2007. Eventos históricos y logros 1992-2007. Guatemala.

Los autores mencionados coinciden en que el componente tecnológico ha tenido un rol importante en el desarrollo de la Agroindustria Azucarera de Guatemala.

SISTEMA DE INNOVACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN GUATEMALA

De acuerdo con Tosi, 2010, el desempeño innovador de un país, región o sector no puede ser evaluado focalizando solo los logros de las organizaciones individualmente. Por el contrario, la innovación es un proceso que resulta de la interacción de diversas organizaciones.

En la Figura 6 se presentan las principales empresas u organizaciones que participan en el sistema de innovación de la caña de azúcar en Guatemala.

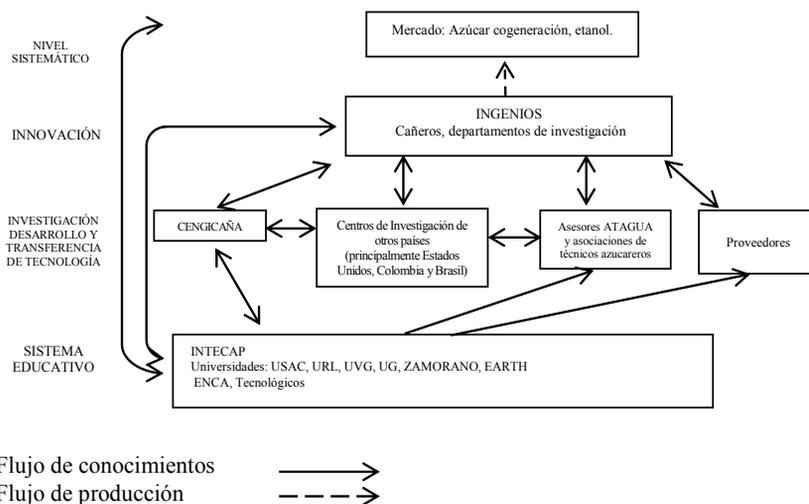


Figura 6. Sistema de innovación de la caña de azúcar en Guatemala

Algunas de las actividades que ha desarrollado el sistema de innovación, como capacitaciones, publicaciones y congresos, se pueden apreciar en las Figuras 7, 8 y 9.

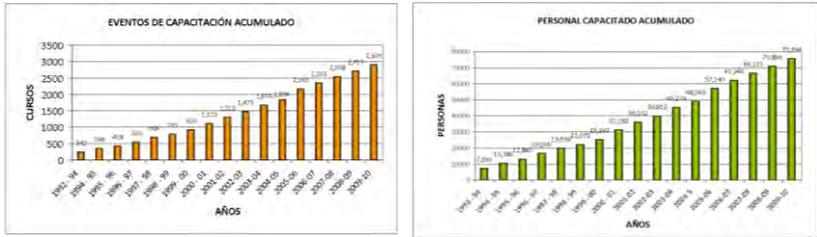
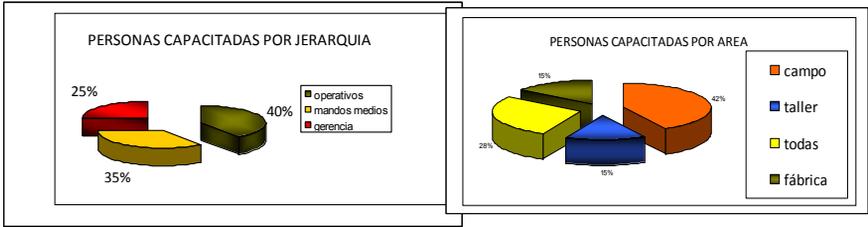


Figura 7. Eventos de capacitación coordinados por CENGICAÑA

Fuente: Melgar, M. 2011. "Desarrollo Tecnológico de la Agroindustria Azucarera y su Impacto en la Costa Sur de Guatemala". Presentación en Power Point en el foro "La Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Rural Integral" XI Congreso de Ingenieros Agrónomos, Forestales y Ambientales de Guatemala. 15 de junio 2011.

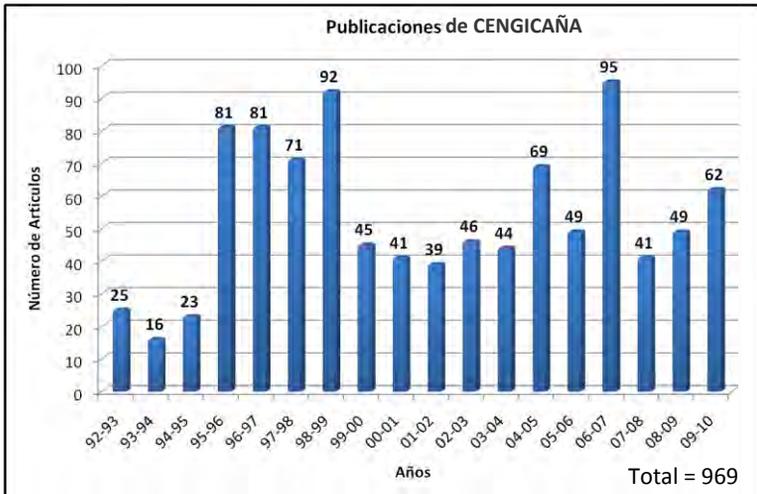


Figura 8. Publicaciones elaboradas por CENGICAÑA, la mayoría se encuentran disponibles en www.cengicana.org

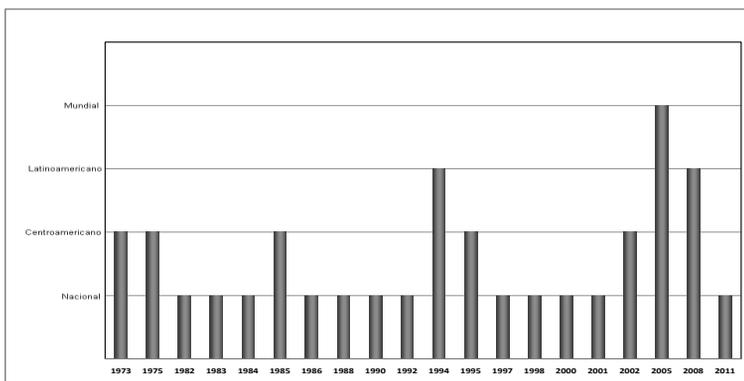


Figura 9. Congresos de caña de azúcar organizados en Guatemala por ATAGUA, con apoyo de ASAZGUA y CENGICAÑA

La Figura 10 sintetiza los actores de la red tecnológica del sistema de gestión de tecnología, que permiten formar el “Stock de tecnología” de la Agroindustria Azucarera de Guatemala.

SISTEMA DE GESTIÓN TECNOLÓGICA RED TECNOLÓGICA

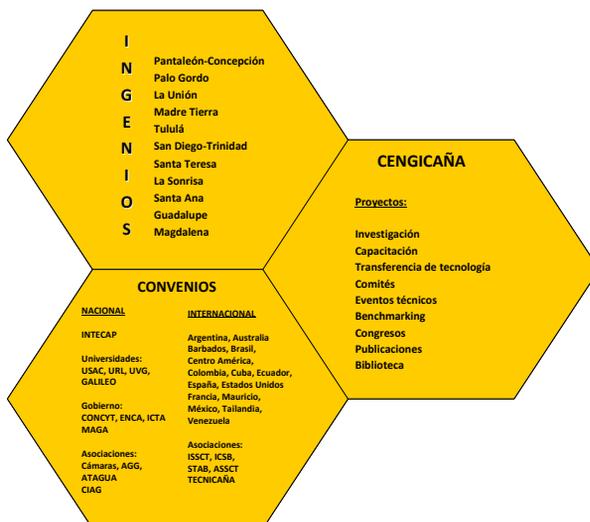


Figura 10. Actores de la red tecnológica del sistema de gestión de tecnología

Fuente: Melgar, M. 2011. “Estrategias de la investigación tecnológica en la agroindustria azucarera de Guatemala”. Presentación en Power Point en el seminario-taller “Situación actual y perspectivas de la investigación agropecuaria, forestal e hidrobiológica en Guatemala”. 02 de junio 2011.

POLÍTICAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO A NIVEL SECTORIAL

Como se observa en la Figura 6, las fuentes de innovación son diversas y cada una tiene sus políticas, en el Cuadro 2 se presentan las políticas de investigación y desarrollo a nivel sectorial que han dirigido el trabajo de CENGICAÑA y que han sido documentadas en publicaciones o presentaciones.

Cuadro 2. Políticas de investigación y desarrollo

POLÍTICA	DESCRIPCIÓN	ESTRATEGIA
1. POLÍTICA DE COORDINACIÓN SECTORIAL	Las actividades de desarrollo científico y tecnológico, y transferencia de tecnología se realizarán con la participación de las empresas que conforman el sector azucarero en forma coordinada.	Creación del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA).
2. POLÍTICA DE PRIORIZACIÓN DE LOS PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN	La investigación científica y tecnológica se orientará a resolver los problemas prioritarios del cultivo de la caña de azúcar.	Elaboración de planes estratégicos y operativos con la participación de los niveles gerenciales y técnicos de los ingenios.
3. POLÍTICA DE FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS	La capacitación, actualización y formación de profesionales y técnicos será una actividad prioritaria para el desarrollo tecnológico del sector.	Vinculación con instituciones nacionales e internacionales para la formación de recursos humanos.
4. POLÍTICA DE GESTIÓN TECNOLÓGICA	Se facilitará la difusión de los resultados de las investigaciones a través de actividades conjuntas con los ingenios azucareros. Se desarrollará un sistema de gestión tecnológica y un sistema de innovación.	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de comités específicos • Organización de eventos técnicos y congresos • Elaboración de publicaciones • Investigación coordinada • Eventos de Benchmarking • Establecimiento de una biblioteca especializada. • Creación de portal Web
5. POLÍTICA DE COOPERACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL	Se establecerá y fortalecerá la vinculación de CENGICAÑA con otros centros de investigación de caña y azúcar, a nivel internacional y organizaciones nacionales	Establecer convenios y otros mecanismos que permitan el desarrollo de programas o proyectos conjuntos, que promuevan el intercambio tecnológico.

POLÍTICA	DESCRIPCIÓN	ESTRATEGIA
6. POLÍTICA DE INVERSIÓN EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA	Se identificarán mecanismos que estimulen la inversión en ciencia y tecnología por parte de los empresarios del sector.	Presentaciones o elaboración de publicaciones que demuestren la rentabilidad de las inversiones en investigación.
7. POLÍTICA DE GESTIÓN DE CALIDAD	CENGICAÑA implementará un sistema de gestión de calidad	Certificación del Sistema de Gestión de Calidad de CENGICAÑA, de acuerdo con la Norma ISO 9001:2000 en 2006 y recertificación ISO 9001:2008 en 2009.

Fuente: CENGICAÑA. 2007. Eventos históricos y logros 1992-2007. Guatemala.

ESTRATEGIA DE PRIORIZACIÓN DE LOS PROGRAMAS Y PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

El Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar fue creado por la Asociación de Azucareros de Guatemala en 1992, para apoyar el avance tecnológico de la agroindustria azucarera, con el objetivo de mejorar la producción y la productividad del cultivo de la caña de azúcar y sus derivados. Es financiado por los ingenios que conforman la agroindustria azucarera de Guatemala, que hacen sus aportes al presupuesto del Centro, proporcionales a la producción de azúcar.

De acuerdo con el Plan Estratégico 2005-2015 la visión de CENGICAÑA es “Ser líderes en generar tecnología para incrementar la competitividad de la Agroindustria Azucarera en la región”, y la misión: “Ser la organización de la Agroindustria Azucarera responsable de generar, adaptar y transferir tecnología de calidad para su desarrollo rentable y sostenible”.

El Centro tiene como objetivos estratégicos:

1. Aumentar la rentabilidad y sostenibilidad de la Agroindustria Azucarera a través de la mejora continua de los procesos de Variedades, Manejo Integrado de Plagas, Biotecnología, Fertilización, Riegos, Agrometeorología, Zonificación agroecológica y Malezas y Madurantes.
2. Evaluar e implementar nuevos programas de investigación en fábrica, cogeneración y coproductos.
3. Mejorar la transferencia de tecnología a los ingenios asociados, por medio de capacitación, divulgación y promoción de los procesos de Benchmarking, en campo, fábrica y transporte.

4. Asegurar la satisfacción de los asociados con tecnologías para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad y *mantener el Sistema de Gestión de la Calidad certificado de acuerdo con la Norma ISO 9001:2008.*
5. Desarrollar un programa continuo de educación, formación y actualización del personal técnico de CENGICAÑA y la Agroindustria Azucarera.

Los programas y proyectos que desarrolla CENGICAÑA con base en la priorización definida conjuntamente, por la Junta Directiva, Gerentes Agrícolas y Gerentes Industriales, se listan en el siguiente Cuadro:

Cuadro 3. Programas y proyectos de investigación de CENGICAÑA

PROGRAMAS	ÁREAS	PROYECTOS
■ Programa de Variedades	1. Fitomejoramiento	1. Recurso genético. 2. Cruzamientos. 3. Programa de selección, 4. Semilla genética. 5. Promoción de nuevas variedades
	2. Biotecnología	1. Selección asistida con marcadores moleculares (MAS) 2. Detección molecular de enfermedades. 3. Cultivo de tejidos
	3. Fitopatología	1. Detección de patógenos en semilleros
■ Programa Manejo Integrado de Plagas	1. Entomología	1. Bioecología de plagas y sus enemigos naturales. 2. Investigación bioeconómica de plagas. 3. Desarrollo de estrategias de control
■ Programa de Agronomía	1. Fertilización y Nutrición Vegetal	1. Requerimiento de nutrientes y fertilización. 2. Uso y manejo de fertilizantes. 3. Uso y manejo de subproductos. 4. Abonos verdes
	2. Riegos	1. Eficiencia técnica y económica del riego. 2. Eficiencia técnica y económica de métodos de riego. 3. Estudios de niveles freáticos
	3. Agrometeorología	1. Análisis de información meteorológica para caña de azúcar
	4. Sistema de Información para Agricultura de Precisión	1. Sistema de información agronómico. 2. Zonificación agroecológica. 3. Mapas temáticos
	5. Malezas y Madurantes	1. Inhibidores de floración. 2. Madurantes. 3. Manejo de malezas
■ Programa de Investigación Industrial		1. Recuperación de sacarosa 2. Estandarización y normalización 3. Eficiencia energética

Fuente: Melgar, M. 2011. "Estrategias de la investigación tecnológica en la Agroindustria Azucarera de Guatemala". Presentación en Power Point en el seminario-taller "Situación actual y perspectivas de la investigación agropecuaria, forestal e hidrobiológica en Guatemala". 02 de junio 2011.

CAMBIOS EN LOS FACTORES TECNOLÓGICOS

La Figura 11 presenta el sistema agronómico de producción comercial. A continuación se describen los principales cambios en estos factores con énfasis en el período 1990-2010.

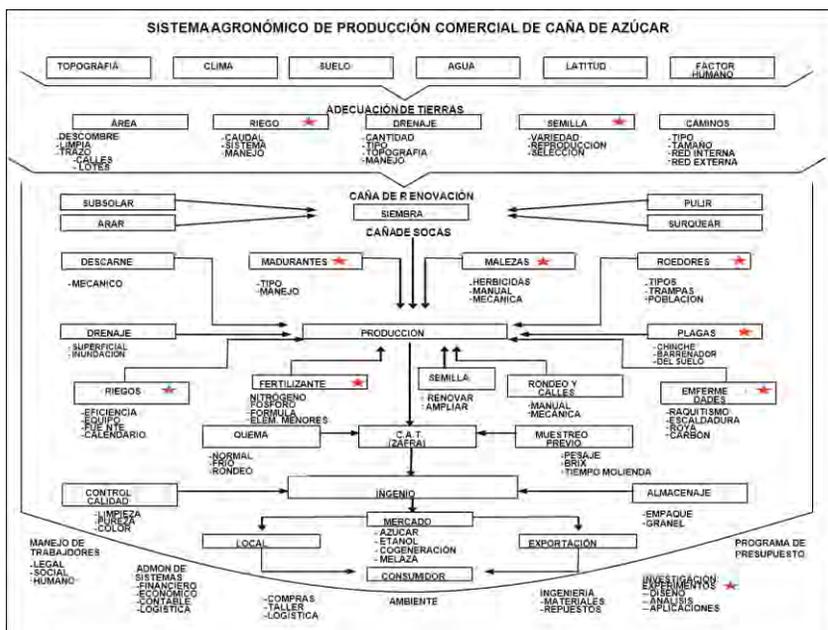


Figura 11. Sistema agronómico de producción comercial de caña de azúcar

Fuente: Melgar, M. 2011. "Desarrollo Tecnológico de la Agroindustria Azucarera y su Impacto en la Costa Sur de Guatemala". Presentación en Power Point en foro "La Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Rural Integral" XI Congreso de Ingenieros Agrónomos, Forestales y Ambientales de Guatemala. 15 de junio 2011. Adaptado de Gundersen, 2006.

★ Factores en los que se ha realizado investigación coordinada con CENGICAÑA.

Varietades

Durante el período de 1990/2010 (Figura 12) en la composición varietal de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca, se observó un predominio de las variedades CP provenientes de la Estación Experimental de Canal Point, Florida. Destaca la variedad CP72-2086 que en la zafra 2002/2003, ocupó el 75 por ciento del área sembrada.

A la variedad CP72-2086 se le ha denominado “supervarietad” porque ha ocupado más del 40 por ciento del área sembrada durante más de 10 años y, con más de 8 toneladas de azúcar por hectárea. Casos similares se registraron en Brasil en la década de 1980 con la variedad NA5679; en Louisiana, en la década de 1990 con la variedad LCP85-845; en Australia, en la década de 1990 con la Q124, y en la actualidad Colombia con la variedad CC85-92.

A partir de la detección de la Roya naranja en Guatemala, en 2007, el área de la variedad CP72-2086 ha disminuido y ha crecido el área de la variedad CP88-1165.

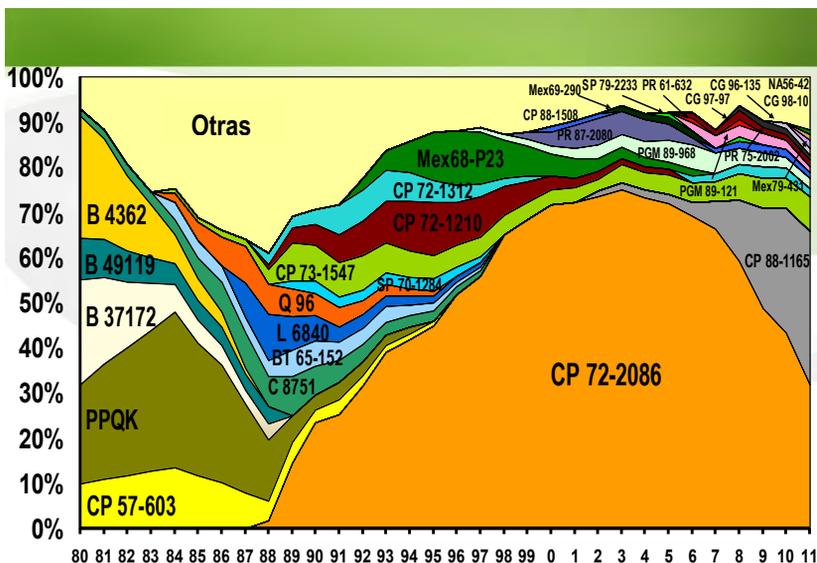
Otras variedades sembradas a partir de 2007 son CP, Mex, PGM, BR, SP, NA y CG.

En el período 1990/2010 se inició el proceso de hibridación para el desarrollo de las variedades guatemaltecas CG, las cuales para la zafra 2010/2011 ocuparon 9,000 hectáreas.

Se han introducido más de 1,700 variedades provenientes principalmente de Canal Point Estados Unidos, México, Brasil, Barbados, Australia, Mauricio, Cuba, Tailandia y Colombia. Se estableció la cuarentena de importación en 1993 y se han reportado dos nuevas enfermedades, la Escaldadura foliar y la Roya naranja.

Para el mejoramiento de los semilleros, el tratamiento hidrotérmico para Raquitismo es una tecnología usual, se estableció en 1999 el servicio de análisis por métodos serológicos; en 2010, se implementó la detección molecular de enfermedades para variedades importadas. En tanto que la multiplicación de semilla por micropropagación la realizan dos ingenios.

Se han establecido convenios para intercambio de variedades con BSES de Australia, Barbados, Canal Point Florida y ARS-USDA-HOUMA-LOUISIANA de Estados Unidos, CENICAÑA de Colombia, CINCAE de Ecuador, CIDCA de México, Mitr Phol de Tailandia, DIECA de Costa Rica, MSIRI de Mauricio y CTC de Brasil.



Guatemala, de 1980 a 2011

Fuente: CENGICAÑA. 2010. Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010.

Manejo Integrado de Plagas

En la Figura 13 se observan los niveles de infestación de las principales plagas de importancia económica. Con excepción de algunos porcentajes altos de infestación de roedores y un año de Chinche salivosa, la presencia de las plagas se ha mantenido por debajo del nivel de daño económico, lo que muestra un manejo sostenible en el cultivo.

El trabajo que realizan los responsables de manejo de plagas en cada ingenio es apoyado por el Programa de Manejo Integrado de Plagas de CENGICAÑA, que con el Comité de Manejo Integrado de Plagas (CAÑAMIP) ha desarrollado planes en manejo integrado para Barrenador, Chinche salivosa y Roedores.

Los ingenios han contado también con el apoyo de algunos asesores de Guatemala, Colombia, Costa Rica y México. A la vez que se han efectuado estudios bioecológicos para plagas del suelo, termitas y homópteros.

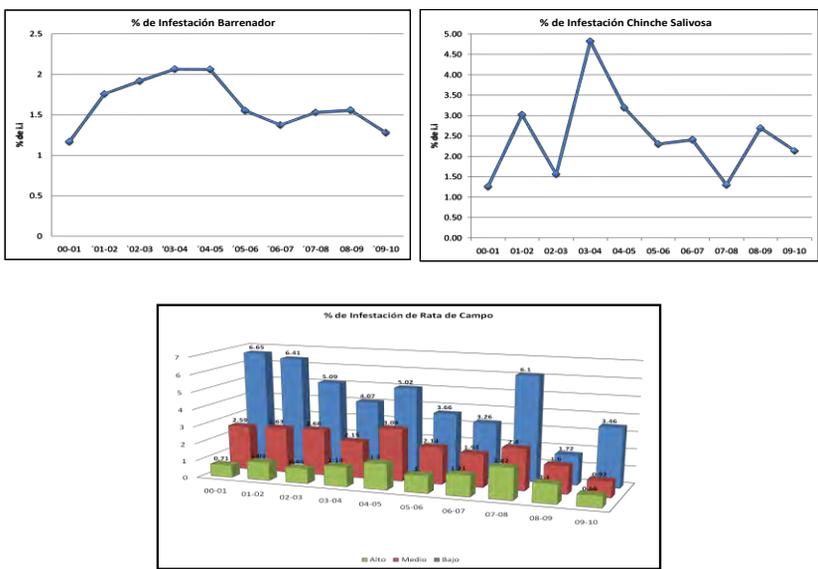


Figura 13. Evolución de diversas plagas de caña de azúcar 2000-2010

Fuente: CENGICANA 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

Fertilización

A partir de 1993 se realizaron los estudios “Estudio Semidetallado de Suelos de la Zona Cañera de Guatemala”, y “Grupos de manejo de suelos”, asimismo un trabajo sistemático de investigación científica-tecnológica que permitió determinar estrategias para la optimización del fertilizante nitrogenado y recomendaciones económicas para el uso y manejo de fertilizante fosforado.

Los fertilizantes son aplicados por grupos de manejo de suelos, de acuerdo con los requerimientos, análisis de suelos y rendimiento potencial. Se han especificado recomendaciones para nitrógeno y fósforo como se observa en la Figura 14.

Durante este período se desarrollaron las técnicas para la utilización eficiente de la cachaza y vinaza, manejo de abonos verdes y respuesta diferencial para variedades promisorias.

Recomendaciones de dosis de nitrógeno (kg N/ha) para el cultivo de caña de azúcar en suelos derivados de ceniza volcánica de Guatemala

Categoría de MO (%)	Caña Plantía (kg N/ha)	Caña Soca		
		¹ Rel N:TC	Dosis mínima	Dosis máxima
			Kg de N/ha	
Baja (< 3.0)	80	1.14	100	150
Media (3.0 – 5.0)	70	1.0	90	130
Alta (> 5.0)	60	0.9	80	120

¹Rel N:TC=Relación kg de N por tonelada métrica de caña esperado

Recomendaciones de fósforo según P del suelo, ciclo de cultivo y tipo de suelo

Categoría de P	Plantía		Soca	
	Andisoles	Otros suelos	Andisoles	Otros suelos
Bajo (< 10 ppm)	80	60	40	25
Medio (10-30 ppm)	60	40	0	0
Alto (>30 ppm)	0	0	0	0

Figura 14. Recomendaciones de nitrógeno y fósforo.

Fuente: Adaptado de Pérez, O.; Ufer, C.; Azañón, V. and Solares, E. 2010. Strategies for the optimal use of nitrogen fertilizers in the sugarcane crops in Guatemala. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. Veracruz, Mexico.

Fuente: Adaptado de Pérez, O.; Hernández, F. 2002. Comportamiento y manejo del fósforo en la fertilización de caña de azúcar en suelos de origen volcánico. En: Memoria de XIV Congreso de Técnicos Azucareros de Centro América ATACA. Guatemala. pp. 161-168.

Riegos

El área bajo riego en la zona cañera de Guatemala ha aumentado, como se muestra en la Figura 15, pero el apego a las recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego ha aumentado la eficiencia en la utilización del agua, como se observa en la Figura 16. Se ha avanzado también con la aplicación de otras tecnologías que incrementan la producción, como las siguientes: uso de balance hídrico, programación de riego precorte, análisis de la calidad del agua y del aporte del agua capilar y el manejo de vetas arenosas.

Se ha reportado la ampliación de áreas con sistemas mecanizados de riego, como pivotes fijos y pivotes móviles y desplazamiento frontal, y mayor número de sistemas por aspersión.

El uso de estos métodos de riego innovadores varía de acuerdo con la eficiencia en el uso del agua, facilidad en el manejo y costo operación y de inversión.

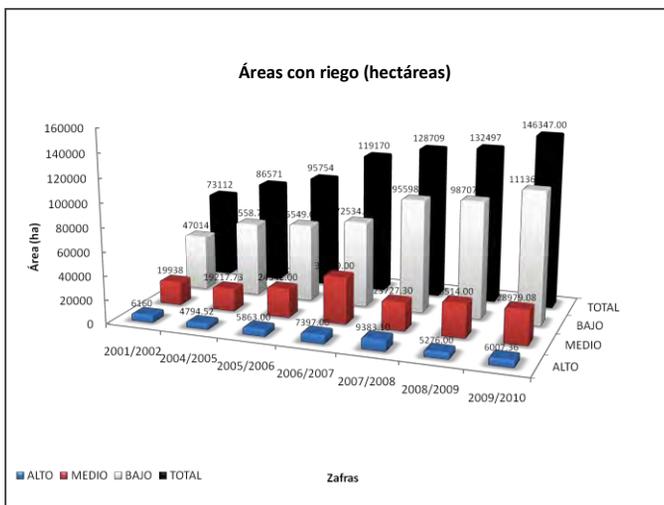


Figura 15. Crecimiento del área bajo riego 2001-2010, por estrato altitudinal bajo (1-100 msnm), medio (100-300 msnm) y alto (más de 300 msnm)

Fuente: CENGICANA 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar. Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

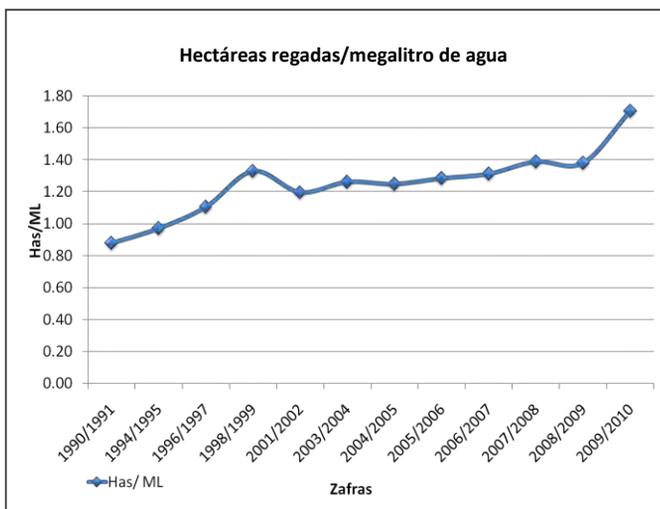


Figura 16. Evolución de la eficiencia en riego

Fuente: CENGICANA 2011. "Situación actual y proyección de la producción de azúcar" Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

Madurantes

La aplicación de la tecnología para la utilización de madurantes para aumentar los rendimientos, se amplió de 2,900 hectáreas en la zafra 1989/1990 a más de 140,000 en la zafra 2009/2010, como se observa en la Figura 17.

A través del tiempo se han ido evaluando los factores que afectan la respuesta al madurante como: calidad del agua, humedad del suelo, rendimiento potencial y variedades.

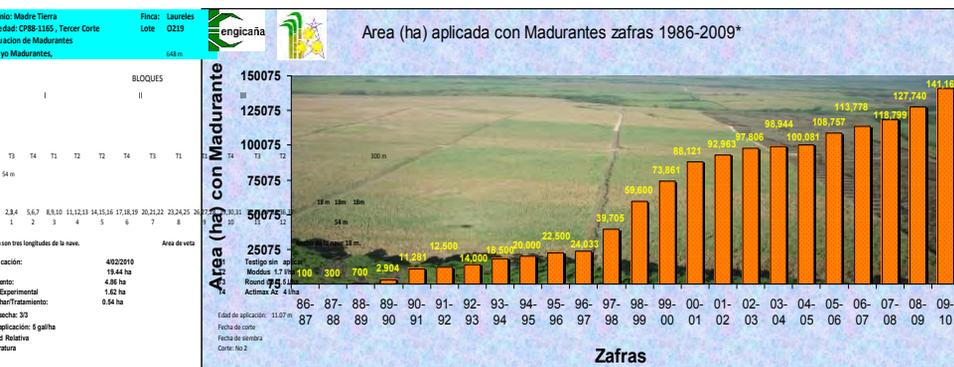


Figura 17. Área aplicada con madurantes

Fuente: CENGICAÑA 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

Malezas

Con el fin de generar información acerca del control de las malezas, se ha elaborado el Manual para la identificación y manejo de las principales malezas de caña de azúcar y el Catálogo técnico de herbicidas utilizados en la Agroindustria Azucarera Guatemalteca. De igual manera se han evaluado nuevas moléculas de herbicidas, la eficiencia de herbicidas y herbicidas específicos.

Agrometeorología

Para disponer de datos básicos, se estableció la Red automática meteorológica en la Zona Cañera de Guatemala, con 16 estaciones que proporcionan información de las principales variables meteorológicas, a las cuales se puede ingresar a través de la página de CENGICAÑA www.cengicana.org

A través de estudios agrometeorológicos se ha encontrado la relación de diversas variables climáticas con la producción de caña de azúcar, como es el caso de la radiación solar de agosto que está altamente correlacionada con la producción de caña de azúcar como se observa en la Figura 18.

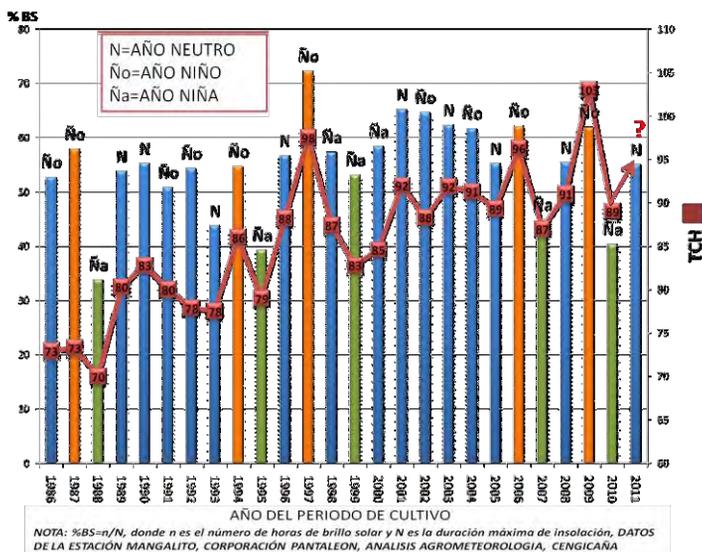


Figura 18. Relación ENSO, brillo solar de agosto y toneladas de caña de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca

Fuente: CENGICAÑA 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.

En 2009, Villatoro *et al.*, publicaron el estudio *Primera Aproximación de la Zonificación Agroecológica para el Cultivo de la Caña de Azúcar en la Zona Cañera de la Costa Sur de Guatemala*.

Las tecnologías de GPS y Sistema de Información Geográfica, se han utilizado principalmente para las aplicaciones de agroquímicos en el cultivo de la caña de azúcar, aplicaciones topográficas, riegos y transporte.

IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL

Según la fuente www.azucar.com.gt los impactos más importantes son:

- Generación de 65,000 empleos directos y 350,000 empleos indirectos y directos en 230,000 hectáreas que equivalen al 2.1 por ciento del territorio nacional.

- El azúcar para la zafra 2009/2010 representó el 10.25% del PIB de las exportaciones totales del país; 20.80% de las exportaciones agrícolas y generó US\$ 493 millones divisas, las cuales son la base para el intercambio económico del país que incluyen alimentos, contribuyendo a la seguridad alimentaria. El ingreso de divisas por exportación de azúcar y melaza ocupa el segundo lugar, después del café, incluso en algunos años ha logrado el primer lugar (Cuadro 4).
- Las actividades que promueven el desarrollo humano se llevan a cabo mediante programas educativos.
- El impacto social de la Agroindustria Azucarera se refleja en el nivel de desarrollo regional, principalmente del departamento de Escuintla, el cual lo posiciona como el tercer departamento con mejores indicadores de desarrollo en Guatemala (mejores condiciones de vida, menores índices de pobreza y de desnutrición).
- Ocho ingenios azucareros desarrollan cogeneración para la producción del 23 por ciento de energía eléctrica en época de zafra dentro del Sistema Nacional Interconectado (SIN), que representan 310 MW de potencia.
- Durante la zafra 2009/2010, cinco empresas asociadas a los ingenios azucareros produjeron 265 millones de litros de etanol, el cual fue exportado a Europa y Estados Unidos.

Cuadro 4. Ingresos de divisas por exportación del 2003 al 2010, en miles de US\$

Año	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ingreso total de divisas por exportación	2,284,338	3,074,419	3,644,832	3,813,657	4,219,396	5,034,553	4,795,305	5,490,744
Principales Productos	944,528	1,244,861	1,456,635	1,449,539	1,560,044	1,540,893	1,855,565	2,087,566
Azúcar y melaza	316,429	457,024	497,499	550,608	546,509	406,708	492,987	763,831
Banano	228,051	277,481	289,119	266,020	302,383	322,919	494,291	351,565
Café	328,122	424,740	575,322	529,553	587,987	660,130	589,245	705,477
Cardamomo	67,548	98,473	108,152	122,851	143,890	180,435	300,212	307,500
Centroamérica	312,833	382,765	371,876	590,535	692,547	1,147,115	1,212,780	1,991,856
Otros productos	1,036,975	1,446,793	1,816,320	1,773,583	1,966,805	2,346,544	1,726,960	1,411,321

Fuente: Banco de Guatemala

http://www.banguat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/comercio/por_producto/prod0207DB001.htm&e=92002

PERSPECTIVAS

La caña de azúcar es actualmente cultivada por más de 100 países con más de 20 millones de hectáreas en el mundo, en donde se producen 1,300 millones de toneladas de caña (D'Hont *et al.*, 2008).

En el pasado ha sido utilizada principalmente para producir azúcar, proveyendo casi dos tercios de la producción mundial.

Aunque la economía mundial dependerá en las próximas décadas de la energía fósil, la biomasa sustituirá parcialmente a la energía fósil por ser una fuente de energía renovable. Debido a la excepcional capacidad de la caña de azúcar para producir biomasa, será una fuente importante de la misma (Botha, 2009).

La caña de azúcar será la materia prima preferida para producción de etanol o generación de energía eléctrica y coproductos como: bioplásticos y derivados de la sucroquímica (ISO, 2009).

NIVELES DE PRODUCCIÓN

Moore, 2005 describe los diferentes niveles de producción asociados a factores limitantes y prácticas agronómicas o tecnologías para proteger o incrementar el rendimiento de los cultivos.

En la Figura 19 se presentan estos niveles de producción adaptados a la caña de azúcar en Guatemala. El rendimiento actual se define como aquel alcanzado bajo condiciones de factores limitantes como malezas, plagas, enfermedades o déficit de nutrientes.

Con apropiada fertilización y control de malezas, plagas y enfermedades se puede alcanzar el rendimiento obtenible. El rendimiento obtenible está determinado por limitantes ambientales asociadas a factores tales como agua, radiación, temperatura o salinidad de suelos.

El rendimiento potencial es alcanzado cuando el cultivo está en óptimas condiciones de aportación de insumos como agua y nutrientes en la ausencia de plagas y con las variedades apropiadas. El rendimiento potencial en una región puede ser estimado por los rendimientos récord alcanzados.

El rendimiento teórico es calculado a través de modelos de simulación basados en la fenología y fisiología de la caña de azúcar, y es posible alcanzarlo con el apoyo de la biotecnología y la agricultura de precisión.

Los rendimientos récord de caña de azúcar alcanzan aproximadamente un 65 por ciento del rendimiento teórico (Moore, 1997), por lo que existe un alto potencial para incrementarlos.

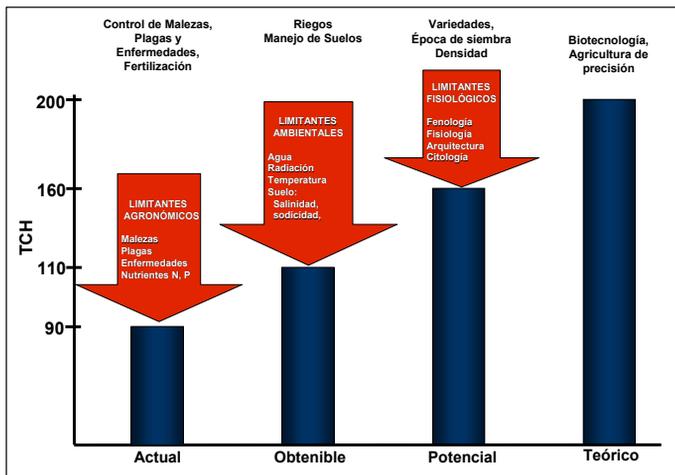


Figura 19. Niveles de producción, factores limitantes de la producción y prácticas agronómicas o tecnologías con potencial para proteger o incrementar el tonelaje (Adaptado de Moore, P. 2005).

Fuente: Melgar, M. 2010. Tendencias de la Investigación en Caña de Azúcar a Nivel Mundial. Sugar Journal (USA). November 2010. pp. 6-18

TENDENCIAS EN LA INVESTIGACIÓN

Melgar, 2010, presenta una revisión de algunas tendencias de la investigación en caña de azúcar, en el Cuadro 5 se listan las tecnologías que serán utilizadas en el futuro en caña de azúcar.

Cuadro 5. Tendencias tecnológicas en la caña de azúcar

Área	Actualmente en desarrollo	Mediano plazo
Mejoramiento genético	Mejoramiento tradicional Cruzas interespecíficas e intergenéricas Caña energética	Biotecnología: Selección asistida por marcadores moleculares Caña transgénica
Manejo de limitantes bióticos (plagas, enfermedades y malezas)	Manejo Integrado de Plagas Diagnóstico de enfermedades	Biocontrol Biología molecular Caña transgénica Silenciadores de genes

Área	Actualmente en desarrollo	Mediano plazo
	Manejo de malezas Estrategias para los cambios en la evolución de plagas, enfermedades y malezas	Diagnóstico molecular de enfermedades
Manejo de los recursos naturales (Ecoeficiencia)	Manejo del suelo Manejo integrado del agua Sistema de información agrometeorológico Cultivos complementarios para biocombustibles Mecanización (siembra, cosecha)	Nuevos fertilizantes Cosecha de agua Agricultura de precisión (GPS, GIS, sensores remotos) Tecnologías de información y comunicación (Internet, teléfonos, celulares)

Fuente: Melgar, M. 2010. Tendencias de la investigación en caña de azúcar a nivel mundial. Sugar Journal (USA). November 2010. pp. 6-18.

Con base en la revisión Melgar (2010), se presentan algunas tendencias sobre la caña de azúcar y sus derivados que señalan las tendencias de investigación:

1. En la medida que crezca la demanda energética a nivel mundial, la caña de azúcar jugará un rol muy importante como biocombustible y fuente de energía. El liderazgo en el desarrollo de investigación para la optimización de los procesos de producción de etanol y energía lo está ejerciendo Brasil, a través de universidades e instituciones localizadas principalmente en el estado de Sao Paulo y el Centro de Tecnología Canavieira (CTC). El aprovechamiento de toda la biomasa producida por la caña de azúcar se presenta como uno de los principales retos de investigación y desarrollo, para lo cual diversos países están desarrollando clones de caña energética derivados de cruzamientos interespecíficos e intergenéricos.
2. La mayoría de los centros de los países revisados, están haciendo grandes inversiones en biotecnología de la caña de azúcar, por lo que a mediano plazo se estarán utilizando a nivel comercial variedades transgénicas de caña de azúcar, especialmente en aquellos países que tienen ya variedades transgénicas a nivel experimental (Brasil, Colombia, Estados Unidos, Sudáfrica, China, India y Australia). Los principales caracteres que se han transformado en la caña de azúcar son: Resistencia a herbicidas, a plagas y a enfermedades, mayor acumulación de sacarosa y producción de polímeros y productos farmacéuticos.

3. Las tecnologías derivadas de la Biología Molecular y la Ingeniería Genética se estarán utilizando no solamente para el desarrollo de variedades de caña de azúcar, sino también como herramientas para el manejo integrado de plagas, diagnóstico de enfermedades, control de malezas y para métodos asociados a la fertilización, como la fijación biológica de nitrógeno y microbiología de suelos.
4. Un factor limitante mencionado por varios países es la ocurrencia de sequías, por lo que será indispensable la investigación de sistemas de riego de uso eficiente del agua, como riego por goteo, tecnologías para la optimización del uso del agua, cosecha de agua, conservación y manejo de fuentes de agua.
5. La agricultura de precisión para el uso óptimo de los insumos, en la búsqueda de la ecoeficiencia, requerirá investigación en técnicas de diagnóstico más precisas, uso de herramientas como: sistemas de información geográfico (GPS), sensores remotos y la aplicación de tecnologías de información: teléfonos celulares e Internet.
Cenicaña, Colombia tiene desarrollado el modelo de agricultura específica por sitios. La India por tener una gran cantidad de pequeños cañicultores ha impulsado el uso de las tecnologías de información para la transferencia de tecnología.
6. La competencia por el uso de la tierra para otros cultivos, silvicultura, y desarrollo urbano, hace necesaria la investigación económica.
7. Debido al cambio climático y a la preocupación por el ambiente, existirá más legislación enfocada a la protección del medio ambiente (agua, suelo, áreas protegidas, biodiversidad, uso de agroquímicos, seguridad industrial, tráfico y quemas), por lo que el enfoque del desarrollo debe basarse en la sostenibilidad.

AGRADECIMIENTO

A la Licda. Priscila López de Alvarado por su valiosa colaboración para la integración de este capítulo y la diagramación de este libro.

BIBLIOGRAFÍA

1. Botha, F.C. (2009). Energy Yield and Cost in a Sugarcane Biomass System. En: Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 31:1–10.
2. CENGICAÑA. 2007. Eventos históricos y logros 1992-2007. Guatemala. 85 p
3. CENGICAÑA. 2010. Logros 2006-2010. Presentación en Power Point a Junta Directiva de CENGICAÑA. 03 de mayo 2010.
4. CENGICAÑA. 2011. Situación actual y proyección de la producción de azúcar Zafra 2010/2011. Presentación en Power Point a Junta Directiva de ASAZGUA. 22 de marzo 2011.
5. D'Hont, A., et al (2008). Sugarcane: A Major Source of Sweetness, Alcohol, and Bio-energy. Springer. 2008. Genomics of tropical crop plants. Springer. p. 483-513.
6. Enriquez, Juan. 2001. As the Future Catches You. Crow Business New York. USA.
7. Hasrajani, N. 2004. La industria azucarera en Guatemala: Una Visión Global. ISJ Vol CVI N1267 jul p.385-389
8. Herrera, J.; Orive, J.; Boesche, A. 2001. Guatemala Sugar industry , INT. SUGAR JNL., VOL. 103, NO. 1235 p.484-485
9. International Sugar Journal. 1998. Guatemala continúa la trayectoria de éxitos. ISJ Vol100 No 1190 February. p46
10. ISO. International Sugar Organization. 2009. Sugar Year Book 2009. Documento en línea: <http://www.isosugar.org/PDF%20files/SUGAR%20YEAR%20BOOK%20-%20sample.pdf>
11. ISO. Organización Mundial del Azúcar. 2009. Potencial de mercado para bioproductos derivados de la remolacha y de la caña de azúcar.
12. McSweeney, J.F.; 2005. Guatemala From Zero to major exporter 1960-2004. Proc ISSCT Vol25. pp.465-470

13. Melgar, M. 2003. No debemos perder la siguiente ola: La revolución biotecnológica. ATAGUA (Gua) 3(4): 14:18
14. Melgar, M. 2010. Estrategias de la investigación tecnológica en la agroindustria azucarera de Guatemala. Presentación en Power Point, en simposio “Modelos de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agrícola” Experiencias Del Sector Privado. USAID-AGEXPORT. 15 de julio 2010.
15. Melgar, M. 2010. Tendencias de la investigación en caña de azúcar a nivel mundial. Sugar Journal (USA). November 2010. pp. 6-18.
16. Melgar, M. 2011. Estrategias de la investigación tecnológica en la agroindustria azucarera de Guatemala. Presentación en Power Point en el seminario-taller “Situación actual y perspectivas de la investigación agropecuaria, forestal e hidrobiológica en Guatemala”. 02 de junio 2011.
17. Melgar, M. 2011. Desarrollo Tecnológico de la Agroindustria Azucarera y su Impacto en la Costa Sur de Guatemala. Presentación en Power Point en foro "La ciencia y tecnología para el Desarrollo Rural Integral" XI Congreso de Ingenieros Agrónomos, Forestales y Ambientales de Guatemala. 15 de junio 2011.
18. Menéndez, M.; Estévez, M.; 2005 Reporte de inteligencia competitiva, DCE, Ministerio de Economía de El Salvador. Artículo electrónico. [Http://www.elsalvadorcompetitivo.gob.sv/Reportes%20IC/Reporte%20de%20Inteligencia%20Competitiva%20_azucar.pdf](http://www.elsalvadorcompetitivo.gob.sv/Reportes%20IC/Reporte%20de%20Inteligencia%20Competitiva%20_azucar.pdf)
19. Meneses, A.; Melgar, M.; Cano, W. 2003. Desarrollo de la agroindustria azucarera en Guatemala. SJ October Vol.62, No5. pp.18-19
20. Moore, P. 2005. Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the gene-to-crop-continuum. Field Crops Research 92 119:135.
21. Moore, P.H.; Botha, F.C.; Furbank, R.T.; Grof, C.R.L. 1997 Potential for overcoming physio-biochemical limits to sucrose accumulation. in Intensive sugarcane production: Meeting the challenges beyond 2000, eds Keating B.A, Wilson J.R.(CAB International, Wallingford, UK), pp. 141 - 156.
22. Oliver, Richard W. 1999. The Coming Biotech Age. McGraw Hill. USA.
23. OROZCO, H.; Buc, R. 2010. Censo de Variedades de Caña de Azúcar en Guatemala a la Zafra 2010-2011. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 21-30

24. Pérez, O.; Hernández, F. 2002. Comportamiento y manejo del fósforo en la fertilización de caña de azúcar en suelos de origen volcánico. En: Memoria de XIV Congreso de Técnicos Azucareros de Centro América ATACA. Guatemala. pp. 161-168
25. Pérez, O.; Ufer, C.; Azañón, V. and Solares, E. 2010. Strategies for the optimal use of nitrogen fertilizers in the sugarcane crops in Guatemala. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. Veracruz, Mexico.
26. TAY, K.; Huete, S. 2006. Guatemala sugar Annual 2006. Gain Report USDA Foreign Agricultural Service. Global Agriculture Information Network. USA. Documento en línea <http://www.fas.usda.gov/gainfiles/200604/146187439.doc>
27. Toffler, Alvin. 1982. La tercera ola. Plaza & Janés, S.A. Barcelona, España.
28. Tosi, F.; Andreé; Gaya, S. Mirna; Barbosa, C. Luis. 2010. The Brazilian sugarcane innovation system. Energy Policy. Vol. 39. pp. 156-166.
29. Villatoro, B.; Pérez, O.; Suárez, A.; Castro, O.; Rodríguez, M.; Ufer, C. 2009. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en la zona cañera de la Costa Sur de Guatemala – Primera Aproximación -. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICANA. pp. 226-239.
30. Wagner, Regina. 2007. Historia de la caña de azúcar en Guatemala. Galería Guatemala.

Anexo 1

Producción de azúcar de Guatemala, 1959/60 - 2009/10

ZAFRA	AREA (ha)	CAÑA MOLIDA (TM) **	AZÚCAR (TM) **				RENDIMIENTO			
			BLANCA	CRUDA	AMA*	TOTAL	AZÚCAR (%)	CAÑA (TM/ha)	AZÚCAR (TM/ha)	AZÚCAR TM/ha/mes
1959-60	12,534	670,130				65,163	9.70	54.00	5.24	0.46
1960-61	15,315	878,735	73,337	701		74,038	9.16	57.38	5.25	0.46
1961-62	21,859	1,217,472	106,240	7,539		113,779	9.35	55.70	5.21	0.45
1962-63	22,829	1,373,991	81,306	48,399		129,706	9.44	60.19	5.68	0.49
1963-64	24,576	1,461,832	80,364	55,775		136,138	9.31	59.48	5.54	0.48
1964-65	25,109	1,427,067	99,891	33,707		133,598	9.36	56.83	5.32	0.46
1965-66	29,715	1,844,223	112,118	48,822		160,940	8.73	62.06	5.42	0.47
1966-67	31,502	2,005,247	109,842	73,493		183,334	9.14	63.65	5.82	0.51
1967-68	25,306	1,605,109	102,915	51,588		154,503	9.63	63.43	6.11	0.53
1968-69	28,699	1,852,901	108,250	67,255		175,505	9.47	64.56	6.12	0.53
1969-70	31,446	1,946,474	115,252	64,660		179,911	9.24	61.90	5.72	0.50
1970-71	30,633	2,075,293	139,435	58,281		197,717	9.53	67.75	6.45	0.56
1971-72	35,780	2,543,070	114,887	116,246		231,133	9.09	71.08	6.46	0.56
1972-73	43,878	3,166,241	144,112	116,300		260,412	8.23	72.16	5.94	0.52
1973-74	45,384	3,584,436	171,391	142,854		314,244	8.77	78.98	6.92	0.60
1974-75	52,517	4,258,341	163,180	210,013		373,193	8.76	81.09	7.11	0.62
1975-76	75,594	6,220,755	193,071	343,811		536,882	8.63	82.29	7.10	0.62
1976-77	76,643	6,049,351	224,907	283,143		508,051	8.40	78.93	6.63	0.58
1977-78	60,629	4,785,963	236,869	159,362		396,231	8.28	78.94	6.54	0.57
1978-79	53,706	4,242,057	201,415	161,367		362,782	8.55	78.99	6.76	0.59
1979-80	66,000	4,624,547	184,866	212,183		397,049	8.59	70.07	6.02	0.52
1980-81	78,000	5,485,805	247,456	200,439		447,896	8.17	70.33	5.74	0.50
1981-82	76,964	6,410,563	294,027	244,728		538,756	8.40	83.29	7.00	0.61
1982-83	73,446	5,527,187	360,014	171,004		528,837	9.61	75.26	7.23	0.63
1983-84	76,146	5,536,266	290,281	225,236		515,517	9.31	72.71	6.77	0.59
1984-85	84,000	5,569,528	270,528	279,280		549,809	9.87	66.30	6.55	0.57
1985-86	81,000	5,696,386	382,403	207,089		589,492	10.35	70.33	7.28	0.63
1986-87	88,000	6,413,251	388,551	236,497		625,048	9.75	72.88	7.11	0.62
1987-88	97,000	7,113,195	385,107	268,767		653,874	9.20	73.33	6.75	0.59
1988-89	100,000	7,006,059	485,315	187,476		672,791	9.60	70.06	6.73	0.59
1989-90	110,000	8,834,892	559,232	279,595		838,827	9.50	80.32	7.63	0.66
1990-91	120,000	9,934,918	557,853	416,944		974,798	9.81	82.79	8.12	0.71
1991-92	130,000	10,402,975	548,843	526,093		1,074,936	10.33	80.02	8.27	0.72
1992-93	135,000	10,519,424	523,290	538,410		1,061,699	10.09	77.92	7.86	0.68
1993-94	140,000	10,847,973	622,816	489,693		1,112,508	10.26	77.49	7.95	0.69
1994-95	150,000	12,916,574	651,231	641,976		1,293,207	10.01	86.11	8.62	0.75
1995-96	165,000	13,033,507	615,096	680,021		1,295,117	9.94	78.99	7.85	0.68
1996-97	167,702	14,792,739	701,854	815,175		1,517,029	10.25	88.21	9.04	0.79
1997-98	181,218	17,666,169	630,452	1,161,233		1,791,686	10.15	97.49	9.89	0.86
1998-99	180,000	15,644,721	664,020	919,032		1,583,053	10.10	87.40	8.83	0.77
1999-00	180,000	14,338,961	642,060	1,013,108		1,655,168	11.55	82.80	9.56	0.83
2000-01	179,471	15,174,029	548,724	1,163,108		1,711,832	11.30	84.64	9.56	0.83
2001-02	185,000	16,900,237	718,007	1,193,410		1,911,418	11.30	92.00	10.40	0.90
2002-03	187,000	16,623,874	674,761	1,172,302	35,053	1,882,115	11.30	88.32	9.98	0.87
2003-04	194,000	17,780,557	908,481	1,052,834	44,424	2,005,740	11.30	91.89	10.38	0.90
2004-05	200,000	17,819,763	820,447	1,165,937	50,734	2,037,118	11.45	91.30	10.45	0.91
2005-06	197,000	16,883,877	719,196	1,066,348	61,247	1,910,683	11.25	89.30	10.04	0.87
2006-07	210,000	19,813,455	1,024,846	1,020,039	125,005	2,169,890	10.95	96.31	10.54	0.92
2007-08	230,000	19,697,218	1,158,401	815,590	115,405	2,089,396	10.60	87.26	9.25	0.80
2008-09	230,000	20,156,217	1,206,521	886,661	124,150	2,217,332	11.00	91.12	10.02	0.87
2009-10	230,000	22,033,540	1,371,868	880,291	43,547	2,329,795	10.04	102.40	10.28	0.89

Fuente: Para producción de caña molida, azúcar y rendimiento: ASAZGUA, CENGICAÑA

Para área cosechada: de 1959-60 a 1972-73 (ASAZGUA 1974), de 1973-74 a 1978-79 (Banco de Guatemala), de 1979-80 a 1980-81 y de 1984 a 1986-87 (Sugar and Sweetener, 1996), de 1981-82 a 1983-84 (ASAZGUA, 1984), de 1987-88 a 1998-99 (LMC International, 1998) y CENGICAÑA, de 1999 a 2010 CENGICAÑA y ASAZGUA

t** = Toneladas métricas

AMA* = Quintales equivalentes a la producción de materiales azucarados

II. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA CAÑERA

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA CAÑERA

Braulio Villatoro y Ovidio Pérez*

INTRODUCCIÓN

La Agroindustria Azucarera de Guatemala está conformada por 13 ingenios azucareros, los cuales se encuentran distribuidos geográficamente de la siguiente manera:

- Diez de ellos se ubican en la planicie costera del océano Pacífico o costa sur de Guatemala y ocupan casi la totalidad del área sembrada con caña (99%). Estos ingenios son: Tululá, Palo Gordo, Madre Tierra, La Unión, Pantaleón, Concepción, Magdalena, Santa Ana, Trinidad y El Pilar. Los otros tres ingenios se localizan en diferentes lugares de la república y ocupa áreas relativamente pequeñas. En el municipio de Villa Canales del departamento de Guatemala se encuentra el ingenio Santa Teresa, y en el departamento de Santa Rosa se encuentra el ingenio La Sonrisa. El ingenio Chabil Utzaj que está en fase de establecimiento se localiza en la parte norte del país, en el departamento de Alta Verapaz.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA CAÑERA

La zona cañera de la costa sur de Guatemala se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas 91°50'00" - 90°10'00" Longitud Oeste y 14°33'00" - 13°50'00" Latitud Norte. Geopolíticamente está localizada en los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla, Santa Rosa y actualmente se está expandiendo hacia el departamento de Jutiapa. La ubicación se presenta en la Figura 1.

* Braulio Villatoro es Ing. Agr., Especialista en Sistemas de Información para Agricultura de Precisión; Ovidio Pérez es Ing. Agr., M.Sc. Coordinador del Programa de Agronomía, CENGICANA. www.cengicana.org

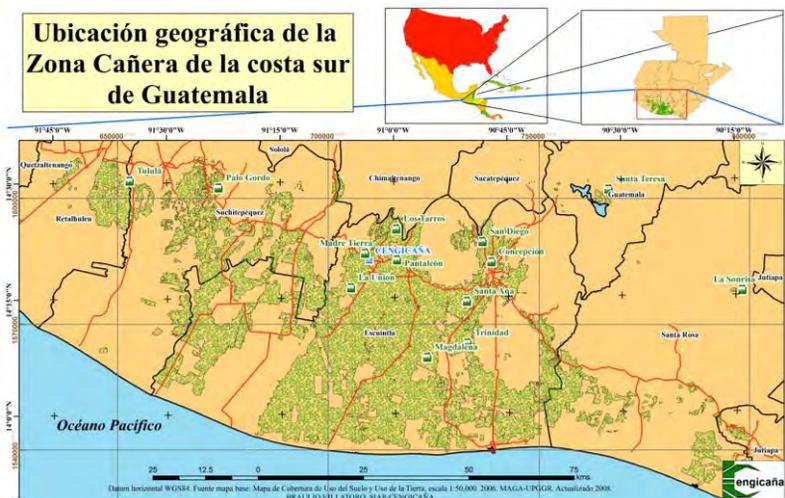


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona cañera de la costa sur de Guatemala

La zona cañera se encuentra en las cuencas de los ríos: Ocosito, Samalá, Sis-Icán, Nahualate, Madre Vieja, Coyolate, Acomé, Achiguate, María Linda, Paso Hondo, Los Esclavos y la Paz; las cuales se originan en la parte alta de la zona y desembocan en el océano Pacífico.

CLIMA

La zona cañera de Guatemala se ha dividido en cuatro estratos, con base en su posición altitudinal expresada en metros sobre el nivel del mar (msnm). La posición altitudinal en la zona cañera de Guatemala está asociada a variaciones climáticas y de suelo, debido a que la fisiografía de la región corresponde a un paisaje natural de planicie de pie de monte y forma un plano inclinado, que se inicia con pendientes de 7 a 25 por ciento cerca de la cadena montañosa, con relieve ondulado o de lomerío y va descendiendo suavemente hacia la costa del Pacífico con relieve plano (CENGICAÑA, 1996). El estrato alto está localizado en la zona superior a los 300 msnm; el estrato medio entre 100 y 300 msnm; el estrato bajo entre 40 y 100 msnm y el estrato litoral se localiza entre 0 y 40 msnm. La ubicación de los cuatro estratos en la zona cañera se presenta en la Figura 2 y las características climáticas por estrato se presentan en el Cuadro 1.



Figura 2. Estratos altitudinales de la zona cañera

Cuadro 1. Características climáticas en la zona cañera

Estrato	Altitud (msnm)	PP (mm/año)	T° (°C)			Radiación solar (MJ/m ² /día)	Velocidad media del viento (Km/h)
			Min.	Media	Max.		
Alto	> 300	4100	20.2	26.2	32.2	17.7	5.2
Medio	100 - 300	3700	20.5	26.7	32.2	17.3	6.8
Bajo	40 - 100	1900	21.2	27.3	33.8	18.4	6.2
Litoral	< 40	1500	21.0	27.5	33.4	18.0	8.7

El comportamiento de las variables radiación solar y temperatura es mayor en las cercanías a la costa y disminuye conforme se asciende en la zona cañera. Caso contrario, la precipitación pluvial disminuye conforme se desciende a la costa.

Las lluvias en la zona se distribuyen en dos estaciones: época lluviosa (o invierno) que ocurre entre mayo y octubre; en tanto que junio y septiembre registran la mayor precipitación también, pero existe un periodo de canícula de 15 días entre julio y agosto. La época no lluviosa (o verano) se marca entre octubre y mayo; los cuales coinciden con el período de zafra.

SUELOS

Material parental

El material sobre el cual se han desarrollado los suelos de la región cañera está principalmente constituido por cenizas, lapilli, pómez y otros materiales piroclásticos, derivados de las erupciones volcánicas ocurridas en diferentes épocas, principalmente durante la Cuaternaria (CENGICAÑA, 1996).

Las características mineralógicas y granulométricas de los materiales varían de un lugar a otro, según su localización geográfica, considerada, básicamente en relación con las distancias al cono volcánico. La Alófana es el mineral predominante en los suelos de las partes alta y media, en tanto que en las partes más bajas hay presencia de Halosita y arcilla tipo 2:1 probablemente Esmeclita, en estas partes bajas al occidente y oriente de la región.

Clasificación de los suelos de la región

En 1993 y 1994 se realizó el levantamiento de suelos de la zona cañera a nivel de semidetalle (1:50,000), para el cual se utilizó el sistema *Soil taxonomy* hasta el nivel de familia (Soil survey staff, 1992).

En la región existen seis órdenes de suelos, nueve subórdenes, 13 grandes grupos, 25 subgrupos y 37 familias. En orden de importancia por el área que ocupan los órdenes de suelos son: Mollisoles, Andisoles, Entisoles, Inceptisoles, Alfisoles y Vertisoles.

La ubicación de los diferentes suelos en la región tal como se observa en la Figura 3 responde al paisaje natural, considerando que los materiales fluvio volcánicos se distribuyen a través de los flujos de las corrientes de agua que descienden de la montaña, y su curso depende de la forma del relieve y de la pendiente. De esta manera se observa que los Andisoles (suelos de formación reciente) se encuentran en las zonas altas y medias de la región, que tienen alta precipitación pluvial; en tanto que los Mollisoles se ubican en las zonas bajas y litoral, en suelos planos, donde la precipitación pluvial es menor.

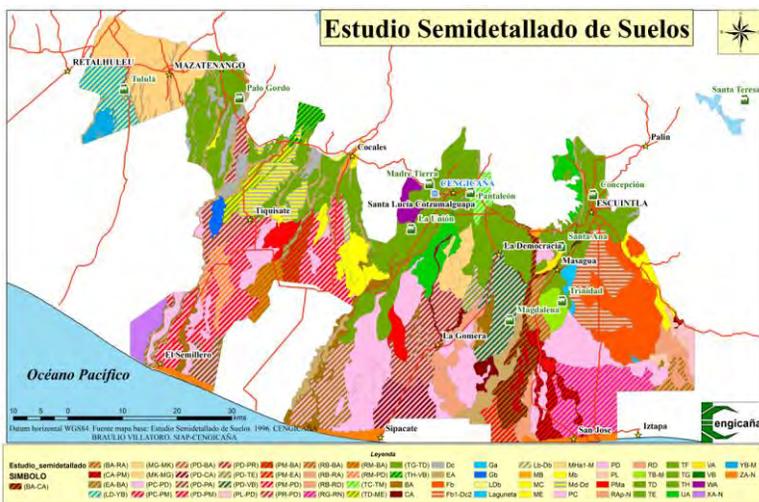


Figura 3. Mapa de clasificación de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Fuente: SIAP-CENGICAÑA

Las principales características de los seis órdenes de suelos se describen a continuación.

Mollisoles: Ocupan el 40 por ciento del área. Se encuentran principalmente en la zona litoral cerca de la planicie costera, en relieve plano y ligeramente plano. Son suelos medianamente evolucionados con horizontes ABC y AC. Presentan un horizonte superficial de espesor variable y de color oscuro con contenidos medios de materia orgánica (MO). Presentan una saturación de bases mayor del 50 por ciento en todo el perfil con un grado de estructuración de moderado a fuerte. En su mayoría son suelos de texturas francas y franco arenosas, con subsuelo frecuentemente arenoso.

Andisoles: Ocupan el 26 por ciento del área y predominan en las zonas altas y medias de la región y en algunas partes de la zona baja. Son suelos poco evolucionados derivados de ceniza volcánica, oscuros, con altos contenidos de MO y de baja densidad aparente y consistencia friable a suelta. Estos suelos tienen excelentes propiedades físicas con texturas francas y franco arenosas. Desde el punto de vista químico, tienen ciertas limitaciones como la alta retención de fosfatos y sulfatos.

Entisoles: Son los suelos menos evolucionados presentes en la región, con horizonte AC, y ocupan un 16 por ciento del área. Los mismos se encuentran en los valles y explayamientos aluviales en forma de fajas angostas en las partes medias y bajas con ampliaciones en el litoral en la planicie costera. Tienen poca o ninguna evolución y muy poca o ninguna evidencia de desarrollo de horizontes genéticos. En su mayoría son suelos permeables de texturas gruesas y arenosas. El subsuelo de los Entisoles generalmente es arenoso y son suelos que presentan déficit de agua en el verano.

Inceptisoles: Estos suelos ocupan el 11 por ciento del área y se ubican principalmente en la zona media y baja de la región. Se han desarrollado principalmente sobre materiales arcillosos mezclados con cenizas volcánicas y fragmentos de roca. Son suelos medianamente evolucionados con complejo de cambio saturado ($< 50\%$) con estructuras bien desarrolladas y de texturas medias y arcillosas sobre subsuelo arcilloso.

Alfisoles: Ocupan solamente un 1.6 por ciento de los suelos del área y se localizan en las partes medias y bajas de los abanicos antiguos en relieve ondulado a ligeramente ondulado. Estos suelos se caracterizan por tener un horizonte B argílico, en donde parte de la arcilla de los horizontes superiores del perfil migró hacia el subsuelo. Son de textura arcillosa con horizontes masivos y compactos.

Vertisoles: Ocupan una mínima extensión en el área (0.5 %) y son suelos más evolucionados de perfil ABC. Se caracterizan por su alto contenido de arcilla especialmente montmorillonita, lo cual hace que se agrieten fuertemente en la época seca y se hinchan en la estación lluviosa.

Grupos de manejo de suelos

La formación de los grupos de manejo se basó en la información del Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera de Guatemala (CENGICAÑA, 1996), haciendo una adaptación de la agrupación original. Los suelos se clasificaron de acuerdo con el Manual de Conservación del Suelo y del Agua del Colegio de Post-graduados, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hídricos de México (adaptado para el cultivo de caña de azúcar en Guatemala) y la familia taxonómica correspondiente (CENGICAÑA, 2002).

Los factores utilizados para la definición de las clases de suelos se dividieron en dos grupos: factores limitantes y factores auxiliares. Los factores limitantes –por su rango de variación e importancia– definen clases específicas, en tanto que los factores auxiliares no necesariamente definen una clase, pero describen condiciones especiales de manejo. Los factores limitantes más importantes determinados para la agrupación en los suelos de la región fueron: el clima, la susceptibilidad a la erosión, la topografía y el suelo; mientras que los factores auxiliares fueron: la textura, la permeabilidad y la reacción del suelo (pH), (CENGICAÑA, 2002).

El análisis de los factores limitantes y auxiliares dio como resultado 13 grupos de suelos, correspondientes a la existencia de cuatro clases de suelos (clases agrológicas). Cada clase de suelo se identificó con el respectivo factor limitante o factores limitantes, según nomenclatura convencional, mientras que el o los factores auxiliares se acompañan entre paréntesis.

Las principales características de cada uno de los grupos de manejo de suelos se describen en el Cuadro 2, y su ubicación geográfica se presenta en la Figura 4.

Cuadro 2. Características principales de los grupos de manejo de suelos de la zona cañera de Guatemala (CENGICAÑA, 2002)

Grupo de suelo	Clase de suelo / factores limitantes	Características
S01	I	Suelos Mollisoles profundos de alta fertilidad.
S02	II/E	Suelos Andisoles profundos, bien drenados que presentan erosión ligera.
S03	II/S1 (PR)	Suelos de textura gruesa, moderadamente profundos y permeables (Mollisoles secos).
S04	II/S1 (PL)	Suelos Inceptisoles moderadamente profundos de textura arcillosa y de baja permeabilidad.
S05	II/T1 E (PL)	Suelos Inceptisoles de textura arcillosa, con relieve ligeramente inclinado susceptibles a la erosión y de baja permeabilidad.
S06	II/T1 S1 E	Suelos Andisoles moderadamente profundos, con relieve ligeramente inclinado a ondulado susceptibles a la erosión.
S07	II/T1 S1 E (TF) (PL)	Suelos de textura arcillosa que se agrietan en el verano, con relieve ligeramente inclinado susceptibles a la erosión y muy lentamente permeables (integrados vérticos).

Grupo de suelo	Clase de suelo / factores limitantes	Características
S08	III/S1	Suelos superficiales limitados por la presencia de talpetate (Andisoles superficiales).
S09	III/S4 (PR)	Suelos Mollisoles afectados por la presencia moderada de sales en el perfil, de textura gruesa y altamente permeables.
S10	III/S1 (TQ) (PR)	Suelos Entisoles con muy baja retención de agua, limitados por la presencia de capas de arena en el perfil.
S11	III/T2 E S5 (TF) (PL)	Suelos con relieve ligeramente inclinado a ondulado susceptibles a erosión, texturas pesadas de lenta permeabilidad y presencia de sodio (Alfisoles vérticos).
S12	IV/T2	Suelos Inceptisoles y Entisoles que forman parte del lomerío con pendiente elevada, de relieve ondulada a quebrada de baja fertilidad.
S13	IV/T2 (RI) (PL)	Suelos de baja fertilidad con texturas pesadas de baja permeabilidad, muy secos en verano y son de relieve plano y ondulado. (Los Llanos de la Costa Sur).

Los grupos de suelos predominantes en la zona cañera son los Mollisoles secos (Grupo S03) que ocupan el 37.1 por ciento del área, seguido por los suelos Entisoles que tienen baja retención de agua por la presencia de capas de arena en el perfil (Grupo S10) con el 19.9 por ciento. Otros suelos importantes son los suelos Andisoles profundos bien drenados (Grupo S02), los suelos Mollisoles profundos de alta fertilidad (S01) y los Andisoles superficiales (S08) que ocupan el 13.4, 8.4 y 7.6 por ciento del área respectivamente (Villatoro *et al.*, 2010).

ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA (ZAE)

La zonificación agroecológica se obtuvo de la interacción de dos capas geográficas correspondientes a los grupos de manejo de suelos y los grupos de isobalance generados por CENGICANA, a través del balance hídrico del período octubre-mayo. Para ello a cada zona se le asignó un código alfanumérico compuesto por cinco caracteres; los primeros tres caracteres indican el grupo de suelos (ej. S01= grupo de suelos 1) y los últimos dos indican el grupo de isobalance (ej. H2= grupo de isobalance 2). También a las zonas se les asignó un número correlativo del uno en adelante como grupo de ZAE. En esta primera aproximación se obtuvieron 44 zonas agroecológicas. El mapa base que se utilizó para la primera aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en la zona cañera de la costa

sur de Guatemala fue el mapa de grupos de manejos de suelos, el mapa de la zonificación agroecológica se presenta en la Figura 5 (Villatoro *et al.*, 2010).

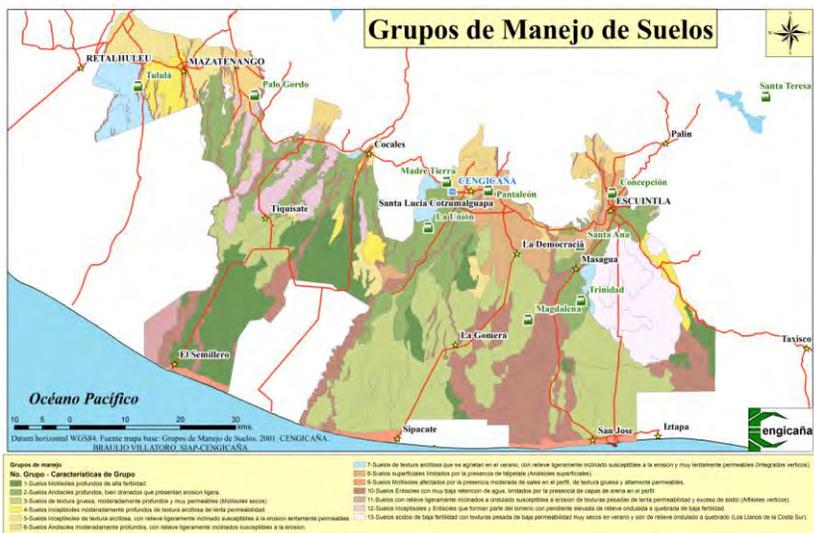


Figura 4. Grupos de manejo de suelos de la zona cañera de la costa sur de Guatemala



Figura 5. Zonificación agroecológica de la zona cañera

La zonificación agroecológica actualmente se está utilizando para analizar los resultados de la zafra, para estudios comparativos de productividad entre los ingenios, para la ubicación adecuada de los ensayos regionales y semicomerciales de variedades y de la extrapolación de los resultados de investigación y para relacionar variables de manejo.

BIBLIOGRAFÍA

1. CENGICAÑA. 1996. Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Ingeniería del Campo Ltda. Compañía Consultora. Guatemala. 216 p.
2. CENGICAÑA. 1996b. Anexo I del libro: Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Ingeniería del Campo Ltda. Compañía Consultora. Guatemala. 137 p.
3. CENGICAÑA. 2002. Grupos de Manejo de Suelos de la Zona Cañera de Guatemala. *In*: Informe Anual 2001-2002. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 37-39.
4. CENGICAÑA. 2009. Estratificación de la zona cañera de Guatemala. En: Informe Anual 2007-2008. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 71-73.
5. Holdridge, L. R. 1967. Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. (Traducción del inglés por Humberto Jiménez Saa: Ecología Basada en Zonas de Vida, 1a. ed. San José, Costa Rica: IICA, 1982).
6. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación). 2006. Mapa de Cobertura de Uso del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000. UPGGR (Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo). Guatemala.
7. Meneses, A.; Melgar, M.; Posadas, W. 2011. Boletín Estadístico año 12-2 del área de Campo. Guatemala, CENGICAÑA. 48 p. En prensa.
8. Orozco, H.; Soto, G. J.; Pérez, O.; Ventura, R.; Recinos, M. 1995. Estratificación preliminar de la zona de producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp) en Guatemala con fines de investigación en variedades. Guatemala, CENGICAÑA. Documento Técnico No. 6. 24 p.

9. Soil Survey Staff. 1992. Keys to soil taxonomy 5th Ed. Virginia. United States. Pocahontas Press.
10. Villatoro, B.; Pérez, O.; Suárez, A.; Castro, O.; Rodríguez, M.; Ufer, C. 2010. Zonificación Agroecológica para el Cultivo de Caña de Azúcar en la Zona Cañera de la Costa Sur de Guatemala –Primera Aproximación–. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICANA. pp. 325-331.

III. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

**Héctor Orozco, José Luis Quemé,
Werner Ovalle y Fredy Rosales Longo***

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético de las plantas tiene como objetivo modificar y aprovechar la variación genética con el propósito de obtener variedades que satisfagan las necesidades del hombre en circunstancias determinadas. El Programa de Variedades de CENGICAÑA realiza el mejoramiento genético de la caña de azúcar enfocado a contribuir al incremento de la productividad de azúcar a través de la generación y/o adaptación de variedades de alto tonelaje de caña y rendimiento de azúcar, adaptables a las diferentes condiciones ambientales, con resistencia a las enfermedades y las plagas más comunes, así como adecuadas características agronómicas que influyen en la composición varietal, cosecha, fabricación y otros.

El Programa de Variedades de CENGICAÑA fue establecido con una estrategia general que contempla tres componentes principales: a) variabilidad genética (germoplasma y cruzamientos), b) evaluación y selección, y c) liberación de variedades nuevas (Orozco, 2005). Estos componentes son descritos en este capítulo. La estrategia conlleva cuatro objetivos de mejoramiento: a) mejoramiento del rendimiento de azúcar por unidad de área, b) resistencia a enfermedades, c) adaptabilidad y d) habilidad de soqueo. Estos objetivos de mejoramiento responden al prototipo varietal requerido por la Agroindustria Azucarera Guatemalteca.

La creación de la variabilidad genética se obtiene mediante el mejoramiento convencional con cruzamientos en su mayoría biparentales entre progenitores seleccionados. Los progenitores son sustituidos en las campañas de cruzamientos por los obtenidos en los programas de intercambio varietal con otros países y por variedades élite CG. El programa de selección está basado en un esquema que orienta al desarrollo de variedades específicas para zonas altitudinales específicas y de maduración temprana y tardía. La evaluación y selección consiste en cinco estados de selección, iniciando con una población original de 180,000 macollas en el estado I y al final del proceso en el estado V

* Héctor Orozco es Ing. Agr., M.Sc., Coordinador del Programa de Variedades; José Luis Quemé es Ing. Agr., Ph.D., Fitomejorador; Werner Ovalle es Ing. Agr., M.Sc., Fitopatólogo y Fredy Rosales Longo es Ing. Agr., M.Sc., Fitomejorador de CENGICAÑA. www.cengicana.org

se evalúan de tres a cinco variedades promisorias. El estado V o Prueba semicomercial se considera en el programa como la etapa de validación y con base en los resultados de las evaluaciones en este estado se liberan las variedades para uso comercial.

La liberación de materiales genéticos consiste en la documentación de las variedades a liberar en la Memoria de presentación de resultados de investigación de CENGICAÑA. Debido a la disponibilidad de algunas variedades ya liberadas, recientemente se inició un proyecto de apoyo para acelerar la adopción de las variedades. Este proyecto contempla la participación conjunta del personal de CENGICAÑA con personal de los ingenios en la planificación de la composición varietal, para cada ingenio, y en el seguimiento del desempeño de las variedades comerciales y variedades nuevas en el nivel comercial. Los resultados del seguimiento se mostrarán a la Agroindustria, en un evento anual denominado Foro de Variedades.

GERMOPLASMA

En el mejoramiento genético de la caña de azúcar, las colecciones de germoplasma constituyen la base biológica o materia prima para la obtención de variedades nuevas. Las colecciones sirven como fuentes de variabilidad genética, cuya explotación y utilización permiten obtener variedades nuevas más productivas, de alto contenido de azúcar, adecuadas características agronómicas y con resistencia a las principales plagas y enfermedades. Típicamente las colecciones incluyen germoplasma básico (especies de *Saccharum* y géneros afines) e híbridos *Saccharum* spp. El germoplasma básico se encuentra en la *colección mundial de la caña de azúcar*, la cual está replicada en dos partes del mundo: una en la India y otra en los Estados Unidos. La colección mundial está formada en su mayoría por germoplasma básico, tal es el caso de la *colección mundial* en Miami, Florida, con 1,394 accesiones provenientes de las siguientes especies de caña de azúcar y gramíneas relacionadas: *Saccharum officinarum* (397), *S. barberi* (58), *S. sinense* (42), *S. robustum* (85), *S. spontaneum* (348), *Saccharum* spp. (229), híbridos comerciales (193), *Erianthus* (23), *Narenga* (1) y *Miscanthus* (18) (Ming *et al.*, 2006).

Los Programas de Mejoramiento de Caña de Azúcar de diferentes países del mundo cuentan con colecciones propias que han utilizado para el desarrollo de sus variedades. Por lo general, la utilización de germoplasma básico en estas colecciones ha sido menor. En relación con el número total de accesiones o variedades, se reporta a Australia con 4,020; Brasil con 3,736; Estados Unidos con 5,020; Barbados con 2,567; Cuba con 3,386; India con 3,979; y Fiji con

6,000 accesiones (INICA, 2003). La conformación de una colección de germoplasma involucra además del material genético las medidas cuarentenarias para el control de las introducciones con el propósito de evitar la introducción y/o diseminación de plagas de interés cuarentenario.

Aspectos generales de la citogenética de la caña de azúcar

La caña de azúcar pertenece al género *Saccharum*, el cual es miembro de la tribu *Andropogonae* y ésta de la familia *Poaceae*. Dentro de este género hay incluidas seis especies: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. sinense* y *S. edule*. Estas últimas tres especies, sin embargo, se cree que son de origen interespecífico o intergenérico (D'Hont *et al.*, 1998). La evidencia molecular no respalda el mantenimiento del estatus de “especies” de *S. barberi* y *S. sinense* (Ming *et al.*, 2006).

La caña de azúcar moderna (híbridos *Saccharum* spp.) es genéticamente un cultivo muy complejo, por lo que su mejoramiento genético en el ámbito tradicional de la endocria e hibridación es problemático (Singh *et al.*, 2010, Da Silva *et al.*, 1993). Hoy en día los cultivares modernos han reemplazado a los cultivares tradicionales de *S. officinarum* y a los clones de *S. spontaneum* (Grivet *et al.*, 2004).

Citogenética molecular

Estudios de citogenética molecular (D'Hont *et al.*, 1998; Grivet *et al.*, 2004; Edmé *et al.*, 2005; Babu, 2006; Piperidis *et al.*, 2010) y de mapeo genético (Da Silva *et al.*, 1993; Al Janabi *et al.*, 1993; Grivet *et al.*, 1994) han establecido el tamaño aproximado del genoma de *S. spontaneum* de 3.05 a 5.31 pg de ADN (picogramos), en tanto que, el tamaño del genoma para *S. officinarum* oscila entre 6.32 a 6.66 pg de ADN. Algunos cultivares comerciales (híbridos *Saccharum* spp.) de Canal Point tienen un genoma que oscila entre 6.30 a 7.5 pg (Edmé *et al.*, 2005). Los cultivares modernos exhiben del 70 al 80 por ciento de los cromosomas enteramente derivados de *S. officinarum*; 10-20 por ciento proveniente de *S. spontaneum* y muy pocos cromosomas producto de la recombinación específica (Ming *et al.*, 2006; Le Cunff *et al.*, 2008).

¿Cuál es el número básico de cromosomas de la caña de azúcar?

En plantas, se encuentran especies que tienen más de un juego de cromosomas en su forma haploide (n). En poliploides, “ x ” designa al número de juegos monoploides de cromosomas. La utilización de “ x ” a este fin distingue el juego monoploide del haploide o número gamético de cromosomas (n). Por tanto, el

número haploide (n) y el número cromosómico monoploide (x) de una especie diploide básica, son el mismo (Allard, 1980).

Para caña de azúcar, Sreenivasan *et al.* (1987) han revisado las diferentes propuestas para el número básico de cromosomas para un juego de éstos ($1x$), éstas se resumen en $x= 5, 6, 8, 10,$ y 12 . En *S. officinarum*, se ha establecido que el total de cromosomas es $2n=10x=80$. Aquellos clones con un mayor número de cromosomas son considerados atípicos o híbridos (Sreenivasan *et al.*, 1987). Para *S. officinarum* con citotipos principales de $2n= 60-80$ el número básico más probable es de $x=10$ (D'Hont *et al.*, 1998; Butterfield *et al.*, 2001; Ming *et al.*, 2006).

S. spontaneum exhibe un amplio rango en el número de cromosomas $2n=36$ a $2n= 128$ con cinco citotipos mayores $2n=64, 80, 96, 112$ y 128 . Mediante el uso de fluorescencia D'Hont *et al.* (1998) usando los genes 18s-25s rDNA y 5S rDNA y estableciendo su ubicación física en los cromosomas de diferentes citotipos de *S. spontaneum* determinaron que el número total de cromosomas fue proporcional a los números de sitios de rDNA mapeados físicamente. De este estudio se derivó que el número básico de juegos de cromosomas para *S. spontaneum* es de $x=8$.

Los híbridos *S. officinarum* x *S. spontaneum*

Los cultivares modernos de caña de azúcar (híbridos *Saccharum* spp.) son derivados esencialmente de cruces interespecíficos entre *S. officinarum* ($2n=8x=80$), una especie domesticada productora de azúcar, también llamada “Caña noble” con *S. spontaneum* ($2n=5x=40$ a $n=16x=128$) (Sreenivasan *et al.*, 1987; Butterfield *et al.*, 2001; Ming *et al.*, 2006; Le Cunff *et al.*, 2008).

Los híbridos interespecíficos, en especial aquellos que involucran *S. officinarum* como el parental materno y *S. spontaneum* como el parental paterno, tienen un número triploide (AAB) de cromosomas relativo a sus parentales, por ejemplo, cruzando *S. officinarum* ($2n=10x=80$) por *S. spontaneum* ($2n=8x=112$), produce híbridos con $2n=136$ cromosomas ($40+40$ de *S. officinarum*, más 56 de *S. spontaneum*; $2n+n$) (Sreenivasan *et al.*, 1987). Estos híbridos son caracterizados por su bajo contenido de azúcar, tallos delgados, alto contenido de fibra, gran capacidad de rebrote, y altos niveles de resistencia a factores bióticos y abióticos.

Para minimizar los efectos negativos provenientes de *S. spontaneum*, y retener la habilidad de alta retención de sacarosa en *S. officinarum*, una serie de cruces fueron desarrolladas entre los híbridos interespecíficos y los parentales de *S. officinarum* (retrocruzamiento) (Figura 1). Este proceso condujo a la

“nobilización” de híbridos *Saccharum* spp (Sreenivasan *et al.*, 1987). Esta fue una solución crucial en mejoramiento genético de la caña de azúcar. Al realizar el retrocruzamiento, el resultado fue nuevamente una progenie dotada con $2n+n$ gametos. Generaciones subsecuentes de retrocruzas solamente presentan reducción de gametos. Este proceso condujo a la pérdida de cromosomas en las generaciones resultantes, es decir, la **aneuploidía** (Sreenivasan *et al.*, 1987; Butterfield *et al.*, 2001; D’Hont *et al.*, 1998).

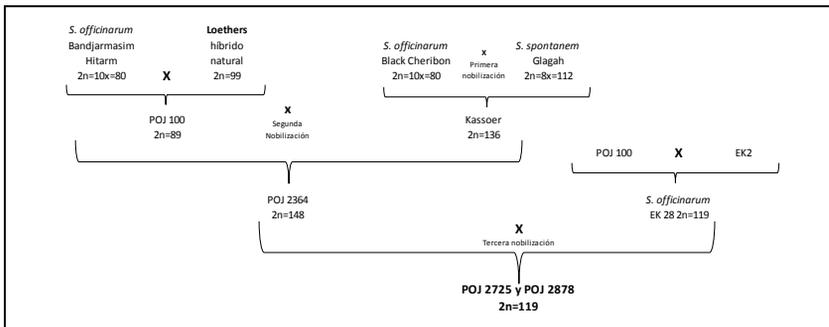


Figura 1. Pedigrí de POJ 2878 y POJ 2725 (Purseglove 1972; Sreenivasan *et al.*, 1987)

Es por esta razón que, dependiendo de la craza y del híbrido en cuestión, los cultivares modernos de caña de azúcar son altamente poliploides ($\sim 12x$) y aneuploides con ~ 120 cromosomas (Le Cunff *et al.*, 2008; Grivet *et al.*, 2004).

La hibridación interespecífica en el género *Saccharum* fue iniciada por mejoradores holandeses en la isla de Java alrededor de 1885. Producto de este trabajo, se obtuvieron finalmente los cultivares POJ 2725 y POJ 2878. Estos han contribuido significativamente como progenitores para los cultivares modernos de caña de azúcar alrededor del mundo, en los últimos 100 años, en particular POJ 2878. De un modo similar se obtuvo la variedad Co205 del programa de Coimbatore en India (Sreenivasan *et al.*, 1987; Purseglove, 1972).

Introducción de variedades y cuarentena

El Programa de Variedades de CENGICAÑA, al igual que otros programas de mejoramiento genético de la caña de azúcar en otros países (MSIRI 2006 y BSES 2007), está haciendo énfasis en la introducción de nuevos genes provenientes de programas de mejoramiento de otros países. CENGICAÑA obtiene variedades de programas de otros países a través de convenios de intercambio de variedades élite, generalmente al uno por uno. La calidad de variedades élite se le confiere a ciertos materiales genéticos que, según su

desempeño en productividad de azúcar, resistencia a enfermedades y características de manejo, sean iguales o superiores a los de las variedades testigo.

Los objetivos de la introducción de estas variedades han sido establecidos desde el inicio de las actividades del Programa de Variedades de CENGICAÑA (Orozco *et al.*, 2004 y 2008), estos son: a) ampliar la base genética al utilizar estas variedades como progenitores, b) evaluar el potencial de las variedades para el cultivo comercial. Desde 1992, se han importado 1,300 variedades provenientes de 12 países. El aporte de estas introducciones es significativo, si se considera que en el futuro habrá más restricciones para el intercambio de germoplasma con los programas de mejoramiento genético de la caña de azúcar.

Las variedades que se importan son sometidas a un sistema de cuarentena. El objetivo de CENGICAÑA es disminuir el riesgo de introducción de patógenos de la caña de azúcar que no estén presentes en el país o variantes nuevas de los que estén presentes en el país. El sistema de cuarentena consta de dos etapas: *cuarentena cerrada* y *cuarentena abierta*.

La *cuarentena cerrada* se conduce en la ciudad de Guatemala en un invernadero de aluminio y vidrio, dotado de malla antiáfidos en todas sus ventanas y con divisiones internas para aislar cada uno de los grupos de variedades introducidas. El material introducido se corta en trozos con una yema y se siembran cuatro trozos en macetas de 25 litros de capacidad, en sustrato formado por la mezcla de suelo, arena y materia orgánica. Se proporciona el riego y la fertilización necesaria para el desarrollo normal y se evalúan las plantas cada dos meses, para detectar síntomas de infecciones por Carbón (*Ustilago scitaminea* H Syd & P. Syd), Escaldadura foliar (*Xanthomonas albilineans*), Mosaico común de la caña de azúcar (SCMV), Enfermedad de la Hoja amarilla (SCYLV) y otras de interés (Ovalle, 1997). En caso de encontrar síntomas, la maceta completa se aísla y se dejan secar las plantas para proceder a su incineración. Luego de un período de entre 8 y 12 meses, las variedades que no presenten síntomas de enfermedades se cortan y se trasladan a la *cuarentena abierta*.

El objetivo de la *cuarentena abierta* es permitir el desarrollo de las variedades introducidas en condiciones de campo, pero alejadas de la zona de producción. La siembra en campo proporciona la posibilidad de observar infecciones que hayan pasado desapercibidas en la *cuarentena cerrada*. La duración de la *cuarentena abierta* es de 12 meses, con dos ciclos de seis meses cada uno y con evaluaciones al final de cada ciclo. Las variedades que muestren síntomas de las enfermedades indicadas se arrancan de raíz, se dejan secar y se incineran.

Las variedades que se muestren libres de síntomas de enfermedades al final de los dos ciclos de cultivo, se cortan y trasladan a la zona cañera del Pacífico, para ser incluidas en el estado II de selección.

Colección de germoplasma

El Programa de Variedades de CENGICAÑA cuenta con una colección de germoplasma denominada *colección nacional*, la cual está constituida de 2,040 accesiones o variedades, en su mayoría híbridos *Saccharum* spp. Las accesiones o variedades proceden de diferentes programas de mejoramiento del mundo, tales como: Estados Unidos (siglas CP y L), Barbados (B), Puerto Rico (PR), México (Mex), Brasil (RB y SP), Colombia (CC), Ecuador (ECU), Cuba (C, Ja, My y otras), India (Co), Australia (Q), Tailandia (MPT), Mauricio (M), Guatemala (CG) y otros. La colección se ha establecido de acuerdo con los objetivos siguientes: a) conservar, ampliar y utilizar la variabilidad con fines de mejoramiento genético. b) identificar alguna variedad con miras a la explotación comercial y c) obtener una fuente de semilla genética para iniciar la multiplicación de alguna variedad de interés específico.

La Colección está establecida en la estación experimental *Camantulul* de CENGICAÑA, a 300 msnm. El área está en un lugar seguro, con características de suelo adecuadas y accesible al riego, donde se le brinda el manejo apropiado en cuanto riego, fertilización, control de plagas, malezas y otros. En términos generales, la colección se renueva cada 3 ó 4 años, y la plantación anterior se deja por un año para garantizar el establecimiento exitoso de la nueva plantación.

La ampliación de la variabilidad genética de la colección se da a través de la incorporación de germoplasma élite nacional: CG (CENGICAÑA-Guatemala) e internacional (diferentes siglas), introduciendo en promedio 60 accesiones por año. Las accesiones nacionales son aquellas que han llegado a evaluarse en el estado IV o *pruebas regionales* (PR). Las accesiones internacionales, después del proceso de cuarentena ingresan a una fase temprana de evaluación (estado II) en dos localidades representativas de la zona cañera de Guatemala, luego se ingresan a la colección. Estas evaluaciones, en cierta medida, permiten identificar el nivel de adaptación de cada una de las accesiones y por lo general se utilizan como progenitores aquéllas que hayan destacado en las Pruebas Regionales.

El Programa de Variedades de CENGICAÑA inicialmente, para la colección, caracterizó cualidades agroindustriales relacionadas con calidad de jugo y cualidades morfológicas, lo cual generó grupos de variedades valiosas para nuevas combinaciones híbridas, basadas en su diversidad de origen (Soto y

Orozco, 1998; CENGICAÑA, 1999). Posteriormente, algunas variedades se han caracterizado conforme se van evaluando en los estados avanzados de selección, en donde se consideran las variables: rendimiento de caña en toneladas de caña por hectárea (TCH), contenido aparente de sacarosa, expresado en porcentaje (Pol%-caña), adaptabilidad, características agronómicas y su reacción a las principales enfermedades. Un grupo de variedades de la colección fue caracterizado a través de marcadores moleculares utilizando secuencias microsatélite de ADN o repeticiones de secuencias simples (SSRs), y de acuerdo con la similitud genética se formaron grupos homogéneos de variedades, lo cual ha sido un apoyo para optimizar la planificación de las combinaciones en el proceso de cruzamientos (Quemé *et al.*, 2005).

CRUZAMIENTOS Y PRODUCCIÓN DE SEMILLA SEXUAL

Debido a la dependencia de variedades introducidas para el cultivo comercial, así como la frecuente susceptibilidad a enfermedades locales, se ha mantenido la importación de nuevas variedades. Sin embargo, la importación de variedades tiene ciertos inconvenientes: a) son seleccionadas en condiciones diferentes, a donde serán introducidas para ser cultivadas comercialmente, lo cual influye en una limitada adaptabilidad y susceptibilidad a enfermedades, b) los programas de mejoramiento alrededor del mundo están limitando el libre acceso a las nuevas variedades debido a la políticas de derecho de obtentor. Esta situación justificó, en parte, la creación del Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de CENGICAÑA, con el fin de obtener variedades con alto rendimiento de azúcar por hectárea, con adecuadas características agronómicas, buena adaptabilidad, resistencia a las principales enfermedades prevalecientes en el medio donde serán cultivadas y otros. Todo lo anterior inicia con un programa apropiado de cruzamientos (CENGICAÑA, 2004; Miller, 1994; South African Sugar Association, SF).

Cualquier programa de mejoramiento de plantas tiene dos componentes principales: a) creación de variabilidad genética (generalmente a través de cruzamientos) y b) discriminación dentro de esta variabilidad (selección). Los elementos que hacen sostenible la mejora genética de la caña de azúcar son la liberación de nuevas variedades mejoradas y el continuo mejoramiento de las poblaciones que se utilizan como progenitores. El mejoramiento de las poblaciones se puede alcanzar mediante el uso de clones élites producto del programa de selección, introducción de nuevos clones y descartando los progenitores poco productivos (Cox *et al.*, 2000).

La hibridación en caña de azúcar consiste en cruzar variedades entre sí por la técnica de planta a planta (P a P), de la cual se obtiene semilla sexual F₁, ésta al ser sembrada produce plantas que se someten al proceso de selección (Márquez, 1988). Dada la importancia que tiene la hibridación en la creación de la variabilidad en un programa de mejoramiento genético, se describe a continuación la estrategia de cruzamientos del Programa de Variedades de CENGICANA.

Fuente de progenitores

Como producto de la caracterización de la colección nacional, se ha formado la *colección de trabajo*, la cual está conformada por 418 variedades potenciales para realizar los cruzamientos. Por lo tanto, esta colección constituye la fuente principal de progenitores, complementada por la colección nacional.

La colección de trabajo se encuentra establecida en la estación experimental Camantulul (300 msnm) y en la subestación experimental del estrato alto (760 msnm) en la finca Los Tarros del ingenio La Unión.

Las razones para establecer una réplica de la *colección de trabajo* en la zona alta son las siguientes: 1) en esta zona se obtiene en forma natural mayores frecuencias de variedades con flor (Cuadro 1), esto facilita un aumento en el número de combinaciones en el proceso de cruzamientos; 2) aumento en las frecuencias de sincronización de la floración; esto permite realizar cruza con progenitores que florecen al mismo tiempo, pero en localidades diferentes.

Cuadro 1. Incidencia de floración (%) de la colección de trabajo en dos zonas altitudinales

Zafra	Estrato alto 760 msnm	Estrato medio 300 msnm	Diferencia
2007-08	91	68	23
2008-09	83	36	47
2009-10	67	26	41

Selección de progenitores para cruzamientos

La selección de progenitores superiores es esencial para el éxito de los cruzamientos. El valor de los padres puede estar definido por la habilidad de combinación para producir buenas progenies y por su comportamiento como tal (*per se*), en cuanto a la concentración de azúcar, adaptabilidad, características agronómicas, enfermedades, plagas y otras características.

El Programa de Variedades cuenta con un plan de cruzamientos en donde se tienen diferentes grupos de variedades, de acuerdo con los siguientes criterios: a) variedades con buenas características agronómicas y buen contenido de azúcar, b) variedades identificadas como contrastantes a través de marcadores moleculares, c) variedades promisorias CG e introducidas al Programa de Variedades de CENGICANA, d) variedades que se cultivaron y/o se cultivan con éxito en Guatemala, e) variedades exitosas como progenitoras en otros programas de mejoramiento del mundo, f) variedades por su maduración natural y otros (Quemé *et al.*, 2001).

El criterio para tomar en cuenta un progenitor en una cruce está basado en: a) el contenido de azúcar, b) toneladas de caña por hectárea (TCH), c) resistencia a enfermedades, d) otras. En los dos últimos años se ha dado mucha importancia a la resistencia a Roya naranja (*Puccinia kuehnii*) y Roya marrón (*Puccinia melanocephala*). Por ejemplo, utilizando los criterios del Cuadro 2, a la variedad CG97-97 se le tiene codificada como NSRN, MSRM, P2, T1, es decir que la variedad no tiene síntomas de Roya naranja, es moderadamente susceptible a Roya marrón (15.1-20.0% de incidencia), el Pol% caña es similar o mayor al testigo y en tonelaje es igual o mayor al 20 por ciento con respecto a la variedad testigo (CP72-2086). Se trata de seleccionar un progenitor que tenga un récord igual o mejor que el testigo comercial para las variables de interés. Además se seleccionan progenitores que han mostrado la habilidad de producir buenas progenies en cruces anteriores. Los rangos del “valor con relación al testigo” (Cuadro 2), han sido tomados con base en la propuesta de Viveros *et al.* (2009).

Cuadro 2. Criterios para seleccionar progenitores para cruzamientos

Valor en relación con CP72-2086 (%)	Pol % en caña	TCH	Grado de resistencia o susceptibilidad		
			Roya naranja	Roya marrón	Resistencia ambas royas
>=120	P1	T1	Diferentes codificaciones	Diferentes codificaciones	RR*
100-119	P2	T2	Diferentes codificaciones	Diferentes codificaciones	RR*
90-99	P3	T3	Diferentes codificaciones	Diferentes codificaciones	RR*

*RR se le asigna a las variedades que son resistentes a las dos royas

En un estudio realizado en el 2008 (no publicado), se observó que cuando se utilizan hembras con cero de incidencia de Roya naranja, las probabilidades de obtener hijos o progenies sin la presencia de dicha enfermedad (Cuadro 3), esto

sugiere que, para obtener progresos en la obtención de variedades resistentes a la Roya naranja, es necesario que ambos progenitores no presenten síntomas o por lo menos la hembra no debería mostrar síntomas a la Roya naranja.

Cuadro 3. Respuesta de progenies provenientes de progenitores con diferentes porcentajes de incidencia de Roya naranja

Cruzas	Incidencia Roya naranja (%) *		Progenie con Roya naranja (%) **
	Hembra	Macho	
CP73-1547 x CP89-1288	0	0	0
CP73-1547 x B74418	0	0	0
CP73-1547 x L82-41	0	0	0
CP92-1401 x V71-51	0	8	0
CP72-2086 x L79-321	10	0	25
SP79-2233 x CP72-2086	15	10	42
CP72-2086 (testigo)			35

* Datos tomados en porcentaje de incidencia (de 0% a 50 %) en la hoja No. 7.

** Por ciento de plántulas con presencia de Roya naranja.

Técnicas y procedimiento de cruzamientos

Lugar y época para las cruzas: Las cruzas se realizan en dos casas de cruzamientos, una ubicada en la estación experimental *Camantulul* (estrato medio) y la otra en la subestación experimental del *estrato alto*, ubicado en la finca Los Tarros del Ingenio La Unión. Las condiciones promedio de humedad relativa y temperatura para la casa de *Camantulul* son de 83 por ciento y 27°C, respectivamente, mientras que para la casa de Los Tarros es de 81 por ciento y 25°C, respectivamente; estas condiciones se consideran apropiadas para mantener la viabilidad del polen. La época de cruzamientos está definida por la floración natural, la cual se da por lo regular en noviembre y diciembre.

Monitoreo de la floración y definición del sexo de los progenitores: La inspección de la floración natural se realiza cada dos días, con el propósito de contabilizar cuántas flores están disponibles para cruzamientos. El sexo de los progenitores es determinado por medio de la técnica de la lupa manual, clasificando como macho (♂) aquel progenitor que presente anteras voluminosas, de tono morado que segrega polen, y como hembra (♀) aquella que presente anteras arrugadas, pequeñas, de color amarillo pálido, con escaso polen. Mediante muestreos, la sexualidad de los progenitores se corrobora con microscopio, examinando el polen con la técnica de la solución de Iodo (de 0 a 20% de polen teñido se considera hembra y más de 30% se considera macho).

En casos especiales, en donde los dos progenitores se clasifican como machos y el interés es hacer una cruce entre ellos, se induce la esterilidad masculina utilizando alcohol al 70 por ciento de concentración, tal como lo describen Soeprijanto y Sukarso (1989).

Manejo de los tallos: Los tallos de los progenitores seleccionados son cortados en su base cuando se inicia la antesis, se colocan en cubetas con agua, son etiquetados y luego transportados cuidadosamente a la casa de cruzamientos. En la casa de cruces, los tallos nuevamente se cortan en su base, para introducirlos en frascos de plástico o de vidrio de un litro de capacidad. Para prolongar la vida de los tallos y, por consiguiente, la vida de las flores es necesario que los frascos contengan además de agua dos soluciones: a) ácido sulfuroso (H_2SO_3); b) ácidos fijos (H_2SO_4 , H_3PO_4 y HNO_3). El H_2SO_3 se obtiene mezclando dióxido de azufre gaseoso (SO_2) y agua. Estas soluciones tienen la función de preservar los tallos y proveer de nutrientes. Durante la fase de cruzamientos se aplican las dos soluciones, de acuerdo con un programa semanal: Lunes (A. sulfuroso y A. fijos), miércoles (A. sulfuroso) y viernes (A. sulfuroso y A. fijos). Otra técnica que se utiliza para prolongar la vida de las flores son los acodos; éstos se realizan en la parte inferior de los tallos de 4-6 semanas antes de la antesis, luego los tallos con los acodos son llevados a la casa de cruzamientos y colocados en cubetas con agua o en combinación con las soluciones preservantes.

Manejo y tipo de cruces: Para realizar las cruces los tallos se ubican en condiciones aisladas dentro de la casa de cruzamientos (cubículos o faroles), las flores de los progenitores machos se colocan arriba de las flores hembras; por las mañanas, los tallos de los machos se mueven ligeramente a efecto de mejorar la liberación del polen. En cuanto al tipo de cruces, la mayoría de las cruces realizadas en CENGICAÑA han sido simples (una variedad hembra por una variedad macho) o biparentales, y en menor número policruces (una variedad hembra por dos o más variedades machos). En mínima proporción se han obtenido cruces de polinización libre, las cuales son hembras ubicadas en las colecciones y que se polinizan por uno o varios machos al aire libre. Para cualquier tipo de cruces, el periodo de polinización se da aproximadamente en los primeros 14 días, luego viene el periodo de maduración de la semilla (10 a 15 días más). En la casa de cruzamientos, algunas veces se eliminan los machos a partir de los 14 días, puesto que para esos días ya ha concluido la función de polinizador.

Maduración, cosecha y secado de la semilla: Después de dos semanas de finalizada la polinización, los tallos de las hembras polinizadas entran en la fase de maduración de la semilla sexual. Aproximadamente a los 20 días después de iniciada la cruce, se cubren las flores hembras con bolsas de tul blanco

(malla de 1mm), o con bolsas de papel kraft, manteniendo los tallos dentro la solución de las cruzas. Las flores de las hembras se pueden cosechar de 25 a 30 días después de iniciada la crusa, cortando el pedúnculo de cada panícula. Dependiendo del criterio del fitomejorador a veces se cosechan los machos, principalmente cuando las hembras y machos están en un punto intermedio de su clasificación sexual (ej.: entre 20% y 30% de polen teñido). Para el secado, las panículas dentro de las bolsas de tul o papel se secan en una cámara de aire forzado por 24 horas a una temperatura de 35^oC. La recomendación del secado es producto de un estudio por dos años consecutivos, en donde se determinó que ese tratamiento no afecta la germinación de la semilla (no publicado).

Limpieza y almacenamiento de la semilla sexual: La semilla con pelusa (fuzz) se puede limpiar manualmente frotándola sobre una alfombra y mecánicamente con una máquina “despelusadora”. La semilla limpia se identifica y guarda en bolsas de plástico con un desecante o absorbente de humedad. La semilla se almacena en cámaras frías a una temperatura menor de -12^oC. Finalmente la semilla es germinada en invernaderos y las plántulas (seedlings) son trasplantadas al campo definitivo dos o tres meses después de la germinación para iniciar el programa de selección. Actualmente se están produciendo más de 550 cruzas por campaña, con una producción promedio de 160,000 plántulas.

PROGRAMA DE SELECCIÓN

Los procedimientos de selección varían entre los diferentes programas de mejoramiento existentes en el mundo. Estos procedimientos de selección están en función, principalmente, de la edad de la planta para la selección y el número de cortes o socas (Ming *et al.*, 2006). En Guatemala, las variedades de caña de azúcar utilizadas comercialmente, alcanzan su madurez de cosecha a los 12 meses de edad, con un promedio de cinco cortes (plantía y cuatro socas). Los criterios de selección aplicados en el Programa de Variedades de CENGICANA, considerando los factores anteriores van orientados al prototipo varietal establecido conjuntamente con los productores de caña de azúcar. El prototipo varietal deberá estar acorde a la duración del periodo de zafra en Guatemala, que va de noviembre a abril. Por lo anterior, los cultivadores de caña de azúcar requieren variedades con la maduración natural acorde a esos meses de zafra. Como repuesta se generan dos grupos de variedades: floreadoras y no floreadoras, con el supuesto de que las variedades floreadoras serán de maduración temprana, mientras que las variedades que no florecen, maduran al final de la zafra (maduración tardía).

Estados tempranos de selección

Estado de selección I: Es por composición genética, el más grande de todos los estados. En este estado se ensayan todos los materiales genéticos que alcancen el desarrollo de una macolla, producto del crecimiento de una planta de caña de azúcar proveniente de una semilla verdadera. Esta semilla sexual es producto de un proceso de cruzamiento o de una autopolinización, según haya sido el criterio de su generación. Por tanto, se consideran a estos individuos genéticamente recombinantes. Los individuos recombinantes son la base de toda la variabilidad que se establece dentro del ensayo del estado I y se plantan en campo definitivo todos aquellos que hayan sido regenerados en un invernadero destinado específicamente para tal fin.

El estado I se conduce enteramente bajo los cuidados del personal profesional y técnico de la estación experimental Camantulul de CENGICAÑA. El propósito es conservar en las mejores condiciones posibles dicha variabilidad. El principio básico del estado I es: “cada planta tiene el potencial de convertirse en una variedad superior de alto desempeño”.

El estado I se conduce durante dos ciclos de cultivo: plantía y primera soca. La selección se realiza en la primera soca, donde se seleccionan “macollas” producto del rebrote en el segundo año de cultivo. Durante el primer ciclo de producción las macollas provenientes de semilla verdadera no logran expresar apropiadamente su potencial de desempeño. Debido al crecimiento constante del número de individuos producto de las diferentes cruza, los niveles de observación en este estado se limitan a considerar aspectos generales de la planta como el vigor, expresado principalmente en población, altura y diámetro de tallo, así como la presentación de sanidad general.

En el estado I se asigna la nomenclatura de identificación a los materiales que hayan sido seleccionados. Esta nomenclatura incluye: las letras “CG” (CENGICAÑA, Guatemala); el número de cruce correspondiente y una numeración correlativa para cada selección realizada. En lo sucesivo, la nomenclatura acompañará al material genético hasta su posible liberación. Con el código asignado también se establece la genealogía correspondiente. Dependiendo del acuerdo que pueda realizarse con otros programas de mejora genética en otros países, la nomenclatura puede variar, aunque en general ésta conserva la misma estructura.

En el estado I se cuenta, usualmente, con más de 160,000 individuos para ser evaluados y sujetos de selección. Durante la selección, se establecen dos grandes grupos: “flor” y “no flor”, según el hábito de floración. El hábito de floración es el indicativo sobre la adaptación de los genotipos, en el tiempo:

aquellos que florecen se adaptan para los primeros meses de cosecha durante la zafra y los que no florecen, se adaptan bien a la cosecha en los meses intermedios y finales de la cosecha. En este estado de selección no se utiliza diseño experimental.

Actualmente, el Programa de Variedades, con el fin de optimizar el proceso de selección, ha establecido, como parte del estado I, la evaluación de familias, en donde la progenie de cada cruce constituye una familia. La evaluación se realiza en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones, sembrando una muestra de cada familia en dos surcos de 10 metros de largo. El ensayo de la evaluación de familias se establece en dos localidades, una en el estrato medio en la estación experimental Camantulul y otra en la subestación experimental estrato litoral, ubicada en la finca El Retazo del ingenio Magdalena. Este ensayo de familias permite identificar las cruces superiores, que serán la base para la posterior selección individual de las mismas, en el ensayo de selección clonal individual: el estado I.

Estado de selección II: Las macollas seleccionadas en el estado I proveen del material vegetal para la propagación de las mismas en un siguiente ensayo para selección clonal: el estado de selección II. Este estado se siembra un surco de cinco metros de largo para cada genotipo. El estado de selección II, aunque con mucho menos materiales genéticos que el estado I, también es un ensayo que cuenta con un alto número de genotipos, entre 1,000 y 5,000.

De estos materiales cerca del 25 por ciento corresponden a genotipos predominantemente “no floreadores” y el resto son predominantemente “floreadores”. En el estado II se inicia un proceso más detallado de caracterización de los materiales genéticos, con el fin de realizar una selección más precisa. Sin embargo, debido al tamaño de los ensayos y la cantidad de materiales genéticos, las observaciones de selección se restringen a: aspecto de la planta, presencia de enfermedades y refractometría (Brix) (Quemé *et al.*, 2010). En este estado la descripción de las enfermedades se hace con más precisión, con especial atención a las enfermedades siguientes: Escaldadura foliar (*Xanthomonas albilineans*); Carbón (*Ustilago scitaminea* H Syd & P. Syd); Roya marrón (*Puccinia melanocephala*) y Roya naranja (*Puccinia kuehni*); Enfermedad de la Hoja amarilla (SCYLV); Mosaico común de la caña de azúcar (SCMV) (Ovalle, 1997).

El estado II se desarrolla en dos estratos altitudinales representativos: estrato medio a 300 msnm y estrato litoral 30 msnm. En general, los estratos bajo y litoral son los de mayor área de cultivo y donde se ubican en grandes extensiones las principales zonas de producción; la incidencia de floración es menor y, en general, es el área con el mayor potencial de rendimiento debido a

los buenos niveles de fertilidad (Pérez, 2002; Suárez *et al.*, 2007). En el estrato medio, los suelos son más arcillosos y menos profundos (Pérez, 2002; Suárez 2007) y la precipitación pluvial anual es mayor, al mismo tiempo que la menor incidencia de radiación global correlaciona positivamente con mayor frecuencia de la floración (Quemé *et al.*, 2009; Orozco *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2010).

Cada ensayo del estado II está constituido por dos experimentos: materiales genéticos que florecen (*flor*) y materiales genéticos que no florecen (*no flor*). Debido a que las frecuencias de individuos que florecen son mayores que las de aquellos que “no” florecen, los experimentos “flor” suelen ser más grandes en una proporción de 3:1 con respecto a los experimentos “no flor”. La condición de material genético “flor” y “no flor” se establece desde el estado I. Los ensayos del estado II se evalúan y seleccionan solamente en su primer ciclo de producción: plantía.

La selección en dos estratos diferentes ofrece una mejor lectura de la adaptación de los materiales genéticos y, en consecuencia, se espera explotar más eficientemente el potencial de rendimiento de las variedades que se liberen para cada estrato. En este estado de selección no se utiliza diseño experimental y la selección la realizan los fitomejoradores de acuerdo con los requerimientos generales y específicos del cliente.

Estado de selección III: Los materiales genéticos seleccionados en el estado II, son utilizados como fuente de material vegetal, para la propagación en los ensayos del siguiente estado de selección: el estado de selección III. El estado de selección III se organiza en dos grandes ensayos para los dos estratos altitudinales ya descritos, con los experimentos “flor” y “no flor”. El estado III en cada estrato altitudinal se compone de dos repeticiones de cada experimento. La unidad experimental o de evaluación y selección está compuesta por cinco surcos de cinco metros cada uno, donde se ubica un solo genotipo.

En términos generales, la constitución de los ensayos en el estado III se realiza en forma diferencial para estrato altitudinal. Unos 150 genotipos son seleccionados para cada estrato y la proporción de genotipos “no flor” seleccionados se mantiene en 25 por ciento. Se ha observado que de 20 a 30 genotipos “flor” y de 15 a 25 “no flor” comparten selección tanto en es estrato medio como en el estrato litoral. El resto son selecciones diferenciales para cada estrato. Esto muestra el alto grado de adaptabilidad específica de los genotipos de caña de azúcar.

Los genotipos superiores se seleccionan de acuerdo con su mejor desempeño en cuanto al rendimiento de caña en toneladas por hectárea (TCH), la concentración de azúcar expresada en Pol%-caña y el rendimiento de azúcar en

toneladas métricas por hectárea (TAH). El TCH se estima con base en la medición de los componentes del rendimiento de la caña de azúcar: población de tallos molederos, altura de las plantas, diámetro del tallo y peso en kilogramos de una muestra de diez tallos. EL TAH se estima a partir del TCH y la concentración aparente de sacarosa en porcentaje (Pol%-caña), este último se determina en el Laboratorio Agronómico CENGICAÑA.

Se realiza una evaluación de enfermedades y se descartan aquellos materiales genéticos que no superen los límites impuestos para cada enfermedad en evaluación. Las enfermedades evaluadas son, principalmente, las mismas que se califican en el estado II. Adicionalmente, se presta atención a enfermedades consideradas de importancia relativa, como El Pokkah Boeng (*Fusarium moniliforme* Sheldon), Mancha púrpura (*Dimeriella sacchari*) (Ovalle, 1997) y otras.

Los ensayos en el estado III se evalúan durante dos ciclos de producción: plantía y primera soca. Con la información de la evaluación de la “plantía” se hace una primera selección de genotipos. Con ellos se establece el “estado III incremento”. Las unidades experimentales seleccionadas sirven para la obtención de material vegetal de propagación, el cual, a la vez, se utiliza para la conformación de un semillero especial cuyas dimensiones proporcionarán la cantidad de material vegetal de propagación para el siguiente estado de selección, el estado IV. En esta primera evaluación se seleccionan entre 50 y 70 genotipos que presenten en plantía el mejor desempeño agronómico y varietal.

En el segundo ciclo de cultivo (primera soca), se hace otra evaluación de los experimentos y se confirman o descartan materiales que hayan sido seleccionados inicialmente. Además, se hacen lecturas en el semillero constituido en el ciclo anterior (estado III incremento). Luego de las evaluaciones, se establece el listado de materiales genéticos (entre 20 y 30 genotipos) que cumplen con los estándares establecidos y pasarán a conformar el siguiente estado de selección: El estado de selección IV o pruebas regionales.

Estados avanzados de selección y validación

Dentro del esquema metodológico del proceso de desarrollo de variedades de CENGICAÑA, los estados avanzados de selección y validación se inician inmediatamente después de haber completado la selección de genotipos deseables en los estados de selección temprana (estado I, estado II y estado III). En estos tres estados de selección iniciales, se elimina un gran número de genotipos como resultado de la estricta presión de selección fenotípica que se impone. El objetivo principal en los estados avanzados de selección y validación es evaluar la fracción superior del estado III bajo las diversas

condiciones ambientales que prevalecen en la zona cañera de Guatemala, para identificar los genotipos que superen a las variedades comerciales testigo de referencia. Para lograr este objetivo, se conducen dos tipos de evaluaciones que se identifican como pruebas regionales (PR) y pruebas semicomerciales (PSC).

Pruebas regionales (PR): estas pruebas corresponden al estado IV de selección y constituyen la primera evaluación extensiva, en donde las variedades, agrupadas en ensayos experimentales uniformes, son expuestas a una amplia diversidad de ambientes contrastantes (suelos, precipitación, temperatura, manejo, etc.) que regularmente se presenta en los campos de producción comercial de la región cañera en Guatemala. Estas pruebas son conducidas en forma conjunta entre personal técnico del Programa de Variedades de CENGICAÑA y de las empresas (ingenios) de la Agroindustria Azucarera.

Las variedades que conforman las pruebas regionales son aquellas que con base en el análisis de la información de la plantía y primera soca del estado III de selección conducido en su respectiva subestación experimental (Figura 2), superan a las variedades testigos comerciales, las cuales son actualmente la CP72-2086 y la CP88-1165. Según esta agrupación, las PR para los estratos alto y medio se conforman con las variedades seleccionadas en el estado III de la subestación experimental del estrato medio, mientras que las PR de los estratos bajo y litoral con las variedades seleccionadas del estado III de la sub-estación experimental estrato litoral (Figura 2). En general, en las PR se evalúan aproximadamente entre 20 y 30 variedades, en ensayos uniformes con diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se establece como parcela experimental útil cinco surcos de 10 m de largo distanciados a 1.5 m, dejando un surco libre entre cada unidad experimental.

La semilla (esquejes) que se utiliza para establecer las PR se produce en semilleros que se siembran en la subestación experimental del estrato medio (finca El Bálsamo, ingenio Pantaleón) y de la subestación experimental del estrato litoral (finca El Retazo, ingenio Magdalena) en donde se conducen ensayos de selección del estado III, identificándose estos semilleros como estado III-incremento. Estos semilleros se desarrollan paralelamente en el tiempo con el rebrote de la plantía del estado III que da origen a la primera soca. Los semilleros del estado III-incremento son conducidos en coordinación con el personal del Programa de Variedades de CENGICAÑA y personal del ingenio en donde se ubica la subestación experimental. La semilla obtenida de los semilleros del estado III-Incremento es distribuida a los ingenios interesados en sembrar las PR. Este es el mecanismo de entrega

de variedades, establecido con el Programa de Variedades de CENGICAÑA y los ingenios.

Las PR se establecen tomando en cuenta el tipo de maduración (hábito de floración) de las variedades y los diferentes estratos altitudinales definidos. Por lo anterior, las PR se conforman con grupos específicos de variedades floreadoras para los estratos alto/medio y bajo/litoral, y de la misma manera se conforman para las variedades no-floreadoras. En resumen, las PR para variedades floreadoras y las no-floreadoras resultan en cuatro tipos de ensayos, que se evalúan en varias localidades de los ingenios en los cuatro estratos altitudinales, con el objetivo de identificar variedades que se adapten en uno o más de estos ambientes.

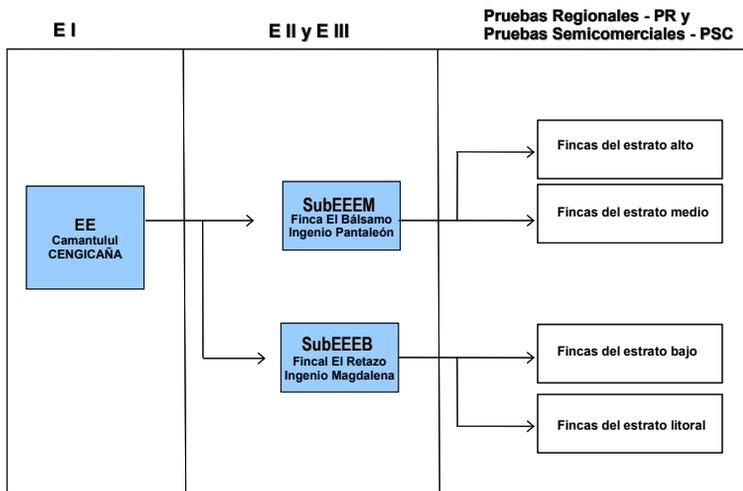


Figura 2. Programa de selección para cuatro estratos altitudinales de la zona cañera en Guatemala. CENGICAÑA 2011

En las pruebas regionales se obtiene información de tres ciclos de cultivo, que incluye la plantía y las primeras dos socas. Las características de producción y aspectos agronómicos que se toman en cuenta dentro del criterio de selección son: emergencia en plantía y rebrote en socas, cierre natural (capacidad de la variedad a los 90-120 días para desarrollar hojas que cierren el espacio entre los surcos de siembra), aspecto de planta, plagas y enfermedades de importancia comercial, incidencia de floración, incidencia de corcho, concentración de sacarosa (expresado en Pol%-caña), rendimiento de caña, rendimiento de azúcar, y otras observaciones de interés que puedan apoyar en la discriminación de las variedades bajo evaluación.

La información obtenida de la cadena de ensayos de las PR se analiza estadísticamente por localidad y a través de localidades, para luego hacer inferencias de la respuesta de adaptación de las variedades a condiciones ambientales muy específicas y/o de amplia adaptación. Con base en el análisis e inferencias realizadas por el Programa de Variedades de CENGICAÑA, los miembros del Comité de Variedades (ente conformado por representantes de investigación de los ingenios y de CENGICAÑA) decide qué variedades serán evaluadas en áreas más extensivas en el estado V o pruebas semicomerciales, así como las localidades de evaluación de interés de los ingenios, dependiendo esto de las diferentes condiciones ambientales en que se desarrollen las plantaciones comerciales.

Algunos de los cambios que se han implementado para la mejora del estado IV se reportaron recientemente (Orozco, *et al.*, 2007). Los cambios han sido: a) el aumento de variedades a evaluar por ensayo, b) la evaluación por separado de variedades floreadoras y variedades no floreadoras y c) utilización de la herramienta estadística SREG (Sites Regression o regresión por sitios) para la selección de variedades de caña de azúcar para ambientes específicos y/o variedades de amplia adaptación, (Quemé *et al.*, 2006).

Pruebas semicomerciales (PSC): Constituye el estado V de selección, y esta prueba se concibe como la fase de validación entre los estados de selección y el uso comercial de las nuevas variedades por parte de los ingenios asociados a CENGICAÑA; es decir que las PSC permiten seleccionar las variedades propuestas para uso comercial. Este estado V de selección se estableció por primera vez con la Primera PSC de variedades intermedias-tardías en la zafra 2003-2004. Las características importantes de este estado de selección son el diseño experimental (bloques completos al azar) y el tamaño de la unidad experimental.

Las variedades que se incluyen en la evaluación de las PSC son seleccionadas a partir de la información obtenida de las pruebas regionales (PR), la cual es analizada e interpretada con el criterio tanto por parte del equipo de CENGICAÑA como por los propios ingenios que condujeron las PR. Tal como se mencionó anteriormente para las PR, para conformar las diferentes PSC se mantiene el mismo criterio de agrupamiento de las variedades, dependiendo de su tipo de maduración natural (hábito de floración) y de su adaptación a los cuatro estratos altitudinales que se han considerado dentro del proceso de selección (Figura 2). Los ensayos que integran las PSC son conducidos básicamente bajo la responsabilidad de personal técnico de investigación de los ingenios, con el apoyo del personal de investigación del Programa de Variedades de CENGICAÑA.

En las PSC regularmente se evalúan entre tres y cinco variedades promisorias más dos testigos comerciales de referencia, los cuales son la CP72-2086, CP88-1165, u otra variedad comercial que sugieran los ingenios. Se utiliza un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones, con una parcela experimental de seis surcos, distanciados según la usanza comercial de la localidad, generalmente de 1.5 m, y de aproximadamente 250 m de largo, separadas cada parcela por un surco libre (sin siembra de caña).

Al igual que se hace en las pruebas regionales, la semilla que se usa para las pruebas semicomerciales se obtiene de semilleros del estado IV-incremento. Estos se siembran bajo la responsabilidad del personal de cada uno de los ingenios que evalúa PR, y con el apoyo del personal del Programa de Variedades de CENGICAÑA. Estos semilleros son conducidos paralelamente a los ciclos de cultivo primera y segunda soca de las PR. Por lo regular de estos semilleros se proyecta producir 1000 paquetes (30 esquejes de 60 cm de largo por paquete) de semilla de cada variedad que es el estimado requerido para establecer las PSC. Para establecer estos semilleros deben definirse claramente las fechas de siembra propuestas para las PSC, para que la cosecha de los semilleros produzca semilla fresca y de buena calidad fisiológica que coincida con la fecha de siembra adecuada de las PSC. Las variedades que finalmente se cosechan del semillero del estado IV-incremento son aquellas que se seleccionan con la información conjunta, obtenida del ciclo de plantía y primera soca de las PR, y son las que conforman las PSC.

La información de las características que se obtienen de las PSC y que se utilizan con fines de selección e identificación de las variedades superiores es: germinación/emergencia en plantía, rebrote en socas, cierre natural, aspecto de planta (cantidad y calidad de tallos molederos), incidencia de plagas importantes, incidencia de floración, incidencia de corcho, contenido aparente de sacarosa, rendimiento de caña, rendimiento de azúcar y otras observaciones de interés de las variedades. Al igual que para las PR, para estandarizar la toma de la lectura en el campo y/o laboratorio de todas estas características experimentales, se tiene establecido cada procedimiento en protocolos específicos. Con la información que se obtiene de las PSC, el personal del Programa de Variedades de CENGICAÑA conjuntamente con el personal del Comité de Variedades, pueden tomar decisiones en cuanto a aquellas variedades que pudieran ser alternativas para ser liberadas formalmente para su uso comercial.

Variedades liberadas

Las primeras variedades fueron liberadas oficialmente por el Programa de Variedades de CENGICAÑA en el 2006 (Orozco *et al.*, 2006). Las variedades

liberadas fueron PR75-2002 y CG96-59. El criterio para liberarlas fue que el rendimiento de azúcar por hectárea fuera superior al de la variedad testigo CP72-2086 con base en tres cortes en la evaluación de la primera prueba semicomercial, resistencia a las principales enfermedades y características adecuadas de manejo. Actualmente la PR75-2002 es de uso comercial en el tercer tercio de la zafra en los estratos alto, medio y bajo, en un total de 3,147 hectáreas.

De la segunda prueba semicomercial se liberaron las variedades CG96-01, CG96-78, CG96-135, CG97-97 y CG97-100 (Orozco *et al.*, 2008). A excepción de la variedad CG96-01, el resto de variedades es de maduración tardía. Los criterios de liberación son los mismos que para la primera prueba semicomercial. De las variedades anteriores la variedad CG96-135 está actualmente ocupando un área de 2,627 ha en los estratos altitudinales alto, medio y bajo.

Las variedades liberadas en el año 2011 fueron las variedades que completaron las respectivas evaluaciones en plantía, primera y segunda soca en la tercera prueba semicomercial – 3PSC. En este caso, la 3PSC consistió en variedades de maduración temprana y de maduración tardía. Del primer grupo se liberó la variedad CG98-46, PR87-2015 y LM2002, mientras que del grupo de las variedades tardías se liberaron las variedades CG98-10, RB73-2577, SP71-6180 y SP79-1287. De los grupos anteriores la variedad CG98-10 es la que más se está cultivando comercialmente al 2011, con 2,302 hectáreas en todos los estratos altitudinales de producción.

Las variedades PGM89-968, CP88-1508, NA56-42 y Mex69-290 no fueron liberadas en un proceso normal de liberación en el Programa de Variedades de CENGICAÑA; sin embargo, actualmente son usadas comercialmente con 4,054, 1,826 y 1,072 ha, respectivamente (Orozco y Buc, 2010).

Interacción genotipo por ambiente

Los ensayos de rendimiento en multi-ambientes (MET, por sus siglas en inglés) son una serie de experimentos, en el cual n genotipos (G) son evaluados en n ambientes (E, sigla en inglés), considerando usualmente a los ambientes como una combinación de sitios y años. Estos ensayos son importantes por la presencia de la interacción genotipo x ambiente (GE), el cual complica la selección y/o recomendación de variedades, puesto que si no existiera la interacción GE, un solo ambiente de prueba sería suficiente para la evaluación de las variedades. Por consiguiente, el entendimiento de la interacción GE observada en MET es muy útil en los programas de fitomejoramiento, puesto que permite identificar variedades de alto rendimiento con adaptación específica y amplia (Annicchiarico 1997; Gauch, 1992; Smith *et al.*, 2001; Yan y Hunt, 2002).

La interacción GE, de especial interés para los programas de fitomejoramiento, es aquella que se refiere al cambio en el orden de las variedades al pasar de un ambiente a otro (interacción cruzada), de modo que la mejor variedad en un ambiente es posible que no sea la mejor en otro ambiente (Kang, 2002; Crossa y Cornelius, 2002). Varias metodologías estadísticas han sido desarrolladas para el análisis de la interacción GE, siendo una de ellas GGE biplot. Fitomejoradores y agrónomos recientemente han utilizado la nueva metodología para el análisis de datos provenientes de ensayos establecidos en varios ambientes.

Análisis GGE Biplot: GGE representa el efecto principal del genotipo más la interacción genotipo por ambiente (G+GE). El G y la interacción GE son dos fuentes de variación del modelo de Regresión de Sitios (SREG). GGE biplot, proveniente del modelo SREG, se basa en el análisis de componentes principales (ACP) y un gráfico formado con las puntuaciones de los genotipos y los ambientes del primer componente principal (puntuaciones del CP1) en contra de sus respectivas puntuaciones del segundo componente principal (puntuaciones del CP2). El GGE biplot exhibe las dos fuentes de variación G y GE, por lo tanto, GGE biplot proporciona una herramienta gráfica, para la evaluación de las variedades (rendimiento promedio y estabilidad), análisis de mega-ambientes (“quien-gana-donde”), identificación de ambientes de prueba (que discrimine entre genotipos y que sea representativo del mega-ambiente) y otros; (Burgueño *et al.*, 2009; Crossa *et al.*, 2002; Ding *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2007).

El GGE biplot del modelo SREG puede ser construido de acuerdo al manual SAS disponible en la página web del CIMMYT en la Unidad de Biometría y Estadística (BSU, siglas en inglés), o en <http://www.cimmyt.org/english/wps/biometrics/> (Burgueño *et al.*, 2009).

El Programa de Variedades de CENGICANA ha utilizado este análisis para evaluar el rendimiento de caña en variedades de caña de azúcar, a través de localidades y cortes, con el fin de identificar variedades de alto rendimiento con adaptación amplia y específica. Por ejemplo, se tiene un estudio con 14 variedades de caña de azúcar, las cuales fueron evaluadas en nueve ambientes de la zona cañera de Guatemala (Quemé *et al.*, 2009). Los nueve ambientes se refieren a la combinación de localidades y cortes (años), ya que las variedades fueron evaluadas en tres localidades: San Bonifacio (280 msnm), Margaritas (116 msnm) y Tululá (220 msnm); y en tres cortes: plantía (zafra, 2004-05), primera soca (2005-06) y segunda

socas (2006-07). De las 14 variedades, 12 son de CENGICAÑA-Guatemala (CG y CGSP) y dos testigos provenientes de Canal Point (CP) y Puerto Rico (PR). Para cada ensayo se utilizó el diseño de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones y con unidades experimentales de 75 m². Se registró la variable rendimiento de caña expresado como toneladas de caña por hectárea (TCH).

De acuerdo con el GGE biplot (Figura 3), los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) fueron altamente significativos ($P < 0.01$) y explicaron el 73 por ciento de GGE (CP1=61% y CP2=12%). La variedad 13 (PR75-2002) presentó un rendimiento promedio alto (puntuación CP1 grande) y con adaptación amplia o estable (puntuación CP2 cercana a cero). Dos grupos de ambientes fueron definidos, el primero, compuesto por siete ambientes (Margaritas y Tululá con sus tres cortes y San Bonifacio en plantía); y el segundo sector por dos ambientes (San Bonifacio-primera y segunda soca). Las variedades ganadoras con el mayor TCH fueron: la cinco (CG00-120) y la ocho (CG00-092) para cada uno de los ambientes, respectivamente.

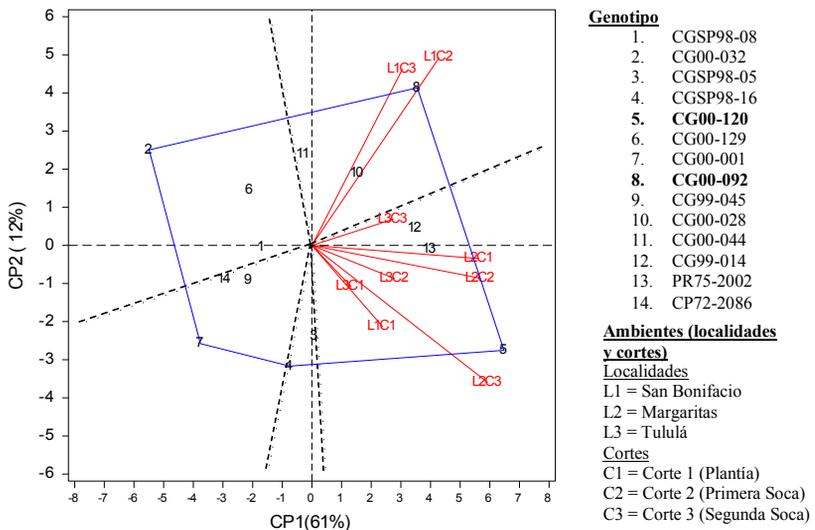


Figura 3. GGE biplot de 14 variedades de caña de azúcar en nueve ambientes

PROMOCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LAS VARIEDADES NUEVAS

Directorio varietal

Para facilitar la adopción de variedades nuevas de caña de azúcar en la Agroindustria Azucarera Guatemalteca se cuenta con un directorio varietal como herramienta para la toma de decisiones. El Cuadro 4 muestra el directorio de variedades, el cual está conformado por las variedades comerciales presentes y las variedades nuevas, actualmente en desarrollo comercial. A la fecha, en la Agroindustria se están considerando variedades nuevas obtenidas en las primeras cuatro pruebas semicomerciales. En la tercera prueba semicomercial cuya evaluación concluyó en la segunda soca durante la zafra 2010-2011, destacan las variedades CG98-46 como temprana para los estratos medio y bajo y las variedades CG98-10, RB73-2577 y SP71-6180 de maduración tardía para los estratos bajo y litoral. En la cuarta prueba semicomercial destacan las variedades CG98-78 y CG00-102 como tempranas y la Mex79-431 como una variedad tardía.

Cuadro 4. Directorio varietal de la Agroindustria Azucarera de Guatemala a julio de 2011

Estratos/ Altitud (msnm)	Mes ideal de cosecha					
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Alto/ 300	CP88-1165	CP88-1165	Q107	Q107	CG98-10	CG98-10
	CP73-1547	SP79-2233	SP79-2233	SP79-2233	Q107	Q107
			CG96-135	CG96-135	CG96-135	CG96-135
			PR75-2002	PR75-2002	PR75-2002	PR75-2002
					CG03-025	CG03-025
				CP97-1931	CP97-1931	
Medio/ 100-300	CP73-1547	CP73-1547	CP88-1165	CP88-1165	CP72-2086	CG98-10
	CP88-1165	CP88-1165	CP72-2086	CP72-2086	CG98-10	Mex69-290
	CG98-46	CG98-46	CG98-46	Mex79-431	Mex69-290	RB73-2577
	CG98-78	CG98-78	CG98-78	CG98-78	RB73-2577	CG03-025
		Mex79-431	Mex79-431		CG03-025	CP97-1931
				CP97-1931		

Estratos/ Altitud (msnm)	Mes ideal de cosecha					
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Bajo/ 40-100	CP73-1547	CP73-1547	CP72-2086	CP72-2086	CG98-10	CG98-10
	CP88-1165	CP88-1165	CP88-1165	CP88-1165	CP72-2086	Mex79-431
	CG98-46	CG98-46	CG98-46	Mex79-431	RB73-2577	RB73-2577
	CG98-78	CG98-78	CG98-78	CG98-78	Mex79-431	CG03-240
	CG00-102	CG00-102	CG00-102		CG03-240	
Litoral/ 0-40	CP73-1547	CP73-1547	CP72-2086	CP72-2086	CG98-10	CG98-10
	CP88-1165	CP88-1165	CP88-1165	CP88-1165	CP72-2086	CP72-2086
	CG98-46	CG98-46	CG98-46	Mex79-431	RB73-2577	RB73-2577
	CG00-102	CG00-102	CG00-102		Mex79-431	Mex79-431
					CG03-240	CG03-240

msnm = metros sobre el nivel del mar.

Metodología para facilitar la adopción de variedades nuevas

La metodología para facilitar la adopción de variedades nuevas en la Agroindustria Azucarera Guatemalteca, actualmente, está en fase de inicio y consiste en dos etapas: a) planificación de la composición varietal a corto y mediano plazo por ingenio, b) seguimiento del desempeño de las variedades nuevas e intercambio de la información relacionada con los usuarios finales de la tecnología.

En el proceso de planeamiento es importante considerar la disponibilidad de semilla de la variedad nueva en cada una de las empresas. Por lo anterior, se ha considerado el inicio de los procesos de multiplicación de semilla paralelamente a las evaluaciones en el programa de selección. Dentro de este contexto es importante considerar dos aspectos: a) identificación del estado de selección que marca el inicio de esta propagación, b) aplicación de métodos de propagación acelerada.

El estado de selección idóneo para la propagación de una variedad nueva para el desarrollo comercial es la PSC, basado en los datos de productividad de azúcar, características agronómicas y resistencia a enfermedades de la plantía. Para la propagación es necesario considerar la fuente de la semilla, la cual puede estar ubicada en: a) semilla en lote asignado, b) sección de surco de una repetición del ensayo. En cualquiera de los casos, el método acelerado de propagación

puede ser por vía esquejes de dos yemas (microtoletes) o por cultivo de tejidos. Ambos métodos son adecuados y la diferencia entre ellos será la tasa de multiplicación de la semilla y, por ende, en el tiempo de obtención de resultados. A continuación se muestra cómo se puede propagar una variedad con una cantidad limitada de semilla (Figura 4).

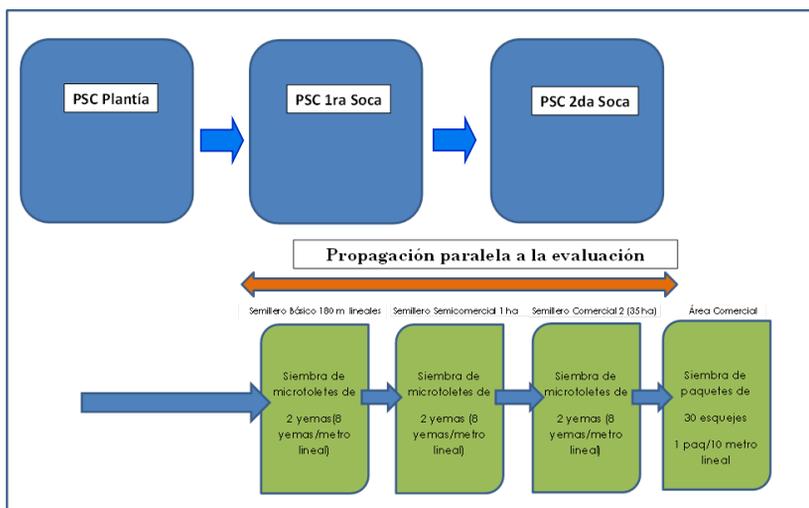


Figura 4. Ejemplo de la propagación acelerada de una variedad promisorio en un ingenio en un área total de 16,000 hectáreas

BIBLIOGRAFÍA

1. Allard, R. 1980. Principios de la mejora genética de las plantas. Barcelona, Omega. 498 p.
2. Annicchiarico, P. 1997. Additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis of genotype-location interaction in variety trials repeated over years. *Theor. Appl., Genet.*94: 1072–1077.
3. Babu, C.; Koodalingam, K.; Natarajan, US; Shanthi, R.M.; Thangasamy. 2006. Cytological studies on sugarcane intergenérico hybrids. Second National Plant Breeding Congress. India. Plant Breeding in Post Genomics Era. Proceedings 206-209.

4. BSES. 2007. Importing smut resistant varieties. Australia 10-11 p.
5. Burgueño, J.; Crossa, J.; Vargas, M. SAS programs for graphing ge and gge biplots. Biometrics and Statistics Unit. CIMMYT. México. 16 Mar. 2009. <http://www.cimmyt.org/english/wps/biometrics/>
6. Butterfield, M.K.; D'Hont, A. 2001. The sugarcane genome: A synthesis of current understanding, and lessons for breeding and biotechnology. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 75: 1-5.
7. Castro, O. 2010. La variabilidad de la radiación solar en la superficie terrestre y sus efectos en la producción de caña de azúcar en Guatemala. En: Memoria. Presentación de Resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 281-287.
8. CENGICAÑA. 1999. Área de Fitomejoramiento. Resultados 1998-1999. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1998-1999. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 6-26.
9. CENICAÑA. 2004. Política de manejo de las variedades obtenidas por CENICAÑA. Carta Trimestral (Cali Colombia) 26(4):28-31.
10. Cox M.; Hogarth, M.; Smith, G. 2000. Cane breeding and improvement. *In* Hogarth, D. M. and Allsop, P. G. ed. *Manual of Canegrowing*, Brisbane, 91-108.
11. Crossa, J.; Cornelius, P.L. 2002. Linear-bilinear model for the analysis of genotype environment interaction. *In*: Kang, M.S. ed. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CABI Publishing. pp. 305–321.
12. Crossa, J.; Cornelius, P.L.; Yan, W. 2002. Biplot of linear-bilinear models for studying crossover genotype x environment interaction. *Crop Sci.*, 42: 619–633.
13. D'Hont A.; Ison, D.; Alix, K. ; Roux, C. ; Glaszmann, J.C. 1998. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. *Genome*, 41: 221-225.
14. Da Silva, J.; Sorrells, M.; Burnquist, W.; Tanksley, D.; 1993. RFLP linkage map and genome analysis of *Saccharum spontaneum*. *Genome*. 36: 782-791.

15. Ding, M.; Tier, B.; Yan, W. Application of GGE biplot analysis to evaluate Genotype (G), Environment (E) and GxE interaction on *P. radiata*: a case study. 05 Jul. 2009. [http://www.cdesign.com.au/proceedings_afgc2007/papers%20\(pdf\)/thurs%20ding.pdf](http://www.cdesign.com.au/proceedings_afgc2007/papers%20(pdf)/thurs%20ding.pdf)
16. Edmé, S.; Cmostock, J.C.; Millar, J.D.; Tai, P.Y. 2005. Determination of DNA content and genome size in sugarcane. *Journal American Society Sugar Cane Technologists* 25:1-16.
17. Gauch, H.G. 1992. *Statistical Analysis of Regional Yield Trials: AMMI Analysis of Factorial Designs*. Amsterdam, Elsevier.
18. Grivet, L.; D'Hont, A.; Dufour, P.; Hamon, P.; Roques, D.; Glaszmann, J.C. 1994. Comparative genome mapping of sugar cane with other species within the Andropogonae tribe. *Heredity* 73: 500-508.
19. Grivet, L.; Daniels, C.; Glaszmann J.C.; D'Hont, A. 2004. review of recent molecular genetics evidence for sugarcane evolution and domestication. *Ethnobotany Research & Applications* 2: 9-17.
20. INICA. 2003. Programa de fitomejoramiento. Impacto en la producción azucarera cubana. Editores: H.J. Suárez, J. Gómez y S. Segre. Cuba.
21. Kang, M.S. 2002. Genotype-environment interaction: progress and prospects. *In*: Kang, M.S. ed. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CABI Publishing, 221–243.
22. Le Cunff, L.; Garsmeur, O.; Raboin, L.M.; Pauquet, J.; Telismar, H.; Aselvi, A.; Grivet, L.; Philippe R.; Begum, D.; Deu, M.; Costst, L.; Wing, R.; Glaszmann, J.C.; D'Hont, A. 2008. Diploid/Poliploid sintenic shuttle mapping and haplotype-specific chromosome walking toward a rust resistance Gene (Bru 1) in highly polyploidy sugarcane (2n~ 12x ~115). *Genetics* 180: 649-660.
23. León, F.; Rodríguez, J.; Azurdia, C.; Amador, D.; Quemé, J.; Melgar, M. 2001. Use RAPD markers to detect genetic variability among 39 sugarcane varieties. *Proc. Int. Sugar Cane Technol.* 24:634-636.
24. Márquez, S. F. 1988. *Genotecnia Vegetal*. AGT Editor, S. A. México D. F.
25. Mauritius Sugar Industry Research Institute MSIRI. 2006. Sugarcane Breeding and Physiology. ANNUAL REPORT 2006. Mauricio 2006. Pag. 7.

26. Miller, J. D. 1994. The philosophy of the Canal Point breeding program: Major issues in the establishment of new breeding programs. *Sugar Journal* 5(57) 13-15.
27. Ming, R.; Moore, P.; H., Wu, K. K.; D'Hont, A.; Glaszmann, J. C.; Tew, T. L.; Mirkov, T. E.; da Silva, J.; Jifon, J.; Rai, M.; Schnell, R. J.; Brumbley, S. M.; Lakshmanan, P.; Comstock, J. C.; Paterson, A. H. 2006. Sugarcane improvement through breeding and biotechnology. *Plant Breeding Reviews* 27:15-118.
28. Orozco, H. 2005. How is the sugarcane variety development program facing its challenge. En: XXV *International Society of Sugarcane Technologists Congress*. Pre-Congress Tour Papers. Guatemala, CENGICAÑA. 12 p.
29. Orozco, H.; Quemé, J.; Ovalle, W.; Castro, O.; Catalán, M.; Linares, E. 2006. Primera Prueba semicomercial de variedades promisorias de caña de azúcar tres cortes. En Memoria. Presentación resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 8-25.
30. Orozco, H.; Ovalle, W.; Juárez, J. 2004. Germoplasma de caña de azúcar introducido al programa de variedades de CENGICAÑA de 1992 al año 2004. Guatemala, CENGICAÑA. 48 p.
31. Orozco, H.; Buc, R. 2010. Censo de variedades de caña de azúcar en Guatemala zafra 2010-11. En Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-10. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 21-30.
32. Orozco, H.; Quemé, J.; Ovalle, W.; Maldonado, A. 2007. Mejoras en el programa de variedades de CENGICAÑA. En Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2006-07. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 55-62.
33. Orozco, H., Quemé, J.; Ovalle, W.; Maldonado A.; De Cano, W. 2008. Reporte de Progreso del programa de variedades de CENGICAÑA. Guatemala, CENGICAÑA. 46p.
34. Orozco, H.; Quemé, J.; Ovalle, W.; Castro, O.; Catalán, M.; De Cano, W. 2008. Segunda Prueba semicomerciales de variedades promisorias de caña de azúcar en plantía, primera y segunda soca. En Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2007-2008. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 18-28.

35. Orozco, H; Castro O.; Buc R.; Quemé J.; Castro, O.; Ralda, G.; López A.; Acán J.; Solares, E.; Balañá P.; Natareno, E.; Rosales, R.; Rosales, E. 2010. Comportamiento de la floración de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) y su efecto en la productividad de azúcar en la zona media de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 66-76.
36. Ovalle, W. 1997. Manual de identificación de enfermedades de la caña de azúcar. Guatemala, CENGICAÑA. 83 p.
37. Pérez, O. 2002. Grupos de manejo de suelos de la zona cañera de Guatemala. En: Informe anual 2001-2002. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 37-39.
38. Piperidis, N.; Chen, J.; Deng, H.; Wang, L.; Jackson P.; Piperidis, G. 2009. GISH characterization of *Erianthus arundinaceus* chromosomes in three generations of sugarcane in intergenérico hybrids. *Genome* 53:331-336.
39. Purseglove, J. 1972. Sugarcane. *In* Tropical Crops Monocotyledons. Longman Group. P 214-256.
40. Quemé, J.; Orozco, H.; Ovalle, W.; Linares, E. 2001. Planificación de cruzamientos y producción de semilla sexual en la zafra 2000-2001. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2000-2001. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 21-28.
41. Quemé, J.; Molina, L.; Melgar, M. 2005 Analysis of genetic similarity among 48 sugarcane varieties using microsatellite DNA sequences. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 25:592-596.
42. Quemé, J.; Orozco, H.; Melgar, M. 2006. Análisis gráfico de la respuesta de variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp) a través de ambientes. En Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 91-94.
43. Quemé, J.; Orozco, H.; Ovalle, W.; Catalán, M. 2010. Selección de variedades de caña de azúcar CG 08 en el Estado II de selección. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 92-100.
44. Satpute, S.; Suprassana, Patade, V.; Kulkarni, U.; Vapat, V. 2009. Molecular diversity in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) clones as revealed by different molecular marker. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 41(1):41-52.

45. Singh, R. K.; Mizar, S. K.; Singh, S. P.; Mishra, N.; Sharma, M. L. 2010. Evaluation of microsatellite markers for genetic diversity analysis among sugarcane species and commercial hybrids. *Australian Journal of Crop Science*. 4(2):116-125.
46. Smith, A.; Cullis, B.; Thompson, R. 2001. Analyzing variety by environment data using multiplicative mixed models and adjustments for spatial field trend. *Biometrics* 57, 1138-1147.
47. Soeprijanto; Sukarso, G. 1989. Emasculation of sugarcane (*Saccharum spp*) tassels using alcohol immersion. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 860-864.
48. Soto, G.; Orozco, H. 1998. Resultados sobre el desarrollo de variedades apropiadas para la Agroindustria Azucarera Guatemalteca. Noviembre de 1997 a julio de 1998. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1997-98. Guatemala, CENGICANÑA. pp. 8-12.
49. South African Sugar Association, (SA). Experiment Station. Plant Breeding Crossing & Selection Programmes. South Africa. 12 p.
50. Sreenivasan, T.V.; Ahloowalia, B.S.; Heinz, D. 1987. Cytogenetics. *In* Sugarcane improvement through breeding. Ed. Heinz. Elsevier Science. p 211-253.
51. Suárez, A., Meneses, A., Melgar, M. 2007. Evolución de la producción y productividad de la agroindustria azucarera y mapas generales de la zona cañera de la costa sur de la república de Guatemala. Guatemala, CENGICANÑA. 20 p.
52. Viveros, C.; Cassalet, C.; Amaya, A.; Victoria, J. 2009. A tool for Programming crosses for sugarcane improvement in CENGICANÑA. ISSCT 9th. Sugarcane Breeding and Germplasm Workshop.
53. Yan, W.; Hunt, L.A. 2002. Biplot analysis of multi-environment trial data. En: Kang, M.S. ed. *Quantitative Genetics, Genomics and Plant Breeding*. CABI Publishing, 289–303.
54. Yan, W.; Cornelius, P. L.; Crossa, J.; Hunt, L. A. 2001. Two types of GGE biplots for analyzing multi-environment trial data. *Crop Sci.*, 41: 656–663
55. Yan, W.; Kang, M. S.; Ma, B.; Woods, S.; Cornelius, P. L. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.*, 47: 643–655.

IV. BIOTECNOLOGÍA APLICADA AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

BIOTECNOLOGÍA APLICADA AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Luis Molina y Mario Melgar*

INTRODUCCIÓN

Existen varias definiciones de biotecnología, pero, según el Convenio para la Diversidad Biológica, es “toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos” (ONU, 1992)

De acuerdo con esta definición, la fermentación alcohólica es una biotecnología, pues utiliza al hongo microscópico *Saccharomyces cerevisiae* para la elaboración del producto: vino, cerveza o pan. También lo es la fermentación láctica que utiliza bacterias del género *Lactobacillus* para la producción de yogur y la fermentación acética producida por bacterias del género *Acetobacter* para la obtención de vinagre. El control biológico de plagas mediante *Metarhizium anisopliae*, *Cotesia flavipes* o *Beauveria bassiana*, el uso de microorganismos para acelerar la descomposición de residuos. De ahí, la bioremediación, las fermentaciones cárnicas y otras fermentaciones específicas también se consideran biotecnología.

Si bien, la fermentación alcohólica y el control biológico de plagas son biotecnologías utilizadas por la Agroindustria Azucarera de Guatemala, estas se describen y analizan en diferentes capítulos del presente libro. En esta sección solamente se tratarán aquellas tecnologías que se incluyen en la denominada biotecnología moderna, y que se enmarcan en tres grupos:

- Cultivo de tejidos o células
- Marcadores moleculares
- Ingeniería genética

La biotecnología moderna tiene aplicaciones en diversos sectores de la producción de bienes y servicios como la medicina, la industria, el medio ambiente, la energía y la agricultura, entre otros. En este capítulo haremos un enfoque sobre las aplicaciones en agricultura y más específicamente en el cultivo de caña de azúcar, primero, revisando sus antecedentes históricos a nivel mundial, y luego describiendo las aplicaciones que se realizan en Guatemala.

* Luis Molina es Ing. Agr., M.Sc., Biotecnólogo, y Mario Melgar es Ing. Agr., Ph.D., Director General de CENGICANA. www.cengicana.org

ANTECEDENTES DEL DESARROLLO BIOTECNOLÓGICO EN CAÑA DE AZÚCAR

Cultivo de tejidos o células

La visión, el establecimiento del propósito y el potencial del cultivo de células y tejidos aislados se atribuyen al botánico alemán Gottlieb Haberlandt en el año 1902; sin embargo, no logró demostrar sus ideas con sus experimentos (Krikorian y Berquam, 1969). El fundamento de la técnica reside en el concepto de la totipotencia celular, es decir, la capacidad que tiene una célula para dividirse y formar una planta completa. Philip Rodney White, en los Estados Unidos, Roger Gautheret y Pierre Nobécourt, en Francia, durante la década de 1930, fueron los primeros que lograron el crecimiento de tejidos vegetales en cultivo, por períodos indefinidos de tiempo, (Vasil, 2008).

El continuo crecimiento y división de células, que no se diferencian en ningún órgano o tejido específico, forma masas celulares a las que se les denomina callo. Heinz y Mee (1969) fueron los primeros en regenerar plantas a partir del callo en caña de azúcar. El callo se indujo en tejido de parénquima de brotes apicales, hojas e inflorescencias, usando un medio mineral base, al cual agregaron agua de coco (10 %) y 2,4-D. La regeneración se obtuvo al transferir el tejido de callo a un medio sin 2,4-D.

A partir de diversos explantes, considerando un explante como cualquier parte de la planta, las plantas de caña de azúcar pueden regenerarse de forma directa o indirecta. La forma indirecta implica la formación inicial del callo y la posterior regeneración de plantas.

Se ha reportado la regeneración directa a partir de segmentos de hojas jóvenes y regeneración indirecta a partir de callo proveniente de semillas germinadas, de primordios foliares y de meristemas apicales.

Gill *et al.*, (2006) reportaron la regeneración directa de brotes a partir de segmentos (1.0–1.5 cm) de hojas jóvenes de las variedades CoJ64, CoJ83 y CoJ86. Los explantes fueron inoculados en un medio basado en las sales de Murashige y Skoog (1962). La mayor frecuencia de regeneración de brotes ocurrió en un medio suplementado con ácido naftalenacético (5.0 mg L⁻¹) y kinetina (0.5 mg L⁻¹) en la variedad CoJ83.

La regeneración de plantas de caña de azúcar puede ocurrir a través de organogénesis, como el caso que se cita en el párrafo anterior, o a través de embriogénesis somática. Ho y Vasil (1983) indujeron la formación de callo embriogénico en segmentos de hojas jóvenes de caña de azúcar cultivadas en un

medio de Murashige y Skoog (MS) con 0.5 – 3.0 mg L⁻¹ de 2,4-D, agua de coco (5 %) y 3–8 por ciento de sacarosa. En ese experimento, se observó la formación de embrioides (embriones somáticos) cuando el callo fue transferido a un medio con bajo contenido de 2,4-D (0.25 – 0.5 mg L⁻¹). El callo embriogénico se formó por divisiones en células del mesófilo, situadas principalmente en la mitad abaxial de la hoja y también de células del parénquima vascular. Los embrioides se desarrollaron por divisiones internas en células individuales ricas en citoplasma, localizadas en la periferia del callo embriogénico y mostraron la organización típica de los embriones de gramíneas.

Ahloowalia y Maretzki (1983) también reportaron la regeneración de plantas por medio de embriogénesis somática, trabajando con el clon IJ76-316, e induciendo la formación de callo a partir de primordios foliares y meristemos apicales.

De los factores que influyen en la respuesta al cultivo de tejidos en caña de azúcar se han analizado, entre otros, el genotipo, la luz y el tipo de regulador del crecimiento. García *et al.* (2007) evaluaron los patrones de morfogénesis *in vitro* de caña de azúcar, determinados por la luz y el tipo de regulador del crecimiento. Por otra parte, Gallo-Meagher *et al.* (2000) evaluaron el efecto del thidiazuron en la regeneración de brotes, a partir de callo embriogénico.

Shiromani *et al.* (2010) evaluaron la respuesta a la formación de callo y regeneración de plantas, en 16 diferentes cultivares australianos de caña de azúcar, utilizando disco de hoja inmadura como explante. Los cultivares Q117, Q135, Q157, Q158, Q185, Q186, Q208 y Q209 mostraron una alta proporción de callo amarillo, compacto y embriogénico, aproximadamente 35 – 40 g por disco de tejido inicial, luego de seis semanas. La capacidad de regeneración de plantas se vio afectada por varios factores: el genotipo, la concentración de 2,4-D en la etapa de formación de callo y la intensidad lumínica.

En algunos casos, el cultivo de tejidos ha sido utilizado para generar variabilidad genética mediante la inducción de mutaciones, que ocurren como consecuencia de errores en la replicación del ADN, debido al proceso de multiplicación acelerada bajo condiciones *in vitro*. Esta variabilidad se conoce como variación somaclonal.

La variación somaclonal, asociada al cultivo de tejidos, no ha sido un factor importante en la caña de azúcar. Lourens y Martin (1987), Burner y Grisham (1995) e Irvine *et al.* (1991), citados por Lakshmanan *et al.* (2005), mostraron que las variaciones en la caña de azúcar proveniente de cultivo de tejidos fueron, con frecuencia, temporales puesto que la mayoría de las variantes

revertían al fenotipo original en el primer rebrote. No obstante, existen reportes de variantes somaclonales estables. Oropeza *et al.* (1995) reportan la obtención de dos variantes somaclonales AT626 y BT627, los cuales se mostraron resistentes al mosaico de la caña de azúcar (SCMV) durante siete años en pruebas de campo. Estos materiales fueron obtenidos por embriogénesis somática a partir del cultivar PR62-258 al aumentar el número de subcultivos en un medio MS con 3 mg/l de 2,4-D.

Tawar *et al.* (2008) reportan una nueva variedad liberada en India, Co 94012, producida mediante el uso de variación somaclonal en la variedad CoC 671 al igual que la variedad VSI 434 de alta precocidad, las cuales no pudieron diferenciar fehacientemente mediante análisis con RAPDs. Por tanto, concluyeron que las plantas de los somaclones VSI 434 y Co 94012 producidas *in vitro* mostraron alta fidelidad genética entre ellas, y que entre 333 loci analizados a través de RAPDs solo algunas bandas débiles fueron polimórficas, con una tasa menor de 0.33 por ciento de polimorfismo que pudo ser preexistente o atribuible a mutaciones puntuales.

Otra aplicación del cultivo de tejidos en la caña de azúcar es la recuperación de plantas libres de enfermedades. Leu, 1978 obtuvo plantas sanas a partir de plantas que mostraban síntomas de mosaico, raquitismo y amarillamiento, a través del cultivo de meristemos apicales y rediferenciación de callo.

Parmessur *et al.* (2002) reportaron la regeneración de plantas de caña de azúcar, libres del virus del amarillamiento (SCYLV) y del fitoplasma del amarillamiento (SCYP), utilizando discos foliares como explantes para la formación del callo.

La conservación de germoplasma es otra área en la que el cultivo de tejidos de caña de azúcar tiene aplicación. Taylor y Dukic (1993) desarrollaron una metodología para el establecimiento y almacenamiento de más de 200 clones de híbridos de *Saccharum* spp. Para ello utilizaron yemas apicales como explante y medio de cultivo con 6-bencilaminopurina (BAP) y 6-furfurilaminopurina (kinetina), regeneraron múltiples brotes, los cuales fueron transferidos a un medio con bajo contenido de sales y sin reguladores del crecimiento. Luego de 12 meses, a una temperatura de 18°C, las plantas fueron transferidas a otro medio nuevo y retornadas a condiciones de almacenamiento. No se observaron alteraciones en la integridad genética de los clones, con base en una determinación fenotípica.

El cultivo de tejidos es indispensable para desarrollar la transformación genética de plantas, pues la transformación no se realiza en una planta

completa, debido a que esto resultaría en quimerismo, sino en tejidos o células en cultivo, a partir de los cuales se regeneran transformantes sólidos.

Lakshmanan (2006) concluye que, desde que los investigadores hawaianos pioneros en el cultivo de tejidos de caña de azúcar, reportaron la primera regeneración exitosa de plantas, las técnicas de regeneración *in vitro* y micropropagación han avanzado rápidamente y son utilizadas a nivel comercial para la propagación masiva de nuevos cultivares en muchos países con industrias azucareras. Como ejemplos pueden citarse los reportes de Meyer *et al.* (2010) con el sistema Novacane® en Sudáfrica, y Mordocco *et al.* (2009) con el sistema SmartSett® en Australia.

Marcadores moleculares

A manera de ejemplo, se consideran dos fragmentos de ADN a los que se les denominará *A* y *B*, los cuales se localizan uno al lado del otro: *AB*. El fragmento *A* no contiene ninguna información de valor, pero sí se sabe cómo localizarlo en una muestra de individuos; por otro lado, el fragmento *B* contiene una forma génica (alelo) que es de mucho interés, pero se desconoce qué individuos lo portan. Para averiguarlo, se podría plantear como estrategia, buscar el fragmento *A* en la población, porque si *A* está presente también lo estará *B* y viceversa. Lo que se estaría haciendo es utilizar el fragmento *A* como marcador para encontrar al fragmento *B*. Esta es una forma simplificada de comprender el funcionamiento de un marcador, en este caso, molecular. Una metodología empleada para identificar los marcadores que están relacionados entre sí, es el análisis del desequilibrio de ligamiento. Las relaciones encontradas entre los marcadores permiten generar mapas genéticos, también conocidos como mapas de ligamiento.

Roughan *et al.* (1971) reportaron por primera vez el uso de marcadores moleculares en caña de azúcar. Analizando la variación de la isoenzima β -amilasa en *Saccharum officinarum*, *Saccharum spontaneum* y la progenie F_1 originada de su cruzamiento, fueron capaces de diferenciar los genotipos de cada una de las dos especies, así como los de la progenie híbrida y la resultante de autofecundación, aunque no encontraron ninguna correlación entre los marcadores y el contenido de almidón en el tallo de la planta.

Actualmente los marcadores más utilizados son los de ADN. Estos pueden obtenerse por restricción de fragmentos o por amplificación de fragmentos, a través de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

Al Janabi *et al.* (1993) publicaron el primer mapa genético de *Saccharum* para el clon ‘SES 208’ de *Saccharum spontaneum*. Los marcadores fueron generados utilizando polimorfismos de ADN amplificado aleatoriamente (RAPDs por sus siglas en inglés), en una progenie, proveniente del cruzamiento de ‘SES 208’ y una planta doble haploide proveniente de la misma variedad. De todos los marcadores analizados, 176 resultaron simplexos y polimórficos, formando 41 grupos de ligamiento. El análisis de segregación mostró que ‘SES 208’ se comporta como un autopoliploide, es decir, sin apareamiento preferencial en la meiosis.

La cada vez mayor disposición de marcadores moleculares ha dado lugar a que se elaboren varios mapas genéticos de la caña de azúcar, Da Silva *et al.* (1993), utilizando marcadores RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism por sus siglas en inglés), Hoarau *et al.*, (2001) utilizando marcadores AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism), Aitken *et al.* (2005) utilizando AFLP, y SSR (Simple Sequence Repeats). Estos trabajos de mapeo han permitido a la vez, identificar marcadores QTL (Quantitative Trait Loci) posiblemente asociados a características de interés agronómico o industrial. Sin embargo, aún no se reporta su uso como parte de un programa de mejora genética.

En la caña de azúcar, los marcadores moleculares han sido frecuentemente utilizados para estudiar e intentar comprender su estructura genómica. D’Hont *et al.* (1998), mediante un análisis de hibridación *in situ* de dos familias génicas de ARN ribosomal, determinaron que *S. officinarum* tiene un número cromosómico básico de $x=10$, lo que significa que estas plantas son octoploides. También demostraron que *S. spontaneum* tiene un número cromosómico básico de $x=8$ y que la ploidía de esta especie varía entre 5 y 16.

El carácter poliploide de la caña de azúcar hace que en la mayoría de casos, cada característica que se considera, deba ser analizada como poligénica, de tal forma que los marcadores que se identifiquen asociados al fenotipo explicarían sólo una pequeña fracción de la variación observada (QTLs). Esta situación ha limitado el uso de los marcadores moleculares como herramienta en el mejoramiento genético para realizar la selección asistida.

Wu *et al.* (1992) describieron una metodología para identificar marcadores que pudieran estar asociados a una característica de carácter monogénico. Para esto debe realizarse una cruce en la cual se asume que la característica –resistencia a una enfermedad por ejemplo–, se expresa en uno de los progenitores por la presencia de solamente un alelo dominante y los demás recesivos. Siendo este el caso, la producción de sus gametos se realizaría en proporciones $\frac{1}{2}$ *Aaaa* y $\frac{1}{2}$ *aaaa*. En el otro progenitor –fenotípicamente susceptible–, se asume que el

alelo dominante no está presente. De esta manera, su formación de gametos sería toda *aaaa*. Se esperaría que la descendencia de esta cruce sea una población que muestra una media de individuos fenotípicamente resistentes y una media de individuos fenotípicamente susceptibles, si efectivamente la característica está controlada por un alelo dominante.

Otro razonamiento que se incluye en esta metodología establece el cruzamiento de dos individuos de igual fenotipo –resistente por ejemplo–, o su equivalente, una autofecundación. Se asume, igual que en el caso anterior, que la característica está controlada por la presencia de sólo un alelo dominante y los demás recesivos. De ser correcta esta suposición, se esperaría que la progenie muestre $\frac{3}{4}$ de la población resistente y $\frac{1}{4}$ susceptible.

Hasta ahora, solamente ha sido reportado un marcador monogénico asociado a un fenotipo específico, desarrollado por Le Cunff (2008), este es un marcador basado en PCR, que está asociado con un alelo de resistencia a la enfermedad conocida como Roya marrón, causada por el hongo *Puccinia melanocephala*.

El genotipado de variedades, también conocido como *fingerprinting*, es otra de las aplicaciones de los marcadores moleculares que ha mostrado beneficios en caña de azúcar. La generación de marcadores basados en PCR ha facilitado identificar marcadores polimórficos, con los cuales es posible generar patrones genéticos únicos para cada variedad de interés. Esto ha venido a facilitar el proceso de control de calidad en la producción y multiplicación de semilla vegetativa.

El análisis de los patrones moleculares permite, además, establecer el grado de similitud entre las variedades, lo que permite visualizar los niveles de diversidad genética con que se cuenta en las colecciones y en los programas de mejoramiento. Esa información se convierte en una herramienta para la planificación de las hibridaciones.

Las aplicaciones que se realizan con los marcadores moleculares en el cultivo de caña de azúcar han mostrado ser útiles en situaciones particulares, como las mencionadas anteriormente. Sin embargo, aún existe una brecha que no ha sido cubierta, debido a que no se han podido generar marcadores en suficiente número que permita el análisis del genoma completo y el consecuente aprovechamiento de esta información.

El desarrollo del cómputo ha facilitado avances en la genómica estructural y funcional. En caña de azúcar ya se ha comenzado a utilizar la tecnología de “arrays” para identificar marcadores (Heller-Uszynska, *et al.*, 2010). También ha demostrado ser una poderosa herramienta para la identificación de genes

asociados a procesos o características particulares. Carson, *et al.* (2002) demostraron que es posible la identificación de genes, mediante una estrategia que combina hibridación sustractiva y macroarrays de cDNA.

Ingeniería genética

En el proceso de mejoramiento genético, la forma más común de generar variabilidad genética es a través de cruzamientos. Sin embargo, existen limitaciones que restringen los cruzamientos, pudiendo hacerse solamente entre individuos de la misma especie y, en algunos casos, entre individuos de diferente especie o género. Al realizar un cruzamiento sexual, la progenie resultante poseerá la mitad de cromosomas del progenitor masculino y la otra mitad del femenino. La tecnología de ADN recombinante permite insertar uno o pocos genes de un individuo, en el genoma de otro, sin restricciones de especie, género o incluso reino. Esto es posible debido a que la molécula de material genético que rige la estructura y función de un organismo es igual en todos. Esta tecnología ha hecho posible, entre otras cosas, la expresión en bacterias, plantas y animales, de proteínas con fines farmacéuticos e industriales, así como la transformación de plantas con características como tolerancia a herbicidas y resistencia a virus e insectos.

La caña de azúcar ha sido transformada exitosamente por medio de varias técnicas, como el bombardeo con microproyectiles, la electroporación y *Agrobacterium*. Se han introducido varias características, incluidas la resistencia a herbicidas, resistencia a virus, resistencia a insectos y regulación enzimática de la sacarosa. Las nuevas características que se han introducido recientemente en este cultivo incluyen la producción de colágeno y bioplásticos (Lakshmanan *et al.*, 2005).

De acuerdo con Butterfield *et al.* (2002), el desarrollo de nuevas variedades de caña de azúcar (híbridos de *Saccharum* spp.) es un proceso largo e impredecible. La transformación genética ofrece el potencial de introducir algunas nuevas características deseables en variedades ya existentes y lograr la expresión estable de los transgenes.

Lakshmanan *et al.* (2005) mencionan que, además de ser un importante cultivo alimenticio y energético, existen otras razones que hacen de la caña de azúcar, un candidato para el mejoramiento por ingeniería genética. En primer lugar, la mejora genética de clones élite de caña de azúcar por mejoramiento convencional es difícil debido al complejo genoma poliploide-aneuploide, baja fertilidad y el largo período requerido (12–15 años) para generar nuevos cultivares. Las retrocruzas diseñadas para recuperar genotipos élite, con caracteres agronómicos deseables, requieren mucho tiempo en este cultivo.

Dentro de este contexto, la ingeniería genética es una herramienta útil para introducir características comerciales valiosas en el germoplasma élite. En segundo lugar, existen sistemas disponibles de transformación en la caña de azúcar útiles en la práctica, y las líneas transgénicas de utilidad pueden ser mantenidas indefinidamente por propagación vegetativa.

Chen *et al.* (1987) fueron los primeros en reportar la transformación genética en caña de azúcar, introduciendo un gen marcador que confiere resistencia al antibiótico kanamicina. La transformación se realizó en protoplastos aislados del híbrido comercial F164, mediante la incorporación inducida con polietilenglicol (PEG), utilizando como vector el plasmidio pABD1 aislado de la cepa JA221 de *E.coli*. Los callos formados a partir de los protoplastos transformados mantuvieron su expresión de resistencia a kanamicina en un medio con una concentración de $80 \mu\text{g mL}^{-1}$ del antibiótico. El ADN de los tejidos transformados hibridó con la sonda del gen APH(3')II (aminoglucósido fosfotransferasa). La eficiencia del proceso de transformación fue de 8 protoplastos en 10^7 .

Bower y Birch (1992) fueron los primeros en transformar plantas de caña de azúcar mediante bombardeo con microproyectiles de tungsteno, concluyendo que este método es más efectivo que los otros reportados.

Rathus y Birch (1992) mejoraron la eficiencia de transformación, por medio de electroporación, para introducir el gen de la enzima neomicinofosfotransferasa (NPTII) en protoplastos de caña de azúcar, aislados de las variedades Q63 y Q96 (un callo transformado por cada 10^2 - 10^4 protoplastos tratados). La integración y expresión del gen NPTII, que confiere resistencia al antibiótico kanamicina, se confirmaron mediante análisis Southern y ensayo enzimático. El análisis Southern reveló un complejo patrón de integración con rearreglos y múltiples copias. También demostraron la transformación conjunta del gen de la β -Glucoronidasa (GUS) en el mismo constructo o en constructos separados. Muchos de los callos que contenían copias intactas del gen de la β -Glucoronidasa, no mostraron expresión detectable de este gen. Sin embargo, una línea de callo regenerada luego de la electroporación con un plasmidio, conteniendo tanto el gen NPTII como el GUS, mostró una expresión estable de ambos genes marcadores.

Arencibia *et al.* (1992) desarrollaron un método de transformación y regeneración de plantas, basado en la electroporación de tejido meristemático de las variedades POJ 2878 y Ja 60-5. La transformación se realizó con los plasmidios pBI-221.1 y pGSCGN-2 que conferirían actividad GUS y NPTII a las células transformadas. Las plantas transformadas se analizaron por los métodos histoquímico, fluorométrico, PCR y Southern blot. Con la transformación del

tejido meristemático intacto se facilitó la regeneración de plantas, que por lo general es un obstáculo principal en la transformación de protoplastos. Sin embargo, debido a que el tejido meristemático está compuesto de varias capas de células heterogéneas, se incrementa la obtención de quimeras, lo cual a su vez podría evitarse si se transformara el tejido embriogénico.

Arencibia *et al.* (1995) describieron un procedimiento eficiente para la transformación genética de las variedades comerciales POJ 2878 y Ja 60-5, basado en la electroporación de un plasmidio que confiere actividad GUS dentro de un grupo de células aisladas de callos embriogénicos. Entre seis y ocho semanas después de la electroporación, las plantas regeneradas de Ja 60-5 fueron evaluadas y confirmadas como transgénicas, utilizando glucuronidasa histoquímica y análisis de hibridación Southern.

Arencibia *et al.* (1998) reportaron la primera recuperación exitosa de plantas de caña de azúcar transgénicas, morfológicamente normales, utilizando un cultivo conjunto de callos con *Agrobacterium tumefaciens*. Las frecuencias de transformación (total de plantas transgénicas/número de conglomerados celulares) estuvieron entre 9.4×10^{-3} y 1.15×10^{-2} . En sus experimentos encontraron que tanto la cepa LBA4404 (pTOK233) como la EHA101 (pMTCA3IG) fueron exitosas para la transformación de caña de azúcar con genes marcadores. Encontraron tres factores cruciales para incrementar la competencia de las células en el proceso de transferencia del T-DNA: (1) el uso de callos jóvenes y regenerables como explantes objetivo; (2) inducción o aumento del sistema de virulencia de *A. tumefaciens* con el cultivo de células de caña de azúcar y (3) la preinducción de organogénesis o embriogénesis somática.

Casi simultáneamente, Enríquez-Obregón *et al.* (1998) introdujeron el carácter de resistencia a herbicidas en el germoplasma de la caña de azúcar. Las plantas transgénicas resistentes a fosfinotricina (PPT), componente activo del herbicida comercial BASTA, fueron generadas mediante transformación con *Agrobacterium tumefaciens*. Se utilizaron secciones meristemáticas como explantes, y las frecuencias de transformación alcanzadas fueron de 10-35 por ciento. La regeneración de plantas fue alta y aparentemente no fue afectada por el proceso de transformación. El análisis Southern en varias plantas transformadas indicó la integración por genoma de una o dos copias intactas del gen *bar*, el cual codifica para la PPT-acetiltransferasa y confiere resistencia a BASTA. Los niveles de resistencia a BASTA fueron evaluados bajo condiciones de invernadero y parcelas pequeñas.

También Manickavasagam *et al.* (2004) reportan la obtención de plantas transformadas resistentes a PPT mediante el cultivo conjunto de *Agrobacterium*

con yemas axilares de las variedades de caña Co92061 y Co671. Mediante esta técnica no hay inducción de callo, la plántula se origina directamente de la yema axilar y los transformantes quiméricos se eliminan mediante la proliferación repetida de brotes en el medio de selección. Los resultados muestran que la generación y multiplicación de brotes transformados se puede lograr en cinco meses con eficiencias de transformación de hasta 50 por ciento. Dependiendo de la variedad, 50-60 por ciento de las plantas transgénicas fumigadas con BASTA (60 g l⁻¹ de ingrediente activo) crecieron sin daño de herbicida bajo condiciones de invernadero.

Otros reportes de transformación de caña de azúcar mediante el cultivo conjunto con *Agrobacterium* incluyen caracteres como resistencia a insectos (Arvinth *et al.*, 2010; Kalunke *et al.*, 2009; Zhangsun *et al.*, 2007), tolerancia a estrés osmótico (Wang *et al.*, 2005) y regulación del etileno (Wang *et al.*, 2009).

Elliot *et al.* (1998) utilizaron proteína verde fluorescente (GFP) para la selección *in vivo* de células transformadas mediante *Agrobacterium tumefaciens* cepa AGLO, evitando el uso de antibióticos, herbicidas o ensayos.

Santosa *et al.* (2004) describen un protocolo para la transformación de callos en la caña de azúcar mediante la cepa GV2260 de *Agrobacterium tumefaciens*, con la cual introdujeron el gen *appA* que codifica para la enzima fitasa de *Escherichia coli* cepa ATCC 33965.

Joyce *et al.* (2010) determinaron que, el sistema de selección y el medio de cultivo conjunto, fueron los factores más importantes que influyeron en el éxito de la transformación y regeneración de plantas transgénicas.

Otro método ampliamente utilizado para la transformación genética en la caña de azúcar es el conocido como biolística, una técnica para introducir ADN a través del bombardeo de tejido con micro proyectiles cubiertos de ADN. Utilizando este método, Franks y Birch (1992) desarrollaron en Australia las primeras plantas transgénicas de caña de azúcar a partir del cultivar comercial Pindar. Las plantas obtenidas mostraron una transformación estable luego del bombardeo con el gen de la neomicinfosfotransferasa (npt-II) que confiere resistencia al antibiótico geneticina, bajo control del promotor Emu.

Posteriormente se fueron reportando transformaciones en diferentes genotipos cultivados de caña de azúcar mediante biolística, en diferentes laboratorios del mundo (Gambley *et al.*, 1993; Snyman *et al.*, 2006; Jain *et al.*, 2007; Van Der Vyver, 2010) y para diferentes características, como resistencia a insectos (Christy *et al.*, 2009; Sheng *et al.*, 2008; Falco y Silva-Filho, 2003) y resistencia a virus (Zhu *et al.*, 2010).

El Cuadro 1 resume los esfuerzos dirigidos a incorporar, mediante la ingeniería genética, algunas características económicamente importantes dentro de variedades comerciales de caña de azúcar y en diferentes países.

Cuadro 1. Características introducidas o bajo estudio para transformar variedades de caña de azúcar en distintos países (Maldonado y Melgar, 2007)

Característica transgénica	Países
Tolerancia a herbicidas	
Glufosinato	Australia, Brasil, EUA, Mauricio, Sudáfrica
Glifosato	Brasil, EUA, Sudáfrica
Imidazolinona	Brasil
Resistencia a insectos	
Mediada por Bt	Brasil, Cuba, Sudáfrica
Inhibidores de proteinasas	Brasil, Sudáfrica
Resistencia a enfermedades	
Escaldadura foliar	Australia, Brasil
Virus del Mosaico de la caña de azúcar	Australia, Brasil, EUA, Sudáfrica
Síndrome del Amarillamiento foliar	Brasil, Colombia, EUA
Virus del Mosaico del sorgo	EUA
Raquitismo	EUA
Enfermedad de Fiji	Australia
Resistencia a estrés abiótico	
Déficit hídrico	Brasil, Mauricio
Bajas temperaturas	Brasil, Mauricio
Salinidad	Mauricio
Otras	
Metabolismo de los carbohidratos	Australia, Cuba, EUA
Control de la floración	Brasil
Enzimas farmacéuticas	EUA
Plásticos biodegradables	Australia
Simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno	Brasil

El Consorcio Internacional de Biotecnología en Caña de Azúcar

El Consorcio Internacional de Biotecnología en Caña de Azúcar (ICSB por sus siglas en inglés) es un grupo actualmente conformado por 19 instituciones de 14 países (Cuadro 2) que, de acuerdo con Moore (2005), aportan recursos económicos para compartir tecnologías e información, invertir en la construcción de su propia infraestructura institucional de biotecnología y financiar colaborativamente proyectos de investigación para avanzar en el conocimiento básico de la biología molecular de la caña de azúcar.

Moore (2005) hace un relato detallado de los hechos que dieron origen a la formación del ICSB. En 1988, durante un taller de la International Society of Sugarcane Technologists (ISSCT), realizado en conjunto entre las secciones de Fisiología y Mejoramiento Genético, Paul Moore y James Irvine arreglaron una reunión entre los entonces directores de la Hawaii Sugar Planters' Association (HSPA), de los Estados Unidos y el Centro de Tecnología Canavieira (CTC) de Brasil, con el objetivo de financiar una investigación que desarrollarían Steven Tanksley y Mark Sorrel de la Universidad de Cornell (Estados Unidos), con el propósito de evaluar la factibilidad de utilizar marcadores de ADN para mapear el genoma de la caña de azúcar. El acuerdo entre HSPA/CTC incluyó la participación de un investigador de cada institución, que trabajaría en el laboratorio de Cornell para facilitar la transferencia de las tecnologías adquiridas, al regresar a sus respectivas industrias.

Los prometedores resultados obtenidos en este proyecto, en el que participaron K. K. Wu de la HSPA y William Burnquist del CTC, motivaron a Irvine para organizar el Primer Taller Internacional en Análisis del Genoma de la Caña de Azúcar, realizado en marzo de 1991 en Beltsville, Maryland, EUA. Durante este evento se unieron otras cinco instituciones a las dos primeras y formalizaron un acuerdo de colaboración, para expandir los esfuerzos en investigación y lograr un mejor entendimiento de la genómica de la caña de azúcar y aplicar este conocimiento al mejoramiento del cultivo (Moore, 2005).

En el segundo taller, realizado durante 1992 en Albany, California, EUA, se unieron otros tres centros de investigación a los siete anteriores, y se obtuvo una nueva carta de entendimiento que incluyó a los nuevos miembros, nombrando a esta creciente organización como Consorcio Internacional de Biotecnología en Caña de Azúcar (Moore, 2005).

El Cuadro 3 muestra los logros e impacto que han tenido los proyectos de investigación financiados por el ICSB.

CENGICAÑA forma parte del ICSB desde 1999 y aprovecha los conocimientos generados de la investigación en actividades como, diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar mediante la utilización de anticuerpos y marcadores moleculares, con lo cual se ha fortalecido la producción de semilleros, los procesos de cuarentena y el intercambio de germoplasma. La selección asistida con marcadores y la caracterización molecular de variedades son otras aplicaciones derivadas, las cuales han contribuido a la selección de variedades progenitoras y a mejorar la eficiencia en el proceso de selección de nuevas variedades.

CENGICAÑA también está invirtiendo en el desarrollo de su infraestructura institucional de biotecnología, mediante el desarrollo de sus capacidades para realizar transformación genética de plantas, con lo cual podrá también aprovechar inicialmente los conocimientos generados en los proyectos financiados por el ICSB.

Cuadro 2. Países e instituciones que integran el ICSB

País	Institución		Año de incorporación
Argentina	CHACRA	Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa	1995
	EEOC	Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes	1995
Australia	CRC-SIIB	Cooperative Research Centre for Sugarcane Industry Innovation through Biotechnology	1991
Brasil	CTC	Centro de Tecnología Canavieira antes COPERSUCAR Cooperativa de Productores de Caña de Azúcar, Azúcar y Alcohol del Estado de Sao Paulo	1988
Colombia	CENICAÑA	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar	1992
Ecuador	FIAE/CINCAE	Fundación para la Investigación Azucarera del Ecuador / Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador	2004
Francia/Reunión	CIRAD/IRAD	Agricultural Research for Development, France / Research Institute for Agriculture Development, Reunion	1994
Guatemala	CENGICAÑA	Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar	1999
India	VSI	Vasantdada Sugar Institute	1999
	EID	E.I.D. Parry Ltd.	2001
Barbados	BWICSBS	British West Indies Central Sugarcane Breeding Station	1999
Mauricio	MSIRI	Mauritius Sugar Industry Research Institute	1992
Filipinas	PHILSURIN	Philippine Sugar Research Institute Foundation antes PSPA Philippine Sugar Producers' Association	1994
Sudáfrica	SASRI	South Africa Sugar Research Institute antes SASEX South Africa Sugar Experiment Stations	1991
Tailandia	MITR PHOL	Mitr Phol Sugar Research Center	2007
EUA	FSCL	Florida Sugar Cane League	1992
	HARC	Hawaii Agriculture Research Center antes HSPA Hawaii Sugar Planters Association	1988
	ASCL	American Sugarcane League, Louisiana	1991
	TAMU	Texas A&M Ag Experiment Station	1991

Cuadro 3. Áreas de investigación, logros e impacto de los proyectos financiados por el ICSB (Basado en Moore, 2005)

Área de Investigación	Logros	Impacto
Enfermedades	Aislamiento y descripción del virus responsable del Amarillamiento Foliar de la Caña de Azúcar (SCYLV)	Base para la transformación de plantas con resistencia al virus del Amarillamiento Foliar de la Caña de Azúcar (SCYLV)
	Desarrollo de anticuerpos para el diagnóstico de SCYLV	Herramientas disponibles para monitorear el virus del amarillamiento de la caña de azúcar y asistir en el mejoramiento para selección por resistencia
	Análisis de la diversidad del virus SCYLV a nivel mundial	
Transformación Genética y Expresión Génica	Aislamiento de genes de la proteína de la cápside (CP) para cepas del virus del mosaico de la caña de azúcar y del sorgo	Base para la transformación de plantas con resistencia al virus del mosaico de la caña de azúcar
	Mejoramiento de métodos para transformación genética variedades de caña transformadas con los genes CP para producir clones resistentes	Incremento de la expresión transgénica
	Aislamiento de proteínas de la planta que interactúan con supresores virales de silenciamiento génico post transcripcional (PTGS)	
	desarrollo de métodos para suprimir la proteína anfitriona requerida para PTGS	
desarrollo de un sistema para la transformación de cloroplastos	Polen incapaz de realizar flujo de genes	
Mapeo Genético	El desarrollo de métodos para el mapeo genético de organismos poliploides de tipo y nivel desconocido produjo el primero de muchos mapas genéticos de caña de azúcar basados en marcadores moleculares	Varios marcadores y mapas permitirán a los mejoradores realizar una selección precisa de parentales y progenie para un desarrollo varietal más rápido
	Mapeo de características cuantitativas (QTLs) asociadas con el contenido de azúcares	
	Mapeo de QTLs para peso de tallo, número de tallos, altura de tallos, floración, azúcar, fibra, pol, fibra y ceniza	
	Ensamblaje de cuatro mapas genéticos de la caña de azúcar en uno solo con correspondencia al mapa de sorgo	Base para la identificación de genes en caña de azúcar
	Construcción de Cromosomas Artificiales de Bacteria (BAC) para el aislamiento de genes y desarrollo de un mapa físico	
	Producción de una base de datos para identificación de genes mediante la creación de bibliotecas de cDNA	
	Mapeo fino para el locus de resistencia a roya marrón	
	Desarrollo de iniciadores para marcadores microsatélite	
	Desarrollo de marcadores SNP para mapeo fino	
Desarrollo de arrays y herramientas bioinformáticas		

APLICACIONES BIOTECNOLÓGICAS EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE GUATEMALA

Saneamiento de variedades

Como ya se mencionó anteriormente, el cultivo de tejidos permite la regeneración de plantas libres de enfermedades. El meristemo apical con un diámetro de entre 0.1 y 0.2 mm tiene la particularidad de estar libre de enfermedades causadas por patógenos sistémicos, de tal forma se espera que las plantas obtenidas a partir de él, también lo estén. Dos de los virus que afectan la producción de caña de azúcar en Guatemala son los causantes de las enfermedades conocidas como virus del Mosaico de la caña (SCMV) y virus del Amarillamiento de la hoja (SCYLV).

Entre las enfermedades bacterianas presentes en Guatemala están la Escaldadura (LSD) provocada por *Xanthomonas albilineans* y el Raquitismo de las socas (RSD) causado por *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*. Con la siembra de meristemos y el tratamiento térmico al que se someten las yemas durante una hora a 51°C, se consigue eliminar los virus y las bacterias presentes. Posteriormente al tratamiento térmico, las yemas son inducidas a germinar en bandejas de plástico a temperatura ambiente.

En CENGICANA el procedimiento utilizado es:

- a) Obtención de tallos y corte de yemas
- b) Tratamiento térmico de las yemas
- c) Germinación (7–10 días)
- d) Extracción, siembra y desarrollo de los meristemos apicales (75 días)
- e) Multiplicación de las plantas regeneradas (30 días)
- f) Diagnóstico mediante marcadores moleculares
- g) Multiplicación de las plantas libres de enfermedades (60 días)
- h) Enraizamiento (15 días)
- i) Aclimatación (60 – 90 días)

Los meristemos se siembran en un medio MS (Murashige & Skoog, 1962) suplementado con 0.1 mg/l de BAP (6-bencilaminopurina) + 30 g/l de sacarosa + 8 g/l de agar. Luego son incubados a 25°C en condiciones de oscuridad durante siete días para disminuir el efecto de la oxidación, y después bajo condiciones de luz por un fotoperíodo de 16 horas.

Cuando las plantas formadas a partir de los meristemos alcanzan una altura aproximada de 4 cm se trasladan a un medio de cultivo líquido, con los mismos componentes que el medio anterior (pero sin agar). Con esto se consigue el crecimiento y la formación de nuevos brotes que se subcultivan y multiplican cada 30 días, hasta un máximo de cinco subcultivos, luego de lo cual se trasladan a otro medio pero sin BAP, para inducir el enraizamiento durante 15 días. Antes del segundo subcultivo se toma una muestra de las plantas obtenidas para realizarles un diagnóstico de enfermedades basado en marcadores moleculares. Las plantas que resulten sanas continúan siendo multiplicadas. Finalmente, se separan las plantas y se siembran en bandejas con sustrato para su aclimatación en invernadero. La Figura 1 muestra algunas de las fases del proceso.

En el caso de que las plantas obtenidas se destinen a exportación con fines de intercambio de germoplasma, luego de haber confirmado la ausencia de enfermedades, las plantas regeneradas se trasladan a tubos de ensayo que contengan un medio sólido sin BAP, para su embalaje y envío.

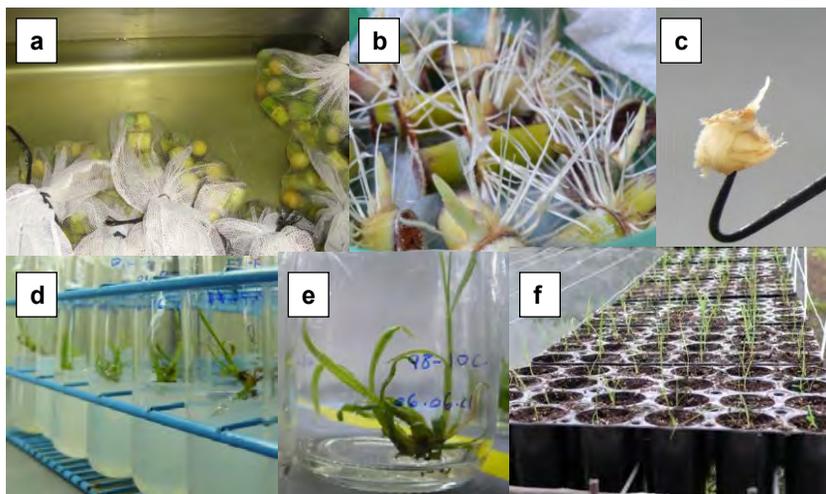


Figura 1. Proceso de saneamiento de variedades de caña de azúcar: (a) tratamiento térmico, (b) germinación de yemas, (c) ápice del cual se extrae el meristemo, (d) plantas regeneradas a partir de meristemos, (e) propagación clonal, (f) aclimatación de plantas en invernadero

Micropropagación

La multiplicación vegetativa de plantas a través de cultivo *in vitro* recibe el nombre de micropropagación. Comparada con la multiplicación bajo condiciones de campo, la vegetativa muestra varias ventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- Mayor tasa de multiplicación
- Requiere menos área
- Control fitosanitario más adecuado
- Requiere menos tiempo

Entre sus desventajas se menciona el hecho de que requiere instalaciones, equipo y mano de obra especializados.

En CENGICAÑA se utiliza esta técnica para multiplicar las plantas de variedades introducidas, las cuales han quedado libres de las enfermedades detectadas en el proceso de cuarentena, de acuerdo con el procedimiento descrito en el inciso 3.1. Esta multiplicación permite obtener como mínimo 500 plantas derivadas de un solo meristemo, por cada variedad, listas para trasplante a campo y libres de enfermedades, en un proceso que tarda en promedio ocho meses desde el momento en que se cortan las yemas de las que se obtendrán los meristemos apicales.

Además de las plantas provenientes de cuarentena, también se multiplican algunas variedades que se encuentran en fase de evaluación dentro del Programa de Variedades de CENGICAÑA. Con esto se logra establecer ensayos de evaluación en mayor número de localidades, al tener disponible mayor número de plantas por variedad.

Algunos ingenios azucareros de Guatemala cuentan con laboratorios de micropropagación, en los cuales limpian y multiplican sus variedades. Entre estos están el ingenio Magdalena, el cual ha venido incrementando anualmente sus volúmenes de producción, y proyecta alcanzar para el año 2012 los 3 millones de plantas. El ingenio Santa Ana ha mantenido una producción anual constante de 300,000 plantas (Cuadro 4). Por otra parte, la empresa Tecnología Agrícola inició en el año 2010 la micropropagación de plantas de caña de azúcar para el ingenio La Unión y tiene una capacidad instalada para producir hasta 600,000 plantas anuales (comunicación personal con el Ing. Mario Peña).

Cuadro 4. Producción de plantas de caña de azúcar mediante micropropagación en los ingenios Magdalena y Santa Ana. Guatemala, 2011

Ingenio	Año	Producción de plantas
Magdalena	2009	1.2 millones
	2010	1.5 millones
	2011	1.8 millones
Santa Ana	2010	300,000
	2011	300,000 Distribuidas en: Variedades tempranas (15 %): CP73-1547, CP98-46 Variedades intermedias (15 %): CP72-2086, Mex79-431, CG98-78 Variedades tardías (70 %): CG98-10, RB73-2577, PR75-2002

Fuente: Ingenio Magdalena e ingenio Santa Ana.

Diagnóstico de enfermedades mediante marcadores moleculares

Cuando se extrae ADN o ARN de una planta infectada por un patógeno, en realidad se obtiene ADN o ARN tanto de la planta como del patógeno. Si se cuenta con un método que permita identificar un fragmento que es exclusivo del patógeno, se puede diagnosticar su presencia en la muestra.

Este razonamiento es la base del análisis de ácidos nucleicos para el diagnóstico de enfermedades mediante marcadores moleculares. En CENGICAÑA se realiza esta metodología para el diagnóstico de las siguientes enfermedades:

- Raquitismo de las socas (RSD)
- Escaldadura (LSD)
- Fitoplasma del Amarillamiento foliar (SCYLP)
- Virus del Mosaico de la caña (SCMV)

El procedimiento para la detección simultánea de RSD y LSD es el reportado por Davis, Rott y Astua-Monge (1998). Mientras que para la detección de SCYLP sigue el procedimiento reportado por Parmessur *et al.* (2002). Por último, el procedimiento para la detección de SCMV es el reportado por Smith & Van de Velde (1994).

El diagnóstico de enfermedades se efectúa como parte del saneamiento de variedades, antes de iniciar la micropropagación; de esta forma se asegura, la

sanidad de las plantas producidas. De manera general, el procedimiento implica la extracción de ADN o ARN, la amplificación de un fragmento específico del patógeno, por medio de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), la separación de los fragmentos por electroforesis en gel de agarosa y la tinción de los fragmentos con bromuro de etidio para su visualización con luz UV (Figura 2).

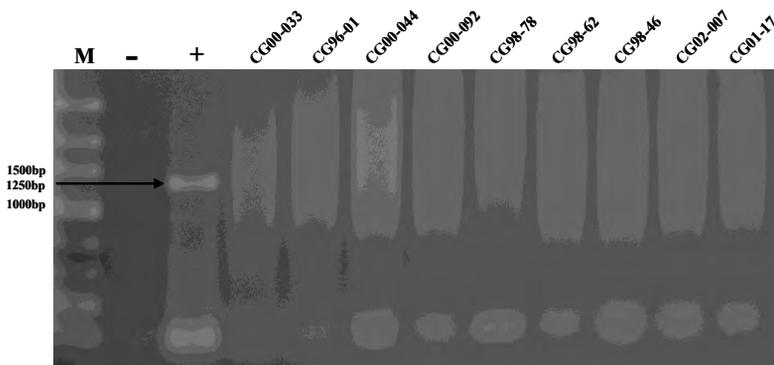


Figura 2. Gel de agarosa que muestra los resultados de un diagnóstico para el fitoplasma del Amarillamiento foliar (SCYLP). Carril 1 = marcador de masa molecular, carril 2 = control negativo, carril 3 = control positivo, carriles 4-12 variedades evaluadas. CENGICANA, 2011

El diagnóstico de enfermedades con marcadores moleculares presenta la ventaja de ser más sensible que los realizados mediante técnicas inmunológicas, además de ser un ensayo no destructivo.

Análisis de la diversidad genética

Utilizando un grupo de marcadores polimórficos en diferentes variedades de caña de azúcar, es posible generar una serie de bandas que, al transformarlas en una matriz binaria, donde 0 representa la ausencia de banda y 1 la presencia, pueden analizarse estadísticamente para determinar los niveles de similitud entre las variedades en estudio. Los resultados del análisis pueden mostrarse gráficamente como un dendrograma y es de utilidad para conocer el grado de variabilidad genética que se tiene en una colección de germoplasma o para planificar cruzamientos en un programa de mejora genética, entre otras.

La Figura 3 muestra las relaciones de similitud entre un grupo de 48 variedades que se emplean como progenitores en el Programa de Variedades de

CENGICAÑA. En este estudio se generaron los patrones de bandas con cinco marcadores microsatélite (SSR), cuyos cebadores fueron proporcionados por el CIRAD (La Recherche Agronomique Pour Le Developpement) de Francia. Los resultados de este trabajo aún son considerados para realizar la planificación anual de cruzamientos (Quemé, Molina y Melgar, 2005).

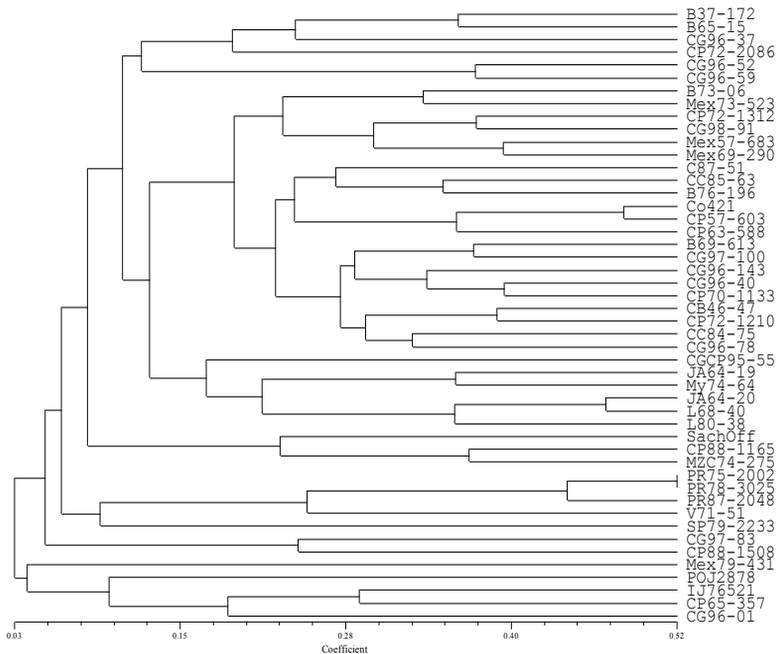


Figura 3. Dendrograma generado con marcadores SSR que muestra las relaciones genéticas entre 48 variedades de caña de azúcar, obtenido con el método de agrupamiento UPGMA (tomado de Quemé, Molina y Melgar, 2005)

Maldonado *et al.* (2009) utilizó marcadores SSR y RAPD para caracterizar la diversidad genética de 26 cepas del hongo *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff, el cual es utilizado para el control biológico de plagas en el cultivo de caña de azúcar y otros. En ese estudio se detectó la presencia de ocho cepas nativas, y se determinó que, después de tres meses de su aplicación al suelo, el hongo aún permanece viable.

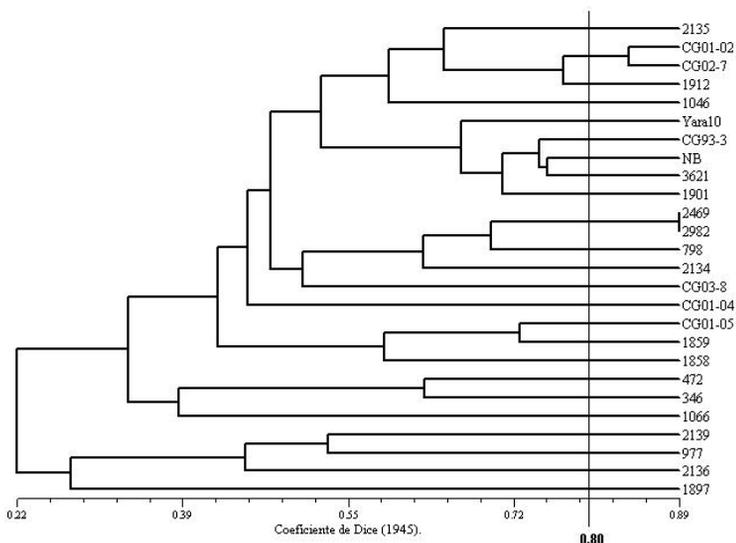


Figura 4. Dendrograma construido con marcadores SSR y RAPD que muestra las relaciones de similitud entre 26 cepas del hongo *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff (tomado de Maldonado *et al.*, 2009)

Selección asistida con marcadores

A pesar de los esfuerzos que se han realizado para identificar marcadores asociados a características de interés y crear mapas genéticos, la complejidad del genoma de la caña de azúcar continúa siendo la principal barrera para su utilización en selección asistida con marcadores.

Hasta la fecha, solamente han sido identificados dos marcadores estrechamente asociados a una característica monogénica, la resistencia a Roya marrón (Le Cunff, 2008). La investigación realizada para identificar estos marcadores fue financiada parcialmente por el Consorcio Internacional de Biotecnología en Caña de Azúcar (ICSB, por sus siglas en inglés) del cual Guatemala es miembro. Estos marcadores han sido proporcionados a CENGICANA por el CIRAD y serán utilizados para selección asistida por marcadores.

No se reporta el uso de ningún otro marcador molecular en selección asistida, a pesar de que se ha comprobado la identificación de marcadores asociados a QTLs.

Desarrollo de variedades transgénicas

La utilización de variedades transgénicas de caña de azúcar pone en ventaja comparativa y competitiva a quien aprovecha esta tecnología. La Agroindustria Azucarera de Guatemala está consciente de ello y de las limitaciones que en desarrollo tecnológico tiene el país. Sin embargo, el propio proceso de transformación parece ser una actividad que está al alcance. Por tal razón, CENGICANÑA se ha propuesto desarrollar las capacidades locales para realizar transformación genética. De momento, se tiene planeado ejecutar actividades solo a nivel de laboratorio, pues aún no existe en Guatemala un marco regulatorio que facilite la experimentación a nivel de campo con plantas transformadas.

Como ya se mencionó anteriormente, no es posible lograr la transformación genética si no se dispone de un protocolo de cultivo de tejidos que haga posible la transformación de células y la posterior regeneración de plantas, de manera eficiente. Con este propósito, se están realizando evaluaciones que optimicen las condiciones de cultivo con fines de transformación. Los resultados que se tienen hasta la fecha indican que las variedades con mayor respuesta al cultivo *in vitro* son CGSP98-16; CG01-17 y CG98-10, en las cuales se ha logrado regenerar hasta 70 plantas por disco foliar (datos sin publicar).

La Figura 5 muestra parte del proceso de regeneración de plantas por medio de embriogénesis somática, a partir de discos foliares.



Figura 5. Regeneración de plantas por embriogénesis somática a partir de discos foliares de caña de azúcar en la variedad CG98-10, (a) discos foliares muestran embriones somáticos y plántulas, (b) plantas regeneradas a partir de un disco foliar

PERSPECTIVAS DE DESARROLLO

La biotecnología es una rama que a nivel nacional está ganando impulso gracias a la suma de esfuerzos, que investigadores entusiastas realizan dentro de la Comisión Intersectorial de Biotecnología del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT). Recientemente, se desarrolló un plan de capacitación de recurso humano en biotecnología. Además, se realizan esfuerzos coordinados entre el sector privado, académico y gubernamental para adquirir capacidades en bioinformática. Todo esto permitirá aprovechar de mejor forma los recursos que el desarrollo tecnológico pone a nuestra disposición.

En CENGICANA, las aplicaciones biotecnológicas están fortaleciendo cada vez más el Programa de Variedades. Se espera que en un futuro cercano se tenga un ensamblaje óptimo de las actividades de genotipado, saneamiento y multiplicación de variedades, selección asistida y transformación genética, con las demás actividades del proceso de mejoramiento genético. Se espera también iniciar aplicaciones de marcadores moleculares tendientes a la caracterización de la diversidad genética de patógenos y la identificación de genes de interés.

Por otra parte, el Área de Biotecnología puede fortalecer también las actividades del Programa de Manejo Integrado de Plagas, mediante estudios de diversidad genética, como se hizo con el hongo *Metarhizium anisopliae* (Maldonado, 2009). De manera general, se espera un aumento gradual en la demanda de actividades en el Área de Biotecnología, como consecuencia de los resultados favorables observados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahloowalia, B.; Maretzki, A. 1983. Plant regeneration via somatic embryogenesis in sugarcane. *Plant Cell Reports* , 2:21-25.
2. Aitken, K.; Jackson, P.; McIntyre, C. 2005. A combination of AFLP and SSR markers provides extensive map coverage and identification of homo(eo)logous groups in a sugarcane cultivar. *Theoretical and Applied Genetics* , 110:789-801.
3. Al-Janabi, S.; Honeycutt, R.; McClelland, M.; Sobral, B. 1993. A genetic linkage map of *Saccharum spontaneum* L. 'SES 208'. *Genetics* , 134:1249-1260.

4. Bower, R.; Birch, R. 1992. Transgenic sugarcane plants via microprojectile bombardment. *The Plant Journal* , 2(3):409-416.
5. Carson, D.; Hockett, B.; Botha, F. 2002. Sugarcane ESTs differentially expressed in immature and maturing internodal tissue. *Plant Sci* , 162:289-300.
6. Maldonado, A.; Melgar, M. 2007. Avances mundiales en transgénesis de caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación Zafra 2006-2007. Guatemala, CENGICANA. pp. 92-100.
7. Da Silva, J.; Sorrells, M.; Burnquist, W.; Tanksley, S. 1993. RFLP linkage map and genome analysis of *Saccharum spontaneum*. *Genome* , 36:782-791.
8. D'Hont, A. ; Ison, D. ; Alix, K. ; Roux, C. ; Glaszmann, J.C. 1998. Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. *Genome Res.* , 41:221-225.
9. Gallo-Meagher, M.; English, R.; Abouzeid, A. 2000. Thidiazuron stimulates shoot regeneration of sugarcane embryogenic callus. *In Vitro Cell Dev Biol Plant* , 36:37-40.
10. García, R.; Cidade, D.; Castellar, A.; Lips, A.; Magioli, C.; Callado, C.; otros. 2007. In vitro morphogenesis patterns from shoot apices of sugarcane are determined by light and type of growth regulator. *Plant Cell Tiss Organ Cult* , 90:181-190.
11. Gill, R.; Malhotra, P.; Gosal, S. 2006. Direct plant regeneration from cultured young leaf segments of sugarcane. *Plant Cell Tissue and Organ Culture* , 84:227-231.
12. Heinz, D.; Mee, J. 1969. Plant differentiation from callus tissue of *Saccharum* species. *Crop Sci.* , 9:346-348.
13. Heller-Uszynska, K.; Uszynski, G.; Huttner, E.; Evers, M.; Carlig, J.; Caig, V.; y otros. 2010. Diversity Arrays Technology effectively reveals DNA polymorphism in a large and complex genome of sugarcane. *Mol Breeding*, Publicado en línea.
14. Ho, W.J.; Vasil, I. 1983. Somatic embryogenesis in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) I. The morphology and physiology of callus formation and the ontogeny of somatic embryos. *Protoplasma* , 118:169-180.

15. Hoarau, J.; Offman, B.; D'Hont, A.; Risterucci, A.; Roques, D.; Glaszmann, J., y otros. 2001. Genetic dissection of a modern cultivar (*Saccharum* spp.). I. Genome mapping with AFLP. *Theoretical and Applied Genetics* , 103:84-97.
16. Krikorian, A.; Berquam, D. 1969. Plant cell and tissue culture: the role of Haberlandt. *Bot. Rev.* , 35:59-88.
17. Lakshmanan, P. 2006. Somatic embryogenesis in sugarcane -an addendum to the invited review 'Sugarcane Biotechnology: The Challenges and Opportunities'. *In Vitro Cell Dev. Biol. Plant* , 42:201-205.
18. Lakshmanan, P.; Geijskes, R.; Aitken, K.; Grof, C.; Bonnett, G.; Smith, G. 2005. Sugarcane Biotechnology: The challenges and opportunities. *In vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* , 41:345-363.
19. Le Cunff, L.; Garsmeur, O.; Raboin, L.; Pauquet, J.; Telismart, H.; Selvi, A.; y otros. 2008. Diploid/Polyploid Syntenic Shuttle Mapping and Haplotype-Specific Chromosome Walking Toward a Rust Resistance Gene (Bru1) in Highly Polyploid Sugarcane (2n=12x=115). *Genetics* , 180:649-660.
20. Leu, L. 1978. Apical meristem culture and redifferentiation of callus masses to free sugarcane systemic diseases. *Plant Protection Bulletin* , 20:77-82.
21. Maldonado, A.; Ovalle, W.; Márquez, J.M.; Quemé, J.L. 2009. Caracterización de cepas del hongo *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff y determinación de su presencia en el suelo a través de marcadores moleculares. Informe final proyecto FODECYT 066-2006. CONCYT, Guatemala.
22. Meyer, G.; Banasiak, M.; Keeping, N.; Pillay, N.; Parfitt, R.; Snyman, S. 2010. Novacane as a tool for rapid propagation of material for the SASRI plant breeding programme. *Sugar Cane International* , 28(6):246-248.
23. Moore, P. 2005. A personal view on coordinating international progress in sugarcane improvement and linking biotechnology to application. *International Sugar Journal* Vol. 107: 27-31.
24. Mordocco, A.; Brumbley, J.; Lakshmanan, P. 2009. Development of a temporary immersion system (RITA) for mass production of sugarcane (*Saccharum* spp. interspecific hybrids). *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* , 45:450-457.

25. Murashige, T.; Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* , 15:473-497.
26. ONU. 1992. *Convenio sobre la diversidad biológica*. Recuperado el 21 de junio de 2011, de <http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
27. Oropeza, M.; Guevara, P.; De García, E.; Ramírez, J. 1995. Identification of somaclonal variants of sugarcane (*Saccharum* spp.) resistant to sugarcane mosaic virus via RAPD markers. *Plant Molecular Biology Reporter* , 13(2):182-191.
28. Parmessur, Y.; Aljanabi, S.; Saumtally, S.; Dookum-Saumtally, A. 2002. Sugarcane yellow leaf virus and sugarcane yellows phytoplasma: elimination by tissue culture. *Plant Pathology* , 51:561-566.
29. Quemé, J.; Molina, L.; Melgar, M. 2005. Analysis of genetic similarity among 48 sugarcane varieties using microsatellite DNA sequences. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.*, Vol. 25:592-596.
30. Roughan, P.; Waldron, J.; Glasziou, K. 1971. Starch inheritance in *Saccharum*. Enzyme polymorphism for B-amylase in interspecific and intergeneric hybrids. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* , 14:257-265.
31. Shiromani, W.; Basnayake, V.; Moyle, R.; Birch, R. 2010. Embryogenic callus proliferation and regeneration conditions for genetic transformation of diverse sugarcane cultivars. *Plant Cell Rep* , Publicado en línea.
32. Tawar, P.; Sawant, R.; Dalvi, S.; Nikam, A.; Kawar, P.; Devarumath, R. 2008. An assessment of somaclonal variation in micropropagated plants of sugarcane by RAPD markers. *Sugar Tech* , 10(2):124-127.
33. Taylor, P.; Dukic, S. 1993. Development of an in vitro culture technique for conservation of *Saccharum* spp. hybrid germplasm. *Plant Cell Tissue and Organ Culture* , 34:217-222.
34. Vasil, I. 2008. A history of plant biotechnology: from the Cell Theory of Schleiden and Schwann to biotec crops. *Plant Cell Rep.* , 27:1423-1440.
35. Wu, K.; Burnquist, W.; Sorrells, M.; Tew, T.; Moore, P.; Tanksley, S. 1992. The detection and estimation of linkage in polyploids using single-dose restriction fragments. *Theoretical and Applied Genetics* , 83:294-300.

V. LABORES
DE ESTABLECIMIENTO
DEL CULTIVO

PREPARACIÓN DE SUELOS PARA LA SIEMBRA DE CAÑA DE AZÚCAR

Joel García, Braulio Villatoro, Fernando Díaz y Gil Sandoval*

INTRODUCCIÓN

La preparación de suelos es la combinación de labores mecanizadas que proveen a la semilla de caña (reproducción vegetativa) las condiciones adecuadas y así estimular una buena germinación y un crecimiento vigoroso de la masa foliar y la masa radicular. Para lograr una buena germinación, la semilla de caña requiere una adecuada relación suelo – aire – agua – temperatura. El óptimo desarrollo de la masa foliar incidirá en un mayor aprovechamiento de la radiación solar; una alta producción de tallos molederos, y el buen desarrollo radicular podrán abastecer los nutrientes, el agua, el oxígeno y el sostén de la masa foliar durante los años del cultivo hasta que sea renovado.

Los beneficios que se obtienen con una adecuada preparación de suelos son: destrucción de las cepas para eliminar residuos de cosechas anteriores y malezas, favorecimiento de la actividad química y biológica, al facilitar el intercambio gaseoso que requieren la flora y la fauna del suelo; control de plagas del suelo, enterrando huevos como los de la Chinche salivosa, o exponiendo larvas como los de Gallina ciega y Gusano alambre; mejoramiento de la infiltración del agua y el drenaje subsuperficial, rompimiento de las capas compactadas para el favorecimiento de la penetración y desarrollo de raíces. (Campollo, 1999).

No obstante la importancia que tiene la preparación del suelo para la siembra, debe tenerse mucho cuidado en no hacerlo en exceso, ya que puede resultar tan perjudicial, como la preparación en condiciones inadecuadas.

El contenido de humedad del suelo tiene gran importancia para definir el mejor momento en el que deben realizarse las operaciones de preparación. El manejo de suelos agrícolas con la humedad ideal reduce la compactación, la fuerza de tracción, el desgaste del tractor y de los implementos, el consumo de

* Joel García es Ing. Agr., Jefe del Departamento de Preparación de Tierras del ingenio Pantaleón, www.pantaleon.com; Braulio Villatoro es Ing. Agr., Especialista en Sistemas de Información para Agricultura de Precisión de CENGICANA, www.cengicana.org; Fernando Díaz es Ing. Agr. Jefe del Departamento de Ingeniería Agrícola del ingenio San Diego S.A., www.sandiego.com.gt y Gil Sandoval es Ing. Agr. Jefe del Área de Adecuación y Preparación de Suelos del ingenio La Unión, www.launion.com.gt

combustible y los costos operativos, dando como resultado un mejor trabajo agronómico.

Los factores que intervienen para la selección de la secuencia de labores de preparación de suelos son muy variables, de ahí que el técnico encargado de esta práctica debe ser muy observador y tener mucho criterio para seleccionar la secuencia a seguir.

SECUENCIA Y DESCRIPCIÓN DE LABORES

Las labores necesarias para una adecuada preparación de suelos y su secuencia dependen de las características del suelo que será renovado. Éstas se pueden conocer a través de la observación y descripción del perfil en una calicata (1m x 1m x 1m) o cajuela (0.6m x 0.6m x 0.6m) representativa del lote en cuestión. Las principales a observar en el perfil son la secuencia de los horizontes presentes, su espesor, profundidad, textura y estructura, también habrá que detectar capas compactadas y presencia de piedras u otro factor limitante. Adicionalmente, en varios puntos representativos del lote se mide la compactación con algún instrumento de campo, como el penetrómetro y la medición de la humedad actual. Debido a la variabilidad de suelos existentes en la zona cañera y la variación en el manejo del cultivo por parte de los ingenios, las labores y secuencia son variables, pero de manera general en la Figura 1 se muestra una secuencia típica de las labores de preparación.

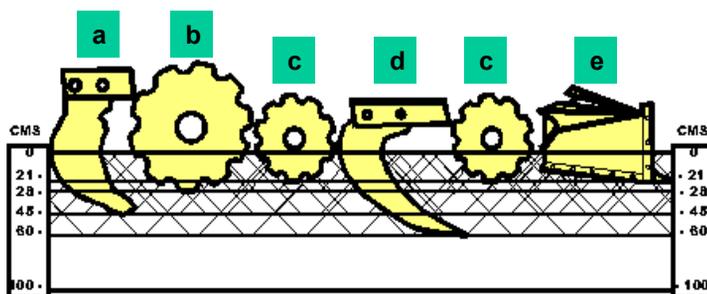


Figura 1. Labores (implementos) utilizados en una secuencia de forma general. a) Arado (arado de cincel), b) Volteo (rastros arados), c) Pulido (rastra), d) Subsulado (subsolador), e) Surcado (surcador)

En general y en su orden, la secuencia sería un paso con arado de cincel, luego el volteo con rastros arados, un primer pulido con una rastra, luego el subsulado con subsolador, seguidamente un segundo pulido y por último el surcado.

Previo a las labores de preparación en aquellos lotes que, por su ubicación y distancia del ingenio, es económicamente viable la aplicación de la cachaza, se acarrea la cachaza con camiones de autovolteo y se deposita en montones distribuidos en toda el área del lote. Posterior al acarreo se procede a la distribución, dejando una capa uniforme sobre la superficie. Esta labor se realiza con un tractor de llanta de 150 a 175 HP jalando una rufa niveladora. Se recomienda que el tiempo entre el acarreo de la cachaza y su distribución no sea mayor a las 72 horas, para evitar que el material se compacte y fermente, y después genere gases y malos olores, máxime si se encuentran viviendas cercanas al lote de aplicación.

La función de la labor y los parámetros de uso de cada implemento se describen a continuación:

Arado

Esta actividad se practica en suelos que presenten capas compactadas con una resistencia mayor a 200 psi. Consiste en introducir en el suelo cuerpos parabólicos separados a 0.45 m entre cada uno, a una profundidad no mayor de 0.45 m en suelos francos y 0.30 m en suelos arcillosos. El equipo utilizado se llama arado de cinceles; los cuales son cuerpos parabólicos que van sostenidos en una barra portaherramientas, la cual es jalada por un tractor con llantas de 320 HP, cuando el equipo cuenta con cinco cuerpos, o un tractor de llanta de 215 HP si el equipo cuenta con tres cuerpos. La velocidad de operación del equipo debe ser de 4.5 a 5.5 km por hora. Esta actividad conforma un sustrato del suelo en el que las plantas de caña de azúcar se puedan desarrollar apropiadamente. El arado de cinceles efectúa una labranza vertical, cuya principal característica es aflojar el suelo a profundidades mayores que los arados o rastro arados de discos, sin invertir ni mezclar las distintas capas de su perfil, lo que permite conservar la estructura interna del suelo.

El arado de cincel se hace en sentido paralelo a los surcos, si la capa arable no fue roturada en su totalidad, se dará un segundo paso, éste se realiza con una orientación de 45° respecto al primero. Esta labor se realiza generalmente después del paso de subsolado. El patrón de campo utilizado con mayor frecuencia incluye una dirección transversal con ángulo de 90° en relación con la dirección del surco propuesta (Rodríguez y Daza, 1995). La calidad de esta labor se mide por el grado de fracturación de la capa compacta, que está muy relacionada con la textura del suelo y su contenido de humedad, así como por el implemento usado, la velocidad y dirección de operación.

El arado corta, levanta y remueve la capa superficial del suelo, enterrando el rastrojo y residuos de cosecha, aireando el suelo a través de incrementar la porosidad del mismo y permitiendo un beneficioso control de malezas, enfermedades e insectos. La profundidad depende del equipo que se utilice. Para el caso de las plagas del suelo, se ha registrado un control de hasta el 70 por ciento si se deja un espacio de tiempo de ocho días entre el volteo y la labor siguiente (Campollo, 1999).

Algunas de las ventajas que presenta el arado de cinceles son: a) elimina los estratos compactados y el pie de arado, provocado por el paso sucesivo de discos a una misma profundidad, b) sustituye la utilización del subsolador, en los suelos que presentan compactación a profundidades menores a 0.45 m, c) puede sustituir en algunos casos un paso de rastro arado, d) no deja camellones o surcos muertos en su operación, como los arados de discos y conserva la estructura interna del suelo.

El método de operación que se utiliza es el de pasadas continuas. Los arados de cincel van montados sobre barras o marcos portaherramientas integrales (Figura 2), o en marcos portadores o chasis con llantas para su transporte, acoplados a la barra de tiro del tractor (Figura 3).



Figura 2. Arado de cinceles integral



Figura 3. Arado de cinceles de tiro

Volteo

El volteo se realiza con el implemento llamado “rastro arado”. Consiste en cortar, levantar y voltear el suelo, con el propósito de destruir el cultivo anterior, ayudar a controlar las malezas existentes, las plagas del suelo y laborar el suelo a profundidades mayores de 0.20 m, para permitir el establecimiento y desarrollo del cultivo. La profundidad de esta labor debe ser mayor en por lo menos 0.05 m a la profundidad del surcado, para garantizar que la semilla quedará sobre suelo laborado.

El rastrado se puede dirigir a dos tipos de suelo: a) áreas con pendiente media a quebradas o con presencia de piedras y b) áreas planas libre de piedras.

En áreas con pendiente media o quebradas o con presencia de piedras se necesitan rastras pequeñas, de 12 a 16 discos de 0.81 m (32 pulgadas) de diámetro, la profundidad de corte no debe ser menor de 0.20 m, se deben utilizar tractores de llanta de 170 a 320 HP, respectivamente, a una velocidad de 5-7 km por hora. En áreas con pendiente media, el rastrado se realiza en el sentido de los surcos anteriores, para lo cual se forman melgas para la circulación del equipo dentro del lote. Si el diámetro de los agregados quedaran muy grandes y se requiere un segundo paso, éste se hace de forma transversal o a 45° con respecto al primer paso, y en áreas con pendiente mayores al 50 por mil, el volteo se efectúa a favor de la pendiente.

En áreas planas libres de piedras se utilizan rastras de 20 a 24 discos de 0.81 m (32 pulgadas) de diámetro, la profundidad de corte no debe ser menor de 0.20 m, jaladas por tractores de llanta de 320 HP, a una velocidad de 7-8 km por hora.

Para realizar el volteo pueden emplearse arados de discos o de vertederas dispuestos en dos secciones de tiro excéntrico, montados sobre marcos portadores o chasis (Figura 4). La separación entre discos sobre la sección va de 0.35 a 0.45 m. El peso por disco es de 240 a 280 kg con una potencia requerida de 14 a 16 HP por disco en tractores de doble tracción.



Figura 4. Rastro arado de 20 discos de 81 cm (32 pulgadas)

Del área a trabajar las cabeceras alrededor se pueden hacer al inicio si las crestas de los surcos son muy altas para facilitar la vuelta del tractor e implemento (melgas de afuera hacia adentro), o al final de laborar el resto del área (melgas de adentro hacia afuera), tal como se muestra en las Figuras 5 y 6.

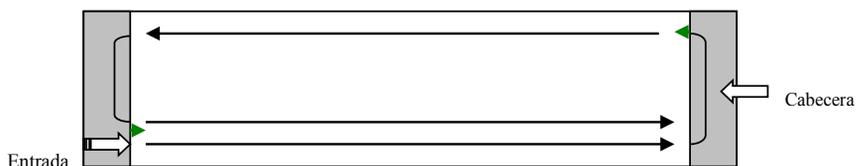


Figura 5. Método en melgas, de afuera hacia adentro

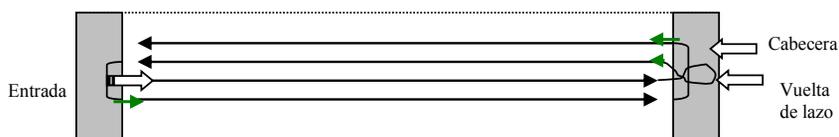


Figura 6. Método en melgas, de adentro hacia fuera

Si la cresta de los surcos es muy alta, el primer paso de volteo debe hacerse paralelamente a la dirección de los surcos del cultivo anterior, si fuera necesario un segundo paso, hacerlo diagonal, o perpendicular al primer paso. Por el contrario, si la cresta de los surcos del cultivo anterior no es tan alta, que dificulte el desplazamiento del tractor e implemento, el primer paso de volteo debe hacerse diagonal a la dirección de los surcos, y si es necesario un segundo paso, este será perpendicular al primer paso.

Verificar que el traslape entre una pasada y otra sea de 0.30 – 0.40 m, o la misma distancia que la separación entre discos, de lo contrario ajustar la dirección del tractor.

Verificar periódicamente que la profundidad del rastro arado esté alcanzando entre 0.24 a 0.27 m, ya que la máxima profundidad que se puede alcanzar es de $\frac{1}{3}$ del diámetro del disco. Generalmente, cuando la cresta de los surcos es alta, no permite alcanzar la profundidad deseada con el primer paso; por lo que se hace necesario un segundo paso.

Pulido

El pulido se realiza con el implemento conocido como “rastra”. El objetivo de esta labor es roturar y fraccionar los terrones producidos en el volteo o en el subsuelo, destruir e incorporar residuos vegetales y ayudar en el control de plagas del suelo. Un pulido de calidad asegura un mejor contacto entre el suelo y la semilla, lo que garantiza una buena germinación, así mismo una alta efectividad de los herbicidas. Sus principales funciones son desmenuzar los terrones que quedan después de las actividades anteriores, ayudar a destruir las cepas del cultivo anterior, a controlar las plagas del suelo, las malezas, hasta cierto punto ayuda a emparejar las protuberancias que quedan de las labores anteriores y a laborar el suelo entre 0.15 y 0.21 m para conformar una cama de suelo, en la que la semilla pueda germinar y emerger sin mayores dificultades.

En áreas con pendiente media a quebrada o con piedra se utilizan rastras de 28 discos de 0.66 m (26 pulgadas) de diámetro, jaladas por tractores de llanta de 170 caballos de fuerza, rastras de 66 discos de 0.61 m (24 pulgadas) de diámetro en áreas planas; jaladas por tractores de llanta de 320 caballos de fuerza. La velocidad de operación del equipo debe oscilar entre 7 y 10 km por hora, con desplazamiento transversal al volteo. Los discos están dispuestos en dos secciones de tiro excéntrico o en tándem, montados sobre marcos portadores o chasis (Figura 7) con una separación de discos sobre la sección que va de 0.20 a 0.25 m. El peso por disco fluctúa entre 85 y 100 kg. La potencia requerida es

de 4.5 a 5.5 HP por disco en tractores de doble tracción. Esta labor se realiza con el método de melgas como se muestra en las Figuras 5 y 6.



Figura 7. Rastra pulidora de tiro excéntrico

Subsolado

Para el subsolado se utiliza el implemento conocido como “subsolador”. Es una labor que tiene como finalidad romper las capas impermeables del suelo situadas por debajo de la profundidad normal del cultivo (pie de arado), con ello se persigue mejorar la infiltración de agua, el drenaje y la penetración de las raíces, lo cual conlleva a aumentar los rendimientos de las cosechas en forma efectiva (Campollo, 1999 y Rodríguez y Daza, 1995).

La necesidad del subsolador dependerá de una evaluación técnica apropiada, ya que es de alto costo. Para medir la compactación se utiliza generalmente el penetrómetro, que es un instrumento que mide la resistencia a la penetración, expresada por la presión (fuerza por unidad de superficie) necesaria para introducir la punta cónica del equipo de medida hasta una cierta profundidad del suelo. Esta variable no constituye por sí sola una medida directa del estado de compactación del suelo. La calidad del subsolado se mide por el grado de fracturación, y depende del contenido de humedad y la textura del suelo, el implemento y la velocidad de operación. La profundidad del subsolado y de las demás labores de preparación puede medirse con un instrumento sencillo llamado profundímetro, que no es más que una varilla sólida de metal,

graduada en centímetros, de 75 cm de largo y 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ pulgada) de diámetro.

Los implementos más utilizados para esta labor son los subsoladores parabólicos que tienen mayor eficiencia y constan de tres o cinco roturadores de 0.6 m de longitud, separados de 0.75 m a 1.00 m y dispuestos en la barra o marco portaherramientas integral o de tiro (Figura 8). La demanda de potencia varía entre 50 y 65 HP por roturador dependiendo del tipo de tractor, del grado de compactación, de la profundidad de labor y de la velocidad a que se trabaje. El método de operación que se utiliza es el de pasadas continuas (Figura 9). Durante la ejecución de la labor, el terreno deberá quedar descompactado a menos de 200 psi, presentando grietas entre los roturadores al paso del implemento (Figura 10).



Figura 8. Subsolador de tiro

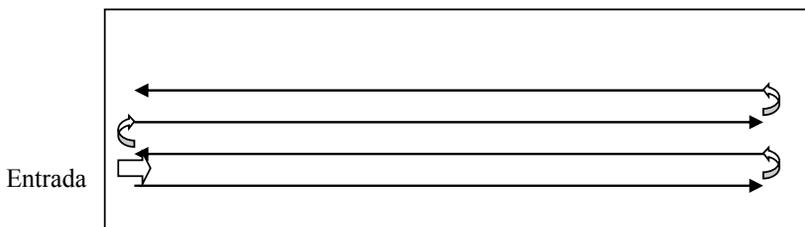


Figura 9. Método de subsolado en pasadas continuas

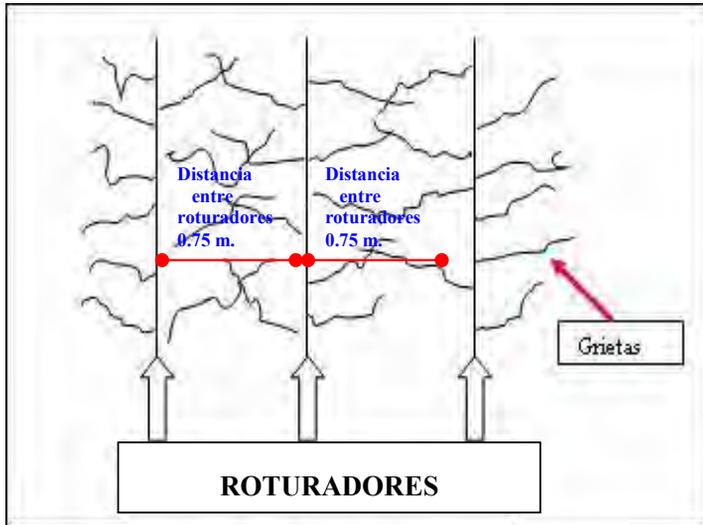


Figura 10. Roturación del suelo durante la labor

Surcado

El surcado se realiza con el implemento “surcador”. Consiste en abrir surcos paralelos, distribuidos en línea recta o siguiendo curvas previamente diseñadas y establecidas por el proceso de diseño agrícola, a distancias de 1.50 m ó 1.75 m, y a profundidades de 0.15 ó 0.25 m en labranza convencional, y de 0.25 a 0.35 m para siembras de humedad. El propósito es preparar una cama de suelo, en el que la semilla pueda acomodarse, germinar, emerger adecuadamente y permitir el desarrollo del cultivo. En adición al surcado, puede aplicarse fertilizantes granulados, a base de fósforo y/o potasio, e insecticida para el control de plagas del suelo, adaptando tolvas y mecanismos de descarga sobre la estructura de los surcadores (Figura 11). Esta labor puede hacerse con surcadores de dos, tres o hasta cuatro cuerpos, montados sobre una barra portaherramientas de tipo integral. La potencia requerida depende del tamaño y componentes del equipo utilizado, de la profundidad a la que se trabaje, de la velocidad de operación. La velocidad de operación en el campo es de 6 a 10 km por hora, en condiciones normales.



Figura 11. Surcador de tres cuerpos con equipo para aplicar fertilizante e insecticida

Calibración del implemento

Los pasos para la calibración del surcador son los siguientes:

- Colocar el tractor con el surcador en terreno plano.
- Verificar que la distancia entre cuerpos del surcador sea la requerida para el campo que se surcará.
- Graduar longitudinalmente el surcador, con el tercer punto de acople ó muñeco, para regular el ángulo de incidencia de los cuerpos surcadores.
- Graduar transversalmente el implemento, por medio de los brazos elevadores, hasta lograr que las puntas de cada cuerpo surcador toquen el suelo plano al mismo tiempo.
- Verificar que la profundidad de surcado en labranza convencional sea de 0.15 – 0.25 m y en siembra de humedad de 0.25 – 0.35 m.
- Ajustar la posición de los marcadores en los surcadores, hasta lograr que la distancia entre los surcos del traslape entre una pasada y la otra sea la misma, o con una variación menor al 5 por ciento.
- Actualmente existen sistemas de posicionamiento global (GPS), que apoyados con mecanismos de corrección a través de antenas RTK, permiten surcar sin necesidad de marcadores, y se logra una mejor equidistancia y paralelismo entre los surcos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Campollo, P. S. 1999. Fundamentos de mecanización agrícola para caña de azúcar. Ingenio Pantaleón. Guatemala. 43 p.
2. Storino, M.; Peche, A.; Hiroaki, S. A. 2010. Aspectos operacionais do preparo de solo. *In: Cana-de-açúcar*. Ed. Dinardo-Mirandda LL., Vasconcelos AN., Landell MG. Campinas. 1ª. Ed. – 1ª. Reimpresao. Sao Paulo, Brasil. pp. 547-572.
3. Rodríguez, C. A.; Daza, O. H. 1995. Preparación de Suelos. En: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cassalett, C.; Torres, J.; Isaacs, C. (eds.). Cali, Colombia. pp. 109-114.
4. Faveri, J. H.; Juárez, A. 1992. Manual de mecanización del campo cañero. Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar (GEPLACEA). México. 40 p.

SEMILLEROS Y SIEMBRA COMERCIAL

Werner Ovalle, José Luis Quemé, Héctor Orozco y Ovidio Pérez*

SEMILLEROS

Establecimiento de semilleros de caña de azúcar

En el establecimiento de plantaciones rentables de caña de azúcar uno de los componentes importantes es la planificación de semilleros para la obtención de semilla asexual de alta calidad. Esta semilla debe reunir varias características: la calidad genética, fisiológica, sanitaria y física. Para ello también se deben considerar varios factores que están relacionados con el establecimiento de los semilleros de caña de azúcar.

Ubicación, tamaño y planificación de siembra del semillero: El semillero se debe ubicar en un lugar estratégico a fin de reducir gastos de transporte a las áreas de otros semilleros o áreas comerciales a sembrar. El tamaño depende del área comercial final que se desea sembrar. Si se considera que se producirán semilleros básicos, semicomerciales y comerciales, entonces se obtendrían dos incrementos a partir del semillero básico. En términos generales, la tasa de multiplicación de tallos-semilla en caña de azúcar es 1:10, entonces el área del semillero básico deberá ser la milésima parte del área comercial final, o sea, que si se desea sembrar 1,000 hectáreas de caña comercial entonces el semillero básico deberá ser de 1 hectárea, el semillero semicomercial de 10 hectáreas y el comercial de 100.

Las fechas de siembra de los diferentes semilleros dependerán de la fecha en la cual se desea hacer la siembra comercial, para ello es necesario tomar en cuenta que la edad adecuada de la semilla es de siete meses para la mayoría de variedades. Un ejemplo puede ser el siguiente: si se desea hacer la siembra comercial el 15 de enero de 2014, entonces la siembra del semillero comercial sería el 15 junio de 2013; la siembra del semillero semicomercial el 15 de noviembre de 2012 y la del semillero básico el 15 de abril de 2012. Eso significa que la planificación de una siembra comercial debe hacerse con dos años de anticipación. Es importante tomar en cuenta la disminución del tiempo entre el corte de la semilla y establecimiento del semillero o la siembra comercial.

* Werner Ovalle es Ing. Agr., M.Sc., Fitopatólogo; José Luis Quemé es Ing. Agr. Ph.D., Fitomejorador; Héctor Orozco es Ing. Agr., M.Sc. Coordinador del Programa de Variedades; Ovidio Pérez es Ing. Agr., M.Sc., Coordinador del Programa de Agronomía de CENGICANA. www.cengicana.org

Manejo de las áreas antes de la siembra de los semilleros: Antes de plantar semilleros de caña de azúcar se recomienda la ubicación de áreas, cuyo rendimiento potencial de caña esté por encima del promedio de la finca e idealmente con disponibilidad de riego (South African Sugar Association, 1999). Es conveniente dividir el área en tres partes: un tercio para semilleros en primera soca, un tercio para semilleros en plantía y un tercio en descanso en espera de la siguiente plantía. El manejo adecuado de plantaciones anteriores evita la presencia de restos de cosecha o macollas, que se pueden constituir en mezclas dentro de la variedad deseada y que podrían estar infectadas con patógenos causantes de enfermedades. Para ello se recomienda la requema de rastrojos de la cosecha anterior, cuando la basura esté seca. Posteriormente, se deben matar las cepas de la variedad anterior, con herbicida, 35 a 40 días después de la cosecha. La dosis recomendada es de 4 a 5 litros por hectárea de Glifosato (Montepeque, 2007).

Se han evaluado rotaciones con leguminosas para su incorporación como abonos verdes en las áreas destinadas a semilleros, y los resultados son prometedores, en el tercio del área en espera. Las rotaciones con abonos verdes además de proveer nitrógeno, mejorar la estructura y conservar el suelo, tienen la finalidad de romper o interrumpir el ciclo de plagas y enfermedades del suelo, y restaurar la biodiversidad del mismo. Se recomienda la rotación ya sea con *Crotalaria juncea* o con *Cannavalia ensiformis*. Estas dos especies de plantas leguminosas se adaptan muy bien a las condiciones edafoclimáticas en donde se siembra caña de azúcar en la costa sur de Guatemala. Se ha estimado que *C. juncea* en suelos relativamente pobres puede producir hasta 35 toneladas métricas de biomasa fresca por hectárea con un aporte total de 235 kilogramos de nitrógeno por hectárea. Bajo condiciones climáticas más favorables y en suelos de alta fertilidad *C. juncea* puede producir hasta 50 t de biomasa, con un aporte total de más de 300 kg de N/ha (Pérez *et al.*, 2008, Balañá *et al.*, 2010).

La preparación del suelo para la siembra de las leguminosas coincide con las labores convencionales utilizadas para el cultivo de la caña de azúcar. De una a dos semanas después de la aplicación del herbicida para matar las cepas viejas, se realiza el volteo que, dependiendo del suelo, consiste en una o dos pasadas de rastra pesada y luego de una o dos pasadas de rastra liviana –pulido–. Ésto garantiza una buena cama para la germinación de la semilla de las leguminosas. La siembra de la planta de rotación se hace inmediatamente después del pulido, sembrando en hileras con un distanciamiento de 0.5 a 0.6 metros entre hileras para ambas leguminosas. Para *C. juncea* se recomienda sembrar de uno a dos granos por postura, con distanciamiento de 0.10 metros entre posturas, en tanto que para *C. ensiformis* se recomienda sembrar uno o dos granos por postura a cada 0.2 metros entre posturas. Con esos distanciamientos, la cantidad promedio

de semilla utilizada es de aproximadamente 15-20 kg/ha en el caso de *Crotalaria* y de 100-150 kg/ha para *Cannavalia*.

Dependiendo del estrato altitudinal y la época de siembra, la máxima acumulación de biomasa ocurrirá entre los 60 y 75 días después de la siembra en el estrato bajo, y esto en la mayoría de los casos corresponde con el apareamiento de la floración. En el estrato alto donde el crecimiento es más lento esto puede extenderse hasta los 120 días. La incorporación de la biomasa se realiza en forma mecánica, a través de dos pasadas de rastra que permitan una buena incorporación del material a una profundidad de 0.15 m a 0.20 m. El surqueo y siembra de la semilla de caña de azúcar se debe efectuar en las primeras dos semanas después de la incorporación, para aprovechar de mejor manera la disponibilidad de nitrógeno proveniente de la mineralización del abono verde.

Tratamiento hidrotérmico de la semilla: Para el control de patógenos sistémicos, como los causantes de las enfermedades Raquitismo de las socas (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*) y Escaldadura foliar (*Xanthomonas albilineans*) es importante el tratamiento hidrotérmico. Ello se ha demostrado por los incrementos en la producción de azúcar por unidad de área que ocurren al eliminar esos patógenos. Para *L. xyli*, los promedios de las diferencias en producción de nueve variedades sanas e infectadas fueron de 7.88 por ciento, 16.47 por ciento y 21.38 por ciento, en caña plantía, primera soca y segunda soca, respectivamente, lo cual significó hasta 26.9 toneladas de caña por hectárea en promedio en la segunda soca (Ovalle y García, 2006). Para *X. albilineans* las diferencias en producción de azúcar entre plantas sanas y enfermas fueron de 8.69 por ciento y 2.48 por ciento para dos variedades con diferente grado de susceptibilidad a la enfermedad (Ovalle, 2002). Debido a las diferencias en la resistencia de *L. xyli* y *X. albilineans* al efecto del calor, se han determinado experimentalmente los tratamientos adecuados para cada uno de los casos (CENGICANA, 2001; Egan y Sturgess, 1980).

Para *L. xyli* se recomienda cualquiera de los siguientes dos tratamientos: a) Tratamiento por inmersión en agua caliente a 51°C por 10 minutos, seguido por reposo fuera del agua durante 8 a 12 horas y, finalmente, inmersión en agua caliente a 51°C por una hora; b) Inmersión en agua caliente a 52°C por 30 minutos. En ambos casos se deberá usar trozos de semilla con una o dos yemas. Se ha demostrado que cualquiera de los dos tratamientos descritos es capaz de disminuir la cantidad de células de *L. xyli* hasta niveles no detectables por la prueba serológica “dot blot immunoassay”, pero con el tratamiento a 52°C por 30 minutos puede ocurrir mayor pérdida de germinación de las yemas (siete por ciento más de pérdida, en promedio de tres variedades) (Ovalle *et al.*, 2001). Si hay antecedentes de pudrición de los trozos de semilla por infecciones con hongos del suelo o infestaciones con termitas, es conveniente que después del tratamiento

con agua caliente se protejan los cortes, haciendo inmersión en fungicida (Carboxin+Captán) a 25 gramos por galón, y de insecticida (Fipronil) a 8 cc por galón durante dos minutos (Azañón *et al.*, 2005). Es importante insistir en que la inmersión en el fungicida e insecticida sólo se recomienda si han ocurrido problemas en siembras anteriores en las áreas utilizadas. La mayoría de las variedades evaluadas por CENGICANA han mostrado incrementos en la producción de caña cuando son tratadas térmicamente y se comparan con material infectado por *L. xyli*. Por lo tanto, es recomendable la inclusión del tratamiento hidrotérmico para el control del Raquitismo de las socas en cualquiera de las variedades que se utilice comercialmente.

Para *X. albilineans* se recomienda la inmersión de trozos de una o dos yemas en un flujo constante de agua, a temperatura ambiente durante 48 horas. Puede hacerse en una pila con una entrada regulada de agua que permita el rebalse continuo para renovar el agua y evitar así la ocurrencia de fermentación. Luego los trozos se sumergen en agua a 50°C por tres horas. Steindl, citado por Egan y Sturgess (1980), demostró que dicho tratamiento es capaz de eliminar completamente la infección por la bacteria causante de la Escaldadura foliar. Si se tienen los cuidados necesarios para evitar la reinfección por *X. albilineans*, los tratamientos en los ciclos posteriores pueden hacerse a 52°C por 30 minutos (tratamiento usado para el control de *L. xyli*). Debido a que algunas variedades son resistentes a la infección por *X. albilineans*, no es necesario someterlas al tratamiento hidrotérmico específico para esa bacteria.

Cuidados que se deben tener para evitar reinfecciones por patógenos sistémicos: Los patógenos sistémicos son aquellos hongos, bacterias o virus que se encuentran, en al menos una etapa de la infección, localizados dentro del sistema vascular de la planta y/o dentro de sus tejidos. Debido a esta situación, una vía importante de diseminación de enfermedades sistémicas en la caña de azúcar es a través del uso de trozos de semilla infectados. Como ya se mencionó, es posible obtener trozos de semilla libres de patógenos sistémicos, los cuales darán origen a plantas sanas en el semillero, sin embargo pueden ocurrir reinfecciones, las que deben evitarse para mantener semilla de buena calidad.

Tanto para Raquitismo de las socas como para Escaldadura foliar, las bacterias causantes pueden transportarse en la herramienta, por lo cual se deben seguir las recomendaciones que se detallan a continuación: 1) Uso de herramienta, equipo y vestuario específicos para labores en los semilleros. 2) Evitar el uso de maquinaria en áreas de semilleros, después de haber sido utilizada en campos comerciales. 3) Desinfección de machetes por inmersión durante 30 segundos en una solución de Yodo al 5 por ciento (Victoria *et al.*, 1985), o por lavado con detergente y posterior flameo con alcohol al 95 por ciento. (Ovalle y Nelson, 2005). En labores efectuadas en el semillero (limpias o corte de semilla), tal

desinfección deberá hacerse con la mayor frecuencia posible. Se ha observado que los cuidados indicados eliminan la posibilidad de reinfecciones en material libre de *L. xyli* (Victoria *et al.*, 1985; Ovalle y Nelson, 2005). 4) Para el caso de Escaldadura foliar, si se observan macollas con síntomas de la enfermedad en los semilleros se deben eliminar, aplicando el herbicida Glifosato (Roundup líquido) a razón de entre 250 y 500 centímetros cúbicos en 20 litros de agua, de la siguiente manera: con la mano cubierta con un guante de látex clorinado y con un calcetín se introduce la mano en la solución de Glifosato para empapar la cubierta. En seguida, se frota la parte superior de la macolla que se desea eliminar cuidando de cubrir el cogollo hasta la punta de las hojas. Inmediatamente, se dobla la punta de la macolla para dejarla marcada. El efecto se observa de 8 a 10 días después del tratamiento y tiene la ventaja de evitar daños a las macollas vecinas y la diseminación mecánica de la bacteria (Mayén, 2007; Sáenz, 2007).

El procedimiento descrito anteriormente también se puede utilizar para eliminar macollas de caña de variedades no deseadas (voluntarias o mezclas en el surco) y de pasto Johnson (*Sorghum halepense*) o plantas de caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) que estén ubicadas dentro del surco de los semilleros de caña de azúcar. Es importante indicar que todos los cuidados descritos para lograr semilleros libres de las enfermedades sistémicas causadas por *L. xyli* y *X. albilineans* serán de poca utilidad, si el manejo de plantaciones comerciales no contempla también ciertas precauciones para disminuir las reinfecciones. Básicamente, se trata de la desinfección de la herramienta de corte, la cual podrá hacerse de la manera recomendada para semilleros, con la mayor frecuencia posible (al menos cada vez que se cambie de pante o lote) y aunque inicialmente represente disminuciones en la eficiencia de corte, el beneficio obtenido pagará con creces.

Muestreo de semilleros para detección de los patógenos causantes del Raquitismo de las socas y Escaldadura foliar

Edad de la planta: Para la detección de infecciones por la bacteria causante del Raquitismo de las socas, los mejores resultados se obtienen a partir de los siete meses de edad. Para la detección de infecciones por la bacteria causante de la Escaldadura foliar, los muestreos pueden hacerse a partir de los cuatro meses de edad; sin embargo, por cuestiones prácticas es mejor si se aprovechan los tallos del muestreo para Raquitismo, a los siete meses de edad.

Tamaño de la muestra: Sin importar el tamaño (área) del semillero, la muestra para análisis de laboratorio debe ser de 50 tallos. Los 50 tallos se obtendrán en forma aleatoria, cubriendo la totalidad del área del semillero, sin importar si se

trata de tallos primarios, secundarios, terciarios o “mamones” y, por lo tanto, sin importar su grosor.

Porción útil de los tallos: Para la detección de la bacteria causante del Raquitismo de las socas (*L. xyli*), se necesita la porción basal del tallo (tercio inferior). Por lo tanto, los tallos se cortan a ras del suelo y se envían al laboratorio 50 trozos, con los cuatro o cinco entrenudos de la base, todos en la misma posición (las bases hacia el mismo lado). Mientras que para detectar la bacteria causante de la Escaldadura foliar (*X. albilineans*), se necesita la porción superior del tallo (tercio superior). Por lo tanto, se cortan los tallos a la mitad y se envían al laboratorio 50 trozos con la mitad superior de los tallos despuntados, todos en la misma posición (las puntas hacia el mismo lado).

Identificación de las muestras: A cada maletín o paquete de 50 tallos se le debe adherir una etiqueta con la siguiente información: Fecha, ingenio, nombre de la finca, número de lote, variedad, edad del semillero, categoría de semillero (básico, semicomercial o comercial), área total del semillero y análisis solicitado.

Crterios de calificación de semilleros por categorías

Tomando en cuenta los resultados de análisis de laboratorio, a siete meses de edad (incidencias de Raquitismo de las socas y Escaldadura foliar), evaluaciones de campo a los cuatro meses de edad (pureza genética, incidencia de Carbón, Roya marrón, Roya naranja y Mosaico) y otros factores, se definirá si un semillero califica como fuente de material para el establecimiento de la siguiente categoría de semillero o para la siembra comercial. Los criterios en pureza genética y enfermedades sugeridos para la categorización de semilleros se pueden observar en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Límites máximos permisibles según categoría de semillero

CRITERIOS	Categoría de semillero		
	Básico	Semicomercial	Comercial
Pureza genética %	99	99	99
RSD	≤ 2	≤ 2	≤ 4
Carbón	0	0	0
Escaldadura	≤ 2	≤ 2	≤ 4
Roya marrón *	≤ 10/5	≤ 10/5	≤ 10/5
Roya naranja **	≤ 10/5	≤ 10/5	≤ 10/5
Mosaico	<1	≤ 5	≤ 5

* Evaluar hoja + 3, **Evaluar hoja + 7

Siembra comercial

El cultivo comercial de la caña de azúcar se caracteriza por producir varios años, a partir de una siembra. Esta situación hace importante considerar varios factores que intervienen en la fase inicial del cultivo, de los cuales dependerá un buen desarrollo y la obtención de una buena cosecha. Por ello es necesario considerar, además de la preparación del suelo y los semilleros, (descritos en secciones anteriores) la siembra de la caña de azúcar.

La siembra incluye la obtención de la semilla de los semilleros, la fertilización, la distribución de la semilla en el surco, el tapado o cubrimiento de la semilla con suelo, la aplicación de riego de germinación y la evaluación de la población (brotes) en la fase inicial (Subiros, 1995; Bakker, 1999).

Variedades y fecha de siembra

Para la elección de las variedades que se sembrarán se recomienda consultar el “Directorio de Variedades” (descrito en el capítulo de Mejoramiento Genético) el cual fue elaborado por el Programa de Variedades de CENGICAÑA y el Comité de Variedades de la Agroindustria Azucarera de Guatemala. Este directorio incluye las variedades comerciales actuales y las variedades nuevas que se encuentran en desarrollo comercial. Es una matriz, en cuya primera fila van los meses de siembra/cosecha (de noviembre a abril) y en la primera columna aparecen los estratos altitudinales, por lo tanto las variedades están ubicadas en el mes y estrato donde se optimizan las toneladas de azúcar por hectárea y otras características de interés.

Calidad de la semilla

La semilla debe reunir diferentes características, como, la calidad genética (pureza varietal), sanitaria (libre de enfermedades y plagas), física (vigor del tallo, sin daños mecánicos, contaminantes y otros) y fisiológica (Tarenti, 2004). Para la calidad fisiológica se debe considerar: edad de la semilla, yemas en buen estado y con buen poder germinativo, tiempo entre el corte y siembra, y otros. Estos elementos tienen que ser considerados en todo el proceso de producción de los semilleros, en donde al final se evalúan para definir si cumplen con los requisitos necesarios para su uso.

Densidades y sistemas de siembra

Método de surco simple: Es el más utilizado en Guatemala. Se deben preparar paquetes de semilla de 30 esquejes con longitud aproximada de 0.60 m y de

preferencia con 3-4 yemas por esqueje. La distancia entre surcos puede variar entre 1.5 m y 1.75 m, dependiendo de la topografía, potencial de producción del campo, altitud, variedad y otros factores como el tipo de cosecha y la disponibilidad de maquinaria adecuada para cada caso. La siembra se realiza manualmente y los esquejes se pueden distribuir en diferentes modalidades, siendo una de ellas la de “cadena doble traslapada”, con la cual se logra ubicar aproximadamente 15 yemas viables por metro lineal cuando la semilla es de buena calidad, garantizando de esta manera una buena densidad poblacional en los surcos. El distanciamiento para distribuir un paquete de 30 esquejes de semilla en el surco (estaquillado) depende de la variedad y la calidad de la semilla, por lo regular son 9 m. Según Orozco *et al.*, 2000, en estudios realizados por CENGICANA, se ha demostrado que estaquillados a 12 m muestran resultados similares a los de 9 m. La profundidad de siembra oscila entre 0.20 m y 0.35 m. En la siembra tradicional, la semilla debe quedar tapada aproximadamente con 0.05 m de suelo, mientras que en las siembras de humedad la cobertura debe estar entre 0.10 m y 0.15 m.

Método de surco doble: A este método se le conoce también como “Surco australiano” o “Tipo Piña”. La distancia entre surcos simples de cada par de surcos pueden ser entre 0.40 m y 0.70 m, y la distancia entre los pares de surcos pueden variar entre 1.40 m y 1.80 m. Con este tipo de modificaciones se aumenta la densidad de tallos por hectárea, por lo cual se deberán considerar los correspondientes ajustes en los niveles de fertilización, dosis de maduradores, y otros.

Fertilización y riegos de germinación

El fósforo se debe aplicar al momento del surqueo, y la cantidad a aplicar depende del tipo de suelo y del contenido de fósforo en los análisis de suelos. La lámina de riego depende de la textura del suelo, haciendo el primer riego de germinación entre el tapado de la semilla hasta 24 horas después de sembrado, aplicando una lámina aproximada de 30 mm. El segundo riego de germinación se realiza entre 8 y 10 días después del primer riego de germinación, aplicando una lámina de 40 mm. En el sistema tipo piña se puede utilizar el riego por goteo, colocando las mangueras de distribución en el centro de los dos surcos pares.

Evaluación de la población y resiembra

La evaluación de la población tiene como propósito determinar el éxito de la siembra y tomar decisiones en caso de resiembras. Entre 30 y 40 días después de la siembra, se debe realizar un conteo de la población (brotes por metro lineal), actualmente se considera adecuada una población de 10 brotes por metro

lineal, asumiendo cerca de 70 por ciento de germinación. Cuando existan espacios de más de 0.75 m sin caña, se debe realizar resiembra únicamente en esos espacios vacíos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Azañón, V.; Portocarrero, E.; Solares, E.; Guevara, L.; Ovalle, W. 2005. Efecto de tres calidades de semilla en la producción de dos variedades de caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2004-2005. Guatemala, CENGICANA. pp. 54-58.
2. Balañá, P.; Pérez, O.; Alfaro, M. A.; Fernández, M. V. 2010. *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis* and *Mucuna* sp. As Possible Nitrogen Sources for Fertilisation in Sugarcane Commercial Nurseries. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27.
3. Bakker, H. 1999. Sugar cane cultivation and management. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York.
4. BSES. Sugarcane for the future. Ratoon Stunting Disease.
5. <http://www.bses.org.au/InfoSheets/IS05053.pdf>. Consulta del 23-07-07. 9:25 a.m.
6. Egan, B.T.; Sturgess, O. W. 1980. Commercial control of leaf scald disease by thermotherapy and a clean seed programme. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., 26:1602-1606.
7. Mayén, Mario. 2007. Comunicación personal. Febrero 2007.
8. Montepeque, Romeo. 2007. Comunicación personal. Febrero 2007.
9. Orozco, H.; Ceballos, L.; Azañón V. 2000. Aumento de la distancia de estaquillado. Una opción viable para la reducción de la cantidad de semilla agámica por unidad de área. En: Memoria Presentación de resultados de investigación. Zafra 1999-2000. Guatemala, CENGICANA. pp. 31-37.
10. Ovalle, W.; López, E.; Cojtín, J.; Azañón, V.; González, A.; Oliva, E. 2002. Efecto de cuatro enfermedades en la producción de la caña de azúcar en la zona sur de Guatemala. En: MEMORIA. 14 Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica. pp. 93-99.

11. Ovalle, E.; García, S. 2006. Efecto de la enfermedad del Raquitismo de las socas (*Leifsonia xyli* subs. *xyli*) en el rendimiento de caña de nueve variedades. Segunda soca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 95-99.
12. Ovalle, W.; López, E.; Oliva, E. 2001. Evaluación de cinco tratamientos hidrotérmicos para el control de Raquitismo de las socas. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2000-2001. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 63-65.
13. Ovalle, W.; Nelson, A. 2005. Efecto de la enfermedad del Raquitismo de las socas (*Leifsonia xyli* subs. *xyli*) en la producción de nueve variedades. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2004-2005. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 49-53.
14. Pérez, O.; Hernández, F.; López, A.; Balañá, P.; Solares, E. y Maldonado A. 2008. El uso de abonos verdes como alternativa para mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo de la caña de azúcar. Sugar Journal, Vol. 70, No. 9. 14-21 p.
15. Sáenz, Oswaldo. 2007. Comunicación personal.
16. Soto, G.; Orozco, H.; Ovalle, W. 1997. Multiplicación y certificación de semilla asexual de caña de azúcar (*Saccharum* spp) para la Agroindustria Azucarera Guatemalteca. Guatemala, CENGICAÑA. Documento Técnico No. 12. 37 p.
17. Subiros Ruiz, F. 1995. El cultivo de la caña de azúcar. San José C. R. Ed. UNED reimpresión 2000. 448 p.
18. South African Sugar Association. Experimental Station. 1999. Seedcane. Good quality seedcane. Information Sheet. 3 p.
19. Tarenti, O. 2004. Calidad de semilla, lo que implica y como evaluarla. Consultado 17 de Agosto de 2011. http://www.inta.gov.ar/sanluis/info/documentos/Semillas/Cal_semillas.htm
20. Victoria, J. I.; Guzmán, M. L.; Ochoa, O. 1985. Chemicals used to disinfect tools in order to limit the spread of ratoon disease of sugarcane. CENICAÑA. Colombia. Documento Técnico No. 69. 8 p.

VI. MANEJO Y CONTROL DE MALEZAS

MANEJO Y CONTROL DE MALEZAS

Gerardo Espinoza*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del control y manejo de malezas ha tenido varias fases, iniciando con el uso intensivo de los herbicidas, seguida de la integración de secuencia de labores mecánicas y uso de herbicidas como segunda línea de defensa, rotación de moléculas de herbicidas, reducción de dosis y aplicación de moléculas menos contaminantes y control de malezas por medio del uso de agricultura de precisión, uso de abonos verdes y uso de variedades tolerantes a herbicidas.

El periodo crítico de interferencia de las malezas en la producción de caña de azúcar se da en los primeros 120 días después del corte o de la siembra. Por ello, en la Agroindustria Azucarera se aplican herbicidas preemergentes y posembrantes como base para el control de malezas, así mismo se combinan con controles mecánicos que ayudan en alguna manera al control de las mismas. Dentro de las malezas más importantes para la zona están: *Cyperus rotundus*, *Rottboellia cochinchinensis*, malezas de la familia Convulvulaceae (*Ipomoea* y *Merremia*), *Sorghum halepense*, *Cynodon dactylon*, entre otras. Estas malezas causan una serie de complicaciones en el manejo del cultivo, las que se resumen en pérdidas de producción y gastos excesivos en su control. Para ello es importante conocer las estrategias para la selección de los herbicidas, los cuales deben estar fundamentados en criterios técnicos relacionados con las variables ambientales, edafo-climáticas, prácticas culturales y las propiedades físico-químicas del herbicida seleccionado. El objetivo de este capítulo es describir el manejo y las recomendaciones racionales de manejo de malezas en el cultivo de caña de azúcar en la Agroindustria Azucarera de Guatemala.

PRINCIPALES MALEZAS EN LA ZONA CAÑERA DE GUATEMALA

Las malezas más importantes de la zona cañera de Guatemala se indican en orden de importancia en el Cuadro 1. Coyolillo (*Cyperus rotundus*), es la

* Ing. Agr., M.Sc., Especialista en Malezas y Madurantes de CENGICANA www.cengicana.org

maleza más importante con mayor presencia en los estratos bajos (40-100 msnm) y litoral (< 40 msnm) predominando en suelos de textura franco a franco arenosa (Figura 1).

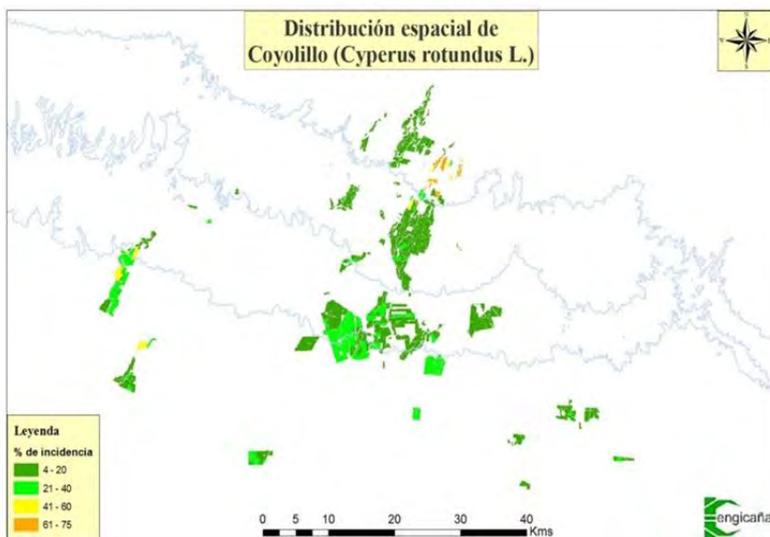


Figura 1. Comportamiento y distribución de coyolillo (*Cyperus rotundus*). Ufer y Mejia, 2010

La caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) es la maleza que ocupa el segundo lugar en importancia y es una de las malezas más difíciles de controlar debido a su biología y su alta competencia con la caña y su rápido crecimiento. Las malezas presentes en la agroindustria azucarera no solo afectan en los primeros días de crecimiento del cultivo, sino que algunas como las de la familia Convulvulaceae (*Ipomea* y *Merremia*), por su tipo de crecimiento, invaden los tallos de caña al final de su ciclo, y causan problemas al momento de la cosecha con pérdidas en la eficiencia en el corte del cultivo. En los últimos años se ha observado un difícil control de dos especies de malezas presentes en toda la zona cañera: *Momordica charantia* y *Croton lobatus*, y que hasta el momento se desconoce si poseen algún tipo de tolerancia a ciertos herbicidas utilizados en Guatemala. Por último existen algunas gramíneas difíciles de controlar debido a su sistema de reproducción como es el caso de *Sorghum halepense* y *Panicum maximum*.

Cuadro 1. Principales malezas, según su orden de importancia en la agroindustria azucarera de Guatemala

No.	Maleza	Nombre técnico
	Ciperáceas	
1	Coyolillo, coquito	<i>Cyperus rotundus</i>
	Gramíneas	
2	Caminadora	<i>Rottboellia cochinchinensis</i>
3	Plumilla o pajilla	<i>Leptocloa filiformis</i>
4	Pasto Johnson, johnson, sorgo, sorgo forrajero	<i>Sorghun halepense</i>
5	Zacatón, guinea, zacate Jamaica	<i>Panicum maximum</i>
6	Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>
	Hojas Anchas	
7	Bejuco peludo	<i>Merremia quinquefolia</i>
8	Campanilla, lavaplato, quiebracajetes	<i>Ipomoea nil</i>
9	Campanilla, quimamul, bejuco	<i>Ipomoea triloba</i>
10	Jaibilla, melón amargo	<i>Momordica charantia</i>
11	Papayita, manita crotón	<i>Croton lobatus</i>
12	Falsa verdolaga,	<i>Trianthema portulacastrum</i>
13	Verdolaga, portulaca	<i>Portulaca oleraceae</i>
14	Verdolaga de playa	<i>Kallstroemia maxima</i>

Interferencia de malezas con el cultivo

El término interferencia se refiere a la sumatoria de presiones que sufre un determinado cultivo como resultado de la presencia de malezas en el ambiente común, incluyendo los conceptos de competencia y alelopatía. Las malezas tienen la capacidad de competir por recursos limitantes del medio (principalmente agua, luz y nutrientes), por liberar sustancias alelopáticas, hospedar plagas y enfermedades, y sobre todo afectan los rendimientos del cultivo disminuyendo el número de cortes de la plantación.

El grado de interferencia depende entre otros factores de la duración del periodo de competencia y de la época de ocurrencia, modificados por factores edáficos y climáticos y por factores de manejo. Aunque es importante mencionar que el propio cultivo tiene la capacidad de limitar el desarrollo de las malezas, principalmente por medio del sombreado.

Según Meirelles *et al.*, 2009, existen tres tipos de periodos críticos de interferencia de malezas: a) periodo anterior a la interferencia (PAI), b)

periodo total anterior a la interferencia (PTPI) y c) periodo crítico de prevención a interferencia (PCPI).

El periodo anterior a la interferencia (PAI) se refiere al periodo desde la brotación de la caña de azúcar con malezas, pero sin interferencia negativa en la producción final de tallos.

El periodo total anterior a la interferencia (PTPI) se refiere al periodo desde la brotación de la caña de azúcar, en que el cultivo debe permanecer libre de malezas sin pérdida significativa de producción.

El periodo crítico de prevención a interferencia (PCPI), es cuando efectivamente los métodos de control deben actuar para minimizar las pérdidas de producción (Figura 2).

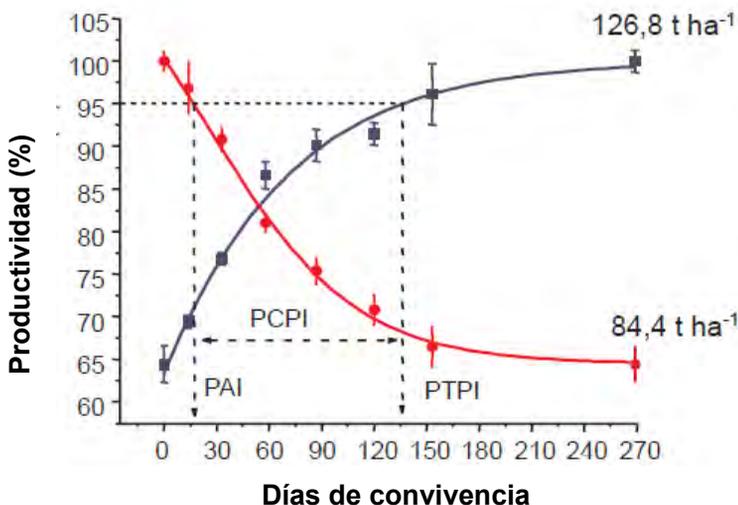


Figura 2. Producción porcentual de caña de azúcar, observada (cuadros azules) y estimada por la ecuación sigmoide de Boltzman (círculos rojos), en función de periodos iniciales de convivencia y control de malezas (Meirelles *et al.*, 2009)

En Guatemala se han realizado estudios para determinar el periodo crítico de interferencia de las malezas. Para el estrato alto (>300 msnm) el periodo crítico es de 63 días después de la siembra, mientras que para el estrato medio (100-300 msnm) el periodo es de 57 días. Aunque no hay datos puntuales para los estratos bajo y litoral, la experiencia indica que debe ser menor a los 40 días

después de la siembra ya que las condiciones de suelo y agua hacen que la competencia sea más fuerte.

Métodos de control de malezas

En Guatemala se utilizan dos métodos de control de malezas en el cultivo de caña de azúcar: a) control mecánico y b) control químico.

Control mecánico: Se refiere al paso de diferentes implementos como parte de las diferentes labores mecánicas que se realizan en el cultivo. Entre las labores mecánicas está el paso de cultivadora (botado de mesa) cuyo objetivo es nivelar el surco o camellón entre las hileras de caña de azúcar en caña plantía. Esta labor se hace a los 40 ó 50 días después de la siembra o corte, dando un control aproximado de 15 días, según condiciones de infestación; opcionalmente puede hacerse un segundo paso de cultivadora entre 55 y 65 días después del corte, logrando un manejo integral con el control químico.

En caña soca el paso del ferticultivo será a los 45 días después del corte, es decir después de la aplicación preemergente de malezas. Un segundo control mecánico se puede realizar con el cultivo a los 60 días después del corte.

Control químico: Consiste en la aplicación de herbicidas. Este método es de amplio y fácil uso en el cultivo de la caña de azúcar y con buenos resultados de control. Para lograr un periodo más amplio de días control se hace una combinación de los dos métodos indicados. La aplicación de herbicidas se puede hacer de tres maneras: a) mecanizada, b) manual y c) aérea.

- **Aplicación mecanizada:** Es la más utilizada en Guatemala, y consiste en la aplicación de herbicidas en preemergencia y poseemergencia, por medio de tractores de 120 HP. Estos tractores están conformados por un tanque de depósito para la mezcla y un aguilón con 25 boquillas dependiendo del tipo de la misma y una faja de 12 m de ancho. Este tipo de aplicación generalmente es para áreas planas, con el fin de que sea más eficiente. Cuando se realizan aplicaciones posemergentes en caña de mayor desarrollo (hasta 1.5 m) se emplean tractores tipo “High Crop”.
- **Aplicación manual:** Éstas se practican donde no es posible el control de malezas de manera mecanizada por el desarrollo de la caña (de cierre) o en áreas de topografía irregular. También se realiza para controlar malezas en áreas específicas o pequeñas áreas infestadas en el lote (parchoneo). Para este tipo de aplicación de herbicidas se utilizan bombas de mochila de presión constante, las cuales son más eficientes que las tradicionales. Esta práctica es

más costosa que la mecanizada por ello se debe analizar el uso en áreas que sí lo ameriten.

- **Aplicación aérea:** Se utilizan solamente para aplicaciones de herbicidas preemergentes en áreas planas, alejadas de otros cultivos, por la deriva que pueda ocasionar.

FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS HERBICIDAS

Factores ambientales

Radiación solar. Existen herbicidas que tienen altas pérdidas por evaporación, que provocan disminución de la eficacia en el control de malezas. Estas pérdidas se dan por fotodescomposición de la molécula de los herbicidas debido a la radiación solar (radiación ultravioleta). La degradación de los herbicidas es inducida cuando los mismos son aplicados en superficie de suelo seco, sin irrigación o lluvia posterior a la aplicación. Por ello cuando se aplica un herbicida preemergente sensible se recomienda su incorporación al suelo para garantizar la eficiencia del producto y su efecto residual. Esta operación puede ser realizada con irrigación o con agua de lluvia.

Precipitación (humedad). Las lluvias interfieren en la acción de los herbicidas, dependiendo del momento en que ocurren. La ocurrencia de lluvias días antes de la aplicación de herbicidas aumenta el contenido de agua en el suelo y en la parte aérea hidrata las ceras de la superficie de la hoja de las malezas, esto aumenta la susceptibilidad de la planta a los herbicidas mejorando el grado de control.

La influencia de la lluvia en la absorción de herbicidas por medio de las hojas también depende de las características de cada producto, pues algunos son absorbidos rápidamente y otros lentamente. Herbicidas formulados en aceite son menos afectados por la lluvia que los formulados en agua. El tiempo necesario para la absorción de los herbicidas aplicados en posemergencia por las plantas es de gran importancia. Este varía según el herbicida, pero generalmente oscila entre los 30 minutos. Plantas sometidas a estrés prolongado de humedad pueden presentar cutícula más espesa, más pubescencia y consecuentemente, la absorción de un herbicida y su translocación serán menores, debido a la menor actividad metabólica.

Los herbicidas deben ser aplicados cuando la humedad de la capa superficial del suelo es adecuada, para favorecer el enlace de las moléculas del herbicida

con la fase sólida del suelo reduciendo los riesgos de pérdidas a la atmósfera. En aplicaciones de herbicidas preemergentes, la humedad del suelo es importante por la dispersión de esos productos en el suelo, alcanzando, de ese modo, las semillas o raíces de las malezas.

Temperatura. La temperatura del aire influye de muchas maneras en la acción de los herbicidas, pues pueden modificar las propiedades físicas, como solubilidad, presión de vapor y alterar los procesos fisiológicos de las plantas.

De manera general, dentro de los límites fisiológicos de cada planta, la absorción de los herbicidas por las hojas aumenta con la temperatura. La temperatura alta aumenta la cutícula de las hojas y afecta la actividad metabólica de las plantas, también favorece la volatilización de las moléculas de los herbicidas. Una elevada temperatura en la superficie del suelo es un factor que intensifica la pérdida por volatilización de los herbicidas, en general.

Existen algunas prácticas para disminuir el efecto negativo de las condiciones ambientales adversas, estas pueden ser:

- 1.-No aplicar cuando la humedad relativa sea menor a 60 por ciento, cuando la temperatura sea mayor a 35°C y cuando la velocidad del viento sea mayor a 10 km/hora.
- 2.-No aplicar cuando las plantas estén bajo estrés.
- 3.-Aplicar formulaciones menos sensibles a las condiciones ambientales.
- 4.-Aplicar en horas iniciales de la mañana, finales de la tarde o por la noche.
- 5.-Utilizar si es posible gotas grandes en la pulverización.

Factores edáficos

Sorción. Se refiere a la retención de moléculas orgánicas por el suelo, sin distinción de los procesos específicos de adsorción, absorción, precipitación y partición hidrofóbica (Oliveira *et al.*, 2003). Estos procesos específicos de sorción pueden actuar concomitantemente en la retención de una molécula de herbicida. Por tanto, la sorción de estas moléculas es mucho más compleja que la de iones que sirven como nutrientes en las plantas (Oliveira, *et al.*, 2003). La sorción de herbicidas involucra interacciones hidrofóbicas, procesos físicos y químicos en que el compuesto pasa de la solución del suelo para las superficies externas e internas de coloides. En algunas situaciones, las moléculas sorbidas pueden pasar a formas no disponibles denominadas residuos. La materia orgánica es el principal sitio de formación de estos residuos. La formación de residuos es un importante mecanismo de

disipación de herbicidas. En tanto que la formación de estos compuestos puede comprometer la eficacia de un herbicida, en especial de herbicidas residuales aplicados al suelo. La cantidad de herbicida sorbido depende de las propiedades físico-químicas, de las características del suelo, la formulación, de la dosis aplicada del producto y de las condiciones climáticas.

Factores de la planta

Los herbicidas pueden penetrar a través de estructuras aéreas (hojas, tallos, flores, y frutos) y subterráneas (raíces, rizomas, estolones, tubérculos, etcétera), de estructuras jóvenes y también de semillas.

Hojas. Son el principal órgano de las malezas involucradas en la penetración de los herbicidas aplicados en posemergencia. En superficies foliares de bajo contenido de cera epicuticular, las gotas del herbicida aplicado cubren grandes áreas. En hojas con alto contenido de cera epicuticular disminuye la superficie foliar que queda cubierta con el herbicida. Las hojas presentan varios niveles de desarrollo de tricomas y glándulas, que pueden variar con la especie, estas pueden interceptar gotas aplicadas, impidiendo que alcance la epidermis. Aunque se indica que puede ocurrir una pequeña absorción a través de los tricomas.

Cutícula y estomas. Esta es la principal vía de absorción de los herbicidas aplicados en posemergencia. Por ello el uso de surfactantes seleccionados contribuyen al rompimiento de la tensión superficial de la mezcla que se aplica en la hoja, ocasionando así mayor espacio de producto que los estomas también hagan un importante papel en la penetración de herbicidas. La tensión superficial máxima de la mezcla aplicada para que penetre en los estomas es de 30 dinas/cm². La cutícula sobre las células guarda parece ser más fina y más permeable (menor cera epicuticular), siendo una barrera menos rígida para la penetración de los herbicidas. Todas las especies de malezas poseen estomas sobre la superficie adaxial y abaxial, aunque la mayoría de estos estomas se encuentran en la parte abaxial de las hojas. El mecanismo exacto de penetración aún no es conocido para todos los productos, mas si se admite que los compuestos no polares siguen la ruta lipofílica, y los polares, la hidrofílica.

MANEJO Y CONTROL DE MALEZAS

Caña soca. El primer control de malezas en caña soca se realiza de 3 a 12 días después del corte (ddc), según la incidencia o cobertura de malezas en el área y la humedad del suelo. El segundo control debe hacerse normalmente 30 a 35 ddc, verificando siempre la humedad del suelo y cuando exista el umbral máximo de cobertura (15 por ciento). En áreas sin riego o con poca humedad en el suelo se deben de utilizar productos de alta solubilidad. La mezcla y la dosis de los herbicidas se harán en función de la incidencia y tipo de malezas, y se buscará la mayor cantidad de días control (120 días).

Caña plantía. En caña plantía el control de malezas se inicia 8 ó 10 días después de la siembra (dds) con la aplicación de herbicidas preemergentes después de un segundo riego, previamente se debe determinar la cobertura y definir la mezcla y dosis. La segunda aplicación de herbicidas (posemrgentes) se realiza después de la labores de fertilización. Es importante definir el umbral máximo y tamaño de la maleza para calcular la mezcla y dosis que se aplicarán. Existen labores mecánicas intermedias que ayudan a lograr más días control, así mismo es importante tomar en cuenta que en áreas con alta infestación es necesario el arranque de maleza y/o parchoneo (aplicaciones dirigidas) en el lote.

En caña plantía y soca se han realizado ensayos en la zona cañera en diversos tipos de suelo con presencia de coyolillo y cola de zorro. En estos ensayos se han aplicado herbicidas del grupo de las Imidazolinonas (Plateau 70 WG; Arsenal 24 EC y Mayoral 35 SL), estos productos han mostrado entre 64-89 por ciento de control de malezas, logrando entre 48 a 75 días control (Figura 3). Así mismo controles posemrgentes con herbicidas del grupo de las Sulfonilureas (Sempra75 WG) mezclado con dosis bajas de 2-4 D Amina (0.4 l/ha), han mostrado controles satisfactorios para coyolillo, tanto para la parte aérea como subterránea, aunque para el control de gramíneas como cola de zorro, Krismat 75 WG ha mostrado ser eficiente (Morales *et al.*, 2010).

Para las aplicaciones de las Imidazolinonas es importante tomar en cuenta el tipo de suelo, para evitar toxicidad al cultivo especialmente en suelos arenosos. Estos productos pueden ocasionar un efecto sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo en edades tempranas, de tal manera que se recomienda realizar las aplicaciones en caña soca no más allá de cinco días después del corte.

Para el control posemrgente de malezas de hoja ancha, aplicaciones de herbicidas a base de triazinas (Ametrina y Terbutrina) aplicados entre 15 días después del corte han mostrado controles que oscilan entre 60 y 79 por ciento con 60 días control. En aplicaciones tardías (mayor 30 días), los

controles son ineficientes y con efectos fito-tóxicos al cultivo (efecto quemante), lo que se traduce en menor producción de caña de azúcar.

Otra opción de manejo preemergente de control de malezas es el herbicida Clomazone, el cual tiene efecto sobre un amplio número de malezas de hoja ancha y gramíneas. Resultados indican que se obtiene entre 90 por ciento de control de malezas y con 40 días control. En aplicaciones posemergentes para el control de *Cynodon dactylon* se obtienen resultados satisfactorios, ya que no existe repoblación en al menos 100 días después de la aplicación.

El herbicida Indaziflan es otra opción para el control preemergente de malezas gramíneas, especialmente sobre caminadora y algunas malezas de hoja ancha.

En resumen, existen moléculas nuevas y tradicionales de herbicidas como opciones tecnológicas para el control químico de malezas. El uso de herbicidas debe realizarse en forma integrada con las labores de control mecánico para lograr buenos controles al menor costo.

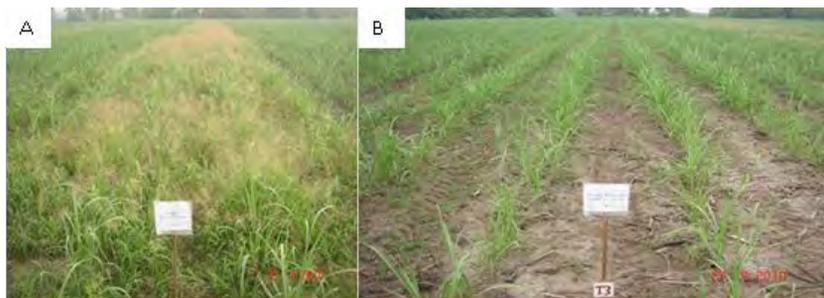


Figura 3. Control de *Cyperus rotundus* y *Leptochloa filiformis*, A) Testigo sin aplicación y B) Plateau 70 WG. Finca Verapaz, ingenio Pantaleón, 2010

Herbicidas utilizados en el cultivo de la caña de azúcar

Existen alrededor de 70 productos comerciales de 17 familias químicas utilizados como herbicidas en la Agroindustria Azucarera de Guatemala, cuya información se encuentra detallada en el catálogo de herbicidas zafras 08–09, con algunos vínculos con presentaciones dinámicas en línea. (<http://www.cengicana.org/Portal/Biblioteca/Publicaciones/CENGICANA/Manuales/CatalogoHerbicidasZafra08-09.pdf>). A continuación se describen los aspectos más relevantes en cuanto al manejo de los herbicidas utilizados.

1. Ácido ariloxi-Fenoxipropionatos: Fluazifop-p-butil. Es un herbicida posemergente sistémico utilizado en gramíneas en dosis de 1 a 2 l/ha. Se recomienda aplicarlo antes del macollamiento cuando la maleza está joven (5-8 hojas) y antes de la floración. Algunas de las especies que controla son: *Echinochloa* spp.; *Setaria* spp.; *Cynodon dactylon*; *Digitaria sanguinalis*; *Paspalum dilatatum* y *Sorghum halepense*.

2. Ácido fosfónico: Glufosinato de amonio. Es un herbicida no selectivo utilizado en posemergencia. Bajo condiciones de estrés hídrico disminuye su eficacia sobre malezas de hoja ancha. Se recomiendan dosis de 1.5 a 2.5 l/ha. En condiciones de alta humedad relativa aumenta la eficiencia del producto. Al aplicarlo con sulfato de amonio (como coadyuvante) se aumenta la absorción del producto y es altamente soluble, con poca absorción en el suelo. Algunas de las especies que controla son: *Echinochloa colonum*; *Setaria* spp.; *Cynodon dactylon*; *Digitaria sanguinalis*; *Sorghum halepense*, *Portulaca oleracea* y *Amaranthus spinosus*.

3. Ácido benzoico: Dicamba. Es un herbicida posemergente de contacto en relación a la maleza y se recomiendan dosis que van de 1 a 1.5 l/ha. Es un herbicida utilizado en malezas de hoja ancha y ciperácea. Se recomienda realizar la mezcla con agua a pH menor a 7. Algunas de las especies que controla son: *Amaranthus spinosus*; *Bidens pilosa*; *Croton lobatus*; *Cyperus rotundus*; *Euphorbia heterophylla*; *Ipomoea nil*; *Kallstroemia maxima*; *Oxalis neaei* y *Richardia scabra*.

4. Bipiridilos: Paraquat. Son herbicidas posemergentes, de contacto y se recomiendan dosis que van de 1.5 a 3 l/ha. Es un herbicida utilizado en malezas de hoja ancha y ciperácea. Se recomienda realizar la mezcla con agua con pH menor a 7. Este herbicida tiene una solubilidad o también llamado log Kow = 4. Es un herbicida no selectivo, por lo que tiene un amplio espectro de control de malezas.

5. Ciclohexadiona: Cletodim o Cletodim. Es un herbicida sistémico posemergente recomendado para aplicaciones dirigidas y en verano. Se utiliza en gramíneas, en dosis de 0.12 a 0.18 kilogramos de i.a/ha. Es un herbicida que se lixivia rápidamente y se recomienda aplicarlo con coadyuvantes como aceites. No se deben preparar mezclas de tanque con sales sódicas de bentazona. Algunas de las especies que controla son *Digitaria sanguinalis*; *Echinochloa* spp.; *Cynodon dactylon* y *Sorghum halepense*.

6. Cloroacetamidas: Acetoclor. Es un herbicida sistémico preemergente en relación con la maleza, con poca movilidad dentro de la planta. Se recomiendan dosis de 1.4 a 1.8 kilogramos de i.a/ha. Es un herbicida utilizado en gramíneas y

algunas malezas de hoja ancha que presentan apariencia cerosa. Algunas de las especies que controla son: *Sonchus oleraceus*; *Polygonum aviculare*; *Raphanus sativus*; *Digitaria sanguinalis*; *Croton lobatus*; *Echinochloa colonum*; *Portulaca oleracea*; *Richardia scabra*; *Leptochloa filiformis* y *Rottboellia cochinchinensis* (Leonardo, 1998).

7. Difenileter: Oxifluorfen. Es un herbicida de contacto aplicado en posemergencia de la maleza y para algunas especies en preemergencia. Las dosis varían de 0.5 a 2.0 l/ha, en función del tipo de suelo. Este herbicida tiene un log Kow = 4.47, es un herbicida que se inmoviliza en suelos arcillosos y con alta cantidad de materia orgánica, lo que afecta el control sobre la maleza. Algunas de las especies que controla son: En posemergencia: *Bidens pilosa*; *Ipomoea nil*; *Kallstroemia máxima*; *Panicum maximun* y *Portulaca oleracea*. En preemergencia: *Croton lobatus*; *Echinochloa colonum*; *Euphorbia hirta* y *Leptochloa filiformis*.

8. Dinitroanilinas: Pendimentalina. Son herbicidas preemergentes de contacto y se recomiendan en dosis que van de 0.6 a 1.2 kilogramos i.a./ha. Es un herbicida utilizado en malezas de hoja ancha y gramíneas. Es un producto casi insoluble en agua, por lo que debe agregarse en la mezcla luego de un surfactante. Es un producto poco soluble con un log Kow de 5.18. Algunas de las especies que controla son: *Digitaria sanguinalis*; *Echinochloa colonum*; *Eleusine indica*; *Ixophorus unisetus*; *Leptochloa filiformis* y *Rottboellia cochinchinensis*.

9. Ácido Fenoxi-carboxílicos: 2,4-D. Es un herbicida posemergente a la maleza. Se recomiendan dosis de 0.8 a 1.3 litros de i.a/ha. La aplicación debe ser dirigida a la maleza y cuando la planta se encuentra en un estado joven y en mayor actividad fisiológica. La mezcla se debe hacer con agua con pH por debajo de 7. Es un producto medianamente soluble con un log Kow de 2.81. Algunas de las especies que controla son: *Amaranthus viridis*; *Bidens pilosa*; *Commelina diffusa*; *Croton lobatus*; *Cyperus flavus*; *Cyperus rotundus*; *Euphorbia hirta*; *Ipomoea triloba* y *Kallstroemia maxima*.

10. Ácidos fosfónicos: Glifosato. Son herbicidas de contacto y posemergentes en relación con la maleza, se recomiendan dosis de 0.5 a 0.8 kilogramos de i.a/ha. Es un herbicida recomendado para malezas perennes aplicado de forma dirigida o previa a la emergencia de la caña. El agua debe poseer un pH de entre 4 y 6. La fitotoxicidad en la caña provoca clorosis foliar y amarillamiento de hojas jóvenes. Es altamente soluble con un log Kow de -1.6 (Alister y Kogan 2005). Algunas de las especies que controla son: *Brachiaria mutica*; *Commelina diffusa*; *Cynodon dactylon*; *Cyperus flavus*; *Cyperus odoratus*; *Cyperus rotundus*; *Echinochloa colonum*; *Panicum maximun*; *Sorghum halepense* y *Tinantia erecta*.

11. Imidazolinonas: Imazapir y Imazapic. Son herbicidas no selectivos aplicados en dosis de 0.5 a 1 l/ha en preemergencia de la maleza. Se puede aplicar en posemergencia de la maleza y la caña, pero de forma dirigida. El producto tiene efecto residual. Este herbicida se activa en condiciones de humedad. Es soluble con un log Kow de 1.30-0.16. Algunas de las especies que controla son: *Croton lobatus*; *Cynodon dactylon*; *Digitaria sanguinalis*; *Echinochloa colonum*; *Euphorbia heterophylla*; *Ipomoea nil*; *Leptochloa filiformis* y *Melampodium divaricatum*.

12. Isoxazoles: Isoxaflutole. Es un herbicida aplicado en preemergencia de la maleza y de la caña, en dosis de 100 a 400 g/ha. Se puede aplicar en posemergencia de la maleza y la caña, pero de forma dirigida. Un síntoma de fitotoxicidad es clorosis foliar de la caña. Este herbicida es de alta movilidad en la planta. Tiene log Kow = 2.50 (DKN) y 2.32 (IFT). Se recomienda un pH del agua menor a 7. Algunas de las especies que controla son: *Amaranthus spinosus*; *Amaranthus viridis*; *Digitaria sanguinalis*; *Echinochloa colonum*; *Eleusine indica* y *Portulaca oleracea*.

13. Sulfonilureas: Trifloxisulfuron, Halosulfuron metil, Ethoxisulfuron y Metsulfuron metil. Son herbicidas aplicados en posemergencia de la maleza. Krismat (Trifloxisulfuron) se recomienda en dosis de 160 a 180 g/ha, y Semptra (Halosulfuron metil) en dosis de 100 a 150 g/ha. Estos se pueden aplicar en posemergencia de la maleza y la caña. Son altamente móviles en la planta. Tiene un log Kow = 1.40 (Trifloxisulfuron). Algunas de las especies que controla son: *Cyperus flavus*; *Cyperus odoratus* y *Cyperus rotundus*. Krismat controla en pre emergencia y pos emergencia: *Amaranthus* spp.; *Digitaria sanguinalis*; *Euphorbia* spp. y *Rottboellia cochinchinensis*.

14. Triazinas: Ametrina, Atrazina, Hexazinona, Metribuzina, Terbutrina. Son herbicidas utilizados con frecuencia en preemergencia de la maleza, con combinaciones entre varias triazinas para aumentar el espectro de malezas controladas. Las dosis utilizadas para Ametrina son 1 a 1.8 kg i.a/ha. Atrazina 1 a 1.5 kg i.a/ha. Hexazinona y Metribuzina 0.5 kg i.a/ha. Son productos solubles, Atrazina con un log Kow de 2.34 y la Hexazinona con 1.17. Algunas de las especies que controla Atrazina y Metribuzina en preemergencia son: *Amaranthus spinosus*; *Anagallis arvensis*; *Bidens pilosa*; *Croton lobatus*; *Euphorbia hirta*; *Ipomoea nil*; *Kallstroemia maxima* y *Melampodium divaricatum*. Terbutrina, Ametrina y Hexazinona en preemergencia y posemergencia controlan: *Bidens pilosa*; *Digitaria sanguinalis*; *Echinochloa colonum*; *Ixophorus unisetus*; *Panicum fasciculatum*; *Rottboellia cochinchinensis*; *Leptochloa filiformis*; *Melanthera nivea*; *Cyperus flavus*; *Cyperus odoratus*; *Oxalis neaei*; *Portulaca oleracea* y *Sida rhombifolia*.

15. Ureas sustituidas: Diuron. Son herbicidas de contacto pueden aplicarse en posemergencia en relación con la maleza y en algunos casos pueden aplicarse en preemergencia. Se recomiendan dosis que van de 1.5 a 2.5 kg i.a/ha. Es un herbicida que se usa en malezas de hoja ancha y algunas gramíneas. Producto medianamente soluble con un log Kow de 2.77. Algunas de las especies que controla son: En preemergencia: *Croton lobatus*; *Echinochloa colonum*; *Euphorbia hirta* y *Leptochloa filiformis*. En posemergencia: *Bidens pilosa*; *Ipomoea nil*; *Kallstroemia maxima*; *Panicum maximun* y *Portulaca oleracea*.

Fitotoxicidad de herbicidas en variedades promisorias de caña de azúcar

La Figura 4 muestra los cuatro estadios de susceptibilidad y tolerancia de la caña de azúcar a la aplicación de herbicidas en función de sus diferentes etapas fenológicas. La etapa 1 comprende desde la siembra hasta 20 días, periodo en que los rebrotes de caña de azúcar muestran mayor espesura de la cutícula. En esta etapa el herbicida no alcanza las hojas internas, por lo que la planta se vuelve tolerante a las malezas y a los herbicidas (Christoffoleti y López, 2009). En caña soca esta fase es más rápida, por lo que se pueden considerar aplicaciones de herbicidas con mayor residualidad. La etapa 2 comprende desde 20 a 50 días después de la siembra, cuando hay de dos a tres hojas; así mismo existe pérdida de raíces de la semilla o tolete, en esta etapa es susceptible a la aplicación de herbicidas. En caña soca existe mayor cantidad de raíces, por lo que el cultivo tolera la aplicación de herbicidas más solubles. La etapa 3 está comprendida entre 50 y 90 días después de la siembra, cuando ya hay raíces verdaderas. En esta etapa existe severa competencia de la maleza con el cultivo, afectando el amacollamiento de la planta y lo hace susceptible a la aplicación de herbicidas posemergentes. La etapa 4 o comúnmente denominada cierre del cultivo ocurre después de los 120 días de la siembra. En esta etapa los tallos ya están desarrollados y definidos y no serán afectados por la aplicación de herbicidas.

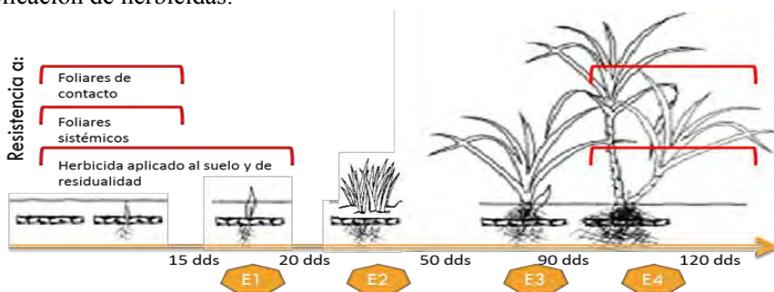


Figura 4. Estadios de tolerancia y susceptibilidad de la aplicación de herbicidas en la caña de azúcar. (Bezuidenhout, 2003). Adaptado por Espinoza y Morales, 2010

En el Cuadro 2 se muestra la tolerancia o susceptibilidad de diferentes variedades de caña de azúcar a diferentes herbicidas comúnmente utilizadas en el control de malezas en Guatemala.

Cuadro 2. Tolerancia o susceptibilidad de variedades nuevas e introducidas a la aplicación de herbicidas en preemergencia (15 días después de la siembra = dds) y posemergencia (50 dds)

Variedad de caña de azúcar	Tolerancia al herbicida		Susceptibilidad al herbicida	
	Pre emergencia	Pos emergencia	Pre emergencia	Pos emergencia
CP73-1312			Terbutrina	
CP72-2086		Terbutrina		
CG99-048	Diuron y Terbutrina			Ametrina
CG98-10	Terbutrina y Diuron			Ametrina
CP88-1165	Terbutrina y Diuron			
RB87-2015	Terbutrina	Terbutrina		
RB84-5210				Diuron
RB73-2577			Terbutrina y Diuron	
CG96-78				Terbutrina, Diuron
CG98-78				Diuron
CG96-135	Terbutrina			
SP79-1287			Terbutrina, Diuron	Terbutrina
Mex82-114	Terbutrina	Terbutrina y Diuron	Diuron	

BIBLIOGRAFÍA

1. Alister, C.; Kogan, M. 2005. ERI Environmental risk index. A simple proposal to select agrochemicals for agricultural use. Crop Protection., v. 25, n. 3, p. 202-211.
2. Bezuidenhout, N.; O'Leary, J.; Singelsa, G.; Bajicb V. 2003. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. Agricultural Systems Volume 76, Issue 2, P. 589-599.

3. Christoffoleti, P.; López, R. 2009. Comportamento dos herbicidas, aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. 1^{era} Edición, CP 2, Piracicaba, SP. 72 p.
4. Espinoza, J. G. 2009. Acumulación de sacarosa y función de glifosato como madurante en caña de azúcar. Guatemala: CENGICAÑA. 7 p.
5. Espinoza, J. G. 2010. Evaluaciones de herbicidas en la agroindustria cañera de Guatemala. Presentaciones de resultados 2008-2009-2010 Comité de malezas y madurantes. CENGICAÑA. Presentación Power Point 15 diapositivas.
6. Meirelles, G.; Alves, P. L. C. A.; Nepomuceno, M.P. 2009. Determinação dos períodos de convivência da cana-soca com plantas daninhas. Planta Daninha, Viçosa-MG, V. 27, n. 1, p. 67-73,
7. Leonardo, A. 1998. Manual para la identificación y manejo de las principales malezas en la caña de azúcar en Guatemala. Guatemala, CENGICAÑA. 131 P.
8. Morales, J.; Pérez, V.; Garita, I. 2010. Evaluación de la eficiencia de Sempra 75 WG (Halosulfuron metil) + 2,4-D, en el control de coyolillo (*Cyperus* spp).Informe Técnico, Ingenio Pantaleón-Duwest. 2010. 5 p.
9. Oliveira, P.; Silva, A.; Vargas, L.; Ferreira, F. 2003. Manejo de plantas daninhas na cultura da cana de açúcar. Vicosa, MG. 150 p.
10. Ufer, C.; Mejía, M. 2010. Mapeo de la distribución de malezas en la zona cañera del ingenio Pantaleón. Informe de resultados, Departamento de Agronomía. 15 p.

VII. NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN

NUTRICIÓN Y FERTILIZACIÓN

Ovidio Pérez*

REQUERIMIENTO DE NUTRIENTES DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Las plantas como la caña de azúcar requieren para su crecimiento y desarrollo 16 elementos denominados esenciales. Estos nutrientes son carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl). Adicionalmente debe incluirse el silicio (Si), aunque no se le considera esencial es importante y es un elemento benéfico en la nutrición del cultivo de caña de azúcar. El C, H y O provienen del agua y del aire, y son los elementos que constituyen la mayor parte del peso de las plantas. Los otros 13 elementos son minerales y provienen del suelo o son adicionados como fertilizantes.

El requerimiento de nutrientes para la caña de azúcar varía según la variedad, el suelo, condiciones climáticas y manejo del cultivo. En el Cuadro 1 se presentan las extracciones totales de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) extraídas por cuatro variedades de caña de azúcar, bajo condiciones de riego, en la zona central de la región cañera de Guatemala.

Cuadro 1. Extracción de N, P, K, Ca y Mg por cada tonelada de caña comercial (kg/t caña) de cuatro variedades de caña de azúcar en Guatemala

Nutriente	Variedad			
	CP72-2086	PGM89-968	SP79-2233	CG96-59
Nitrógeno (N)	1.0	0.92	0.88	1.19
Fósforo (P₂O₅)	0.40	0.45	0.45	0.48
Potasio (K₂O)	2.65	2.81	3.1	2.87
Calcio (Ca)	0.60	0.51	0.64	0.65
Magnesio (Mg)	0.27	0.19	0.33	0.21

En el Cuadro 1 se observa que el K es el nutriente requerido en mayores cantidades por el cultivo de caña de azúcar y varía de 2.65 kg en la variedad CP72-2086 a 3.1 kg de K₂O por tonelada de caña en la variedad SP79-2233. Con relación a N, los requerimientos entre las variedades también son diferentes. Por ejemplo, la variedad CG96-59 requiere más N que las otras

* Ing. Agr., M.Sc., Coordinador del Programa de Agronomía de CENGICANA. www.cengicana.org

variedades con 1.19 kg de N/t caña. Por su parte, la variedad CP72-2086 se considera intermedia con una extracción de 1 kg de N/t caña. Variedades como la SP79-2233 y PGM89-968 tienen menores requerimientos ya que presentan menores valores de extracción de 0.88 y 0.92 kg de N/t de caña comercial. El menor requerimiento de N de estas dos variedades podría estar asociado a la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno eficientes, como lo reporta un estudio sobre fijación biológica de nitrógeno con la utilización de técnicas isotópicas de ^{15}N (Pérez *et al.*, 2005).

Nitrógeno

El nitrógeno es un componente esencial en los aminoácidos, ácidos nucleicos, clorofila y otros pigmentos, y también lo es para todo proceso enzimático. El N es absorbido por las raíces de las plantas en forma de ion amonio (NH_4^+) y en forma de ion nitrato (NO_3^-) (Mengel and Kirkby, 2000). La falta o escasez de nitrógeno se manifiesta en el poco desarrollo de toda la planta, poco macolla miento, tallos delgados y raquíticos y las hojas se tornan de un color verde pálido o amarillento (Figura 1). Los síntomas aparecen primero en las hojas viejas debido a la movilidad de este elemento en la planta.



Figura 1. Variedad de caña CP73-1547 en un suelo Mollisol del estrato litoral, con humedad residual del suelo. a) Sin aplicación de N presenta síntomas generales de deficiencia. b) Con aplicación de 130 kg de N/ha como urea. Finca Santa Elena, ingenio San Diego

Formas de N en el suelo: El nitrógeno se encuentra en el suelo en su mayor parte en formas orgánicas (generalmente más del 95 %) ligado al C en el humus o en células muertas o vivas de plantas, microorganismos y animales pequeños (Allison, 1973) y solo pequeñas cantidades se encuentran en formas minerales. Las formas orgánicas de N del suelo no son disponibles para las plantas y deben ser convertidas a formas minerales (NH_4^+ y NO_3^-) a través de los microorganismos del suelo, para que puedan ser aprovechadas por las raíces de

las plantas. De esta manera, la mineralización del N orgánico de la materia orgánica (MO) del suelo es una fuente importante de disponibilidad de N para las plantas. La tasa de mineralización del N orgánico del suelo está determinada por factores ambientales como la temperatura, la humedad, la aireación del suelo y por el tipo y cantidad de N orgánico presente.

Materia orgánica de los suelos de la región cañera de Guatemala: En general, se puede considerar que los contenidos de MO de los suelos de la región cañera de Guatemala son altos comparados con otras regiones del trópico cultivados con caña de azúcar. La acumulación de MO es una característica de los suelos derivados de ceniza volcánica y especialmente de los Andisoles con contenidos altos de arcillas amorfas como la “alófana” (Broadbent, 1964).

En la Figura 2 se presenta la distribución de la MO de los suelos de la región cañera de Guatemala. En el estrato litoral (altitud < 40 msnm) predominan suelos con contenidos de MO menores al 3.0 por ciento, con predominancia de suelos Mollisoles y Entisoles, con altos potenciales de producción debido principalmente a las condiciones de temperatura, humedad y radiación solar favorables para el desarrollo del cultivo en estas zonas. Contenidos medios de MO (3.0% – 5.0%) es común encontrarlos en suelos Inceptisoles y Mollisoles del estrato bajo y en Andisoles derivados de ceniza volcánica reciente del estrato alto o pie de monte. Los más altos niveles de materia orgánica (MO > 5.0%) se localizan en suelos Andisoles más evolucionados de la zona media y central de la región.

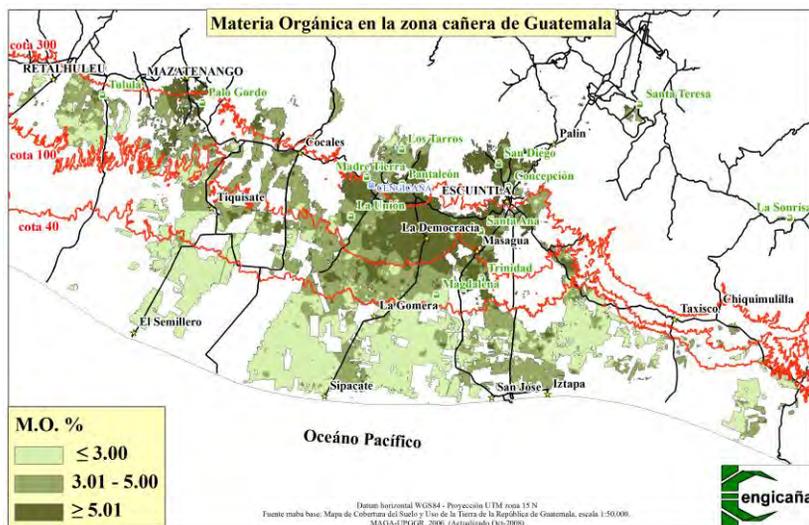


Figura 2. Mapa de materia orgánica de la zona cañera de Guatemala

Respuesta del cultivo a las aplicaciones de nitrógeno: La respuesta de la caña de azúcar a las aplicaciones de nitrógeno en la zona cañera de Guatemala muestra alta correlación con los contenidos de materia orgánica del suelo. En la Figura 3 se observa la relación de la materia orgánica con la respuesta de la caña de azúcar en términos de los porcentajes de incremento en el rendimiento de caña e inserto las probabilidades de respuesta a N.

En la Figura 3 se observa que en el 94 por ciento de los casos se obtuvieron incrementos de TCH superiores al 20 por ciento cuando los contenidos de MO del suelo eran bajos ($MO < 3.0\%$), mientras que cuando los contenidos de MO eran altos ($MO > 5.0\%$) en el 100 por ciento de los casos se observaron incrementos menores al 11 por ciento. En suelos con contenidos medios de MO ($3.0 - 5.0\%$) las respuestas fueron variables pero en la mayoría de los casos las respuestas fueron inferiores al 20 por ciento.

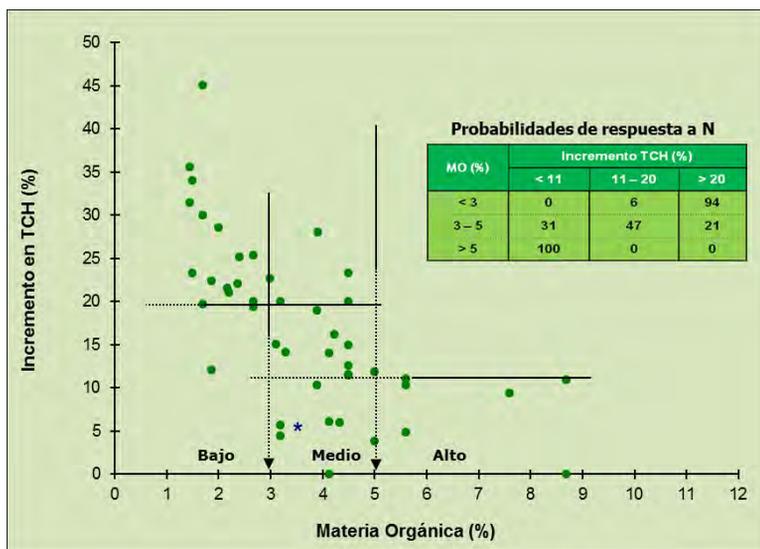


Figura 3. Relación entre materia orgánica del suelo y porcentaje de incremento del tonelaje a las aplicaciones de N

También se ha determinado que las dosis de N aumentan según el número de cortes, pero éstas aumentan significativamente más en suelos con contenidos bajos de materia orgánica. En la Figura 4 se presenta la evolución de la respuesta de la variedad CP72-2086 a las aplicaciones de distintos niveles de N y la dosis óptima económica de N estimada (DOE_N), en cuatro años consecutivos, en un suelo Mollisol con contenido bajo de MO del suelo (1.8 %).

Se observa que en la plantía (1995) la aplicación de 50 kg de N/ha fue suficiente para alcanzar altos rendimientos de caña, similares a los obtenidos con dosis más altas de N y con una diferencia muy significativa con respecto al testigo no fertilizado (0N). En primera soca (1996), se observa que la aplicación de 50 kg de N/ha ya no fue suficiente y se requirió más de 100 kg de N/ha, para mantener rendimientos altos. En segunda y tercera soca, 1997 y 1998, respectivamente, las respuestas a N fueron aún mayores, requiriendo dosis más altas de N para mantener rendimientos adecuados que se logran con las aplicaciones de las DOE_N , que fueron variables en cada corte y estimadas de las regresiones cuadráticas ajustadas para cada año en el experimento (Pérez, 2001).

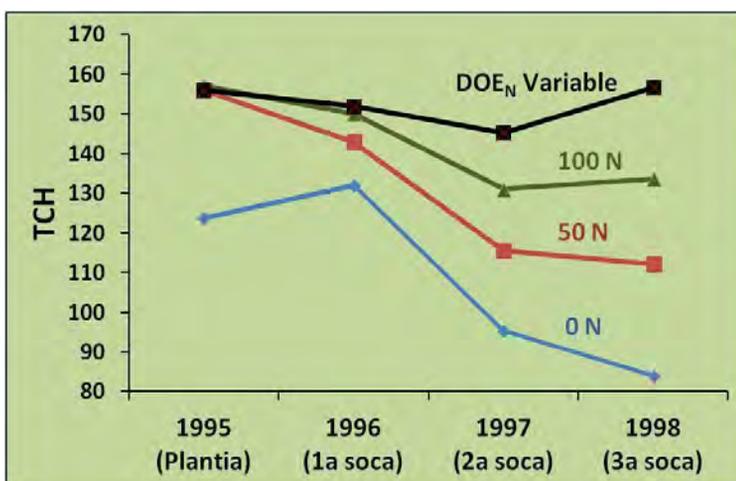


Figura 4. Evolución de la respuesta de la variedad CP72-2086 a las aplicaciones de N en diferentes dosis y la dosis óptima económica de N estimada (DOE_N) en cuatro años consecutivos en un suelo Mollisol con contenido bajo de MO del suelo (1.8 %)

Las dosis cada vez mayores de nitrógeno requeridas en la medida que aumenta el número de cortes estarían explicadas en buena parte por la disminución de la tasa de mineralización de la materia orgánica, como una consecuencia de la compactación del suelo, originada principalmente por el tráfico pesado utilizado en el laboreo, alce y transporte de la caña.

Recomendaciones de dosis de N: En el Cuadro 2 se presenta la guía de recomendaciones de nitrógeno en cuanto a dosis de aplicación, tomando básicamente en consideración el nivel de materia orgánica del suelo, el rendimiento de caña esperado y el ciclo de cultivo (plantía y/o soca).

Las recomendaciones de nitrógeno para caña plantía varían de 60 a 80 kg de N/ha, de acuerdo con el nivel de MO del suelo, en tanto que para caña soca las recomendaciones están en función de los rendimientos de caña esperados (TCH), utilizando la relación nitrógeno por tonelada de caña (Rel N:TCH) que es variable para cada categoría de MO establecida.

En suelos con contenidos bajos de MO (< 3.0 %) la dosis de N por hectárea se determina multiplicando el rendimiento esperado de caña (TCH) por el factor 1.14. En suelos con contenidos medios (3.0 – 5.0 % de MO) se obtiene multiplicando por el factor 1.0 y para suelos con altos niveles de MO (> 5.0 %) se obtiene multiplicando por el factor 0.9. En suelos arenosos agregar de 10 a 20 Kg de N/ha más a la recomendación.

Cuadro 2. Recomendaciones de dosis de nitrógeno (kg N/ha) para el cultivo de caña de azúcar en suelos derivados de ceniza volcánica de Guatemala

Categoría de MO (%)	Caña plantía (kg N/ha)	Caña soca		
		¹ Rel N:TC	Dosis mínima	Dosis máxima
			Kg de N/ha	
Baja (< 3.0)	80	1.14	100	150
Media (3.0 – 5.0)	70	1.0	90	130
Alta (> 5.0)	60	0.9	80	120

¹Rel N:TC=Relación kg de N por tonelada métrica de caña esperada

Las dosis mínimas de N recomendadas no deben ser inferiores a 100, 90 y 80 kg de N/ha para contenidos bajos, medios y altos de MO, respectivamente tal como se muestra en el Cuadro 2. Esto se debe a que rendimientos de caña muy bajos están asociados a áreas marginales con otros factores limitantes diferentes a N, que hacen que la eficiencia del uso del fertilizante nitrogenado sea bajo. De la misma manera, las dosis máximas de N no deben ser mayores que 150, 130 y 120 kg de N/ha para niveles bajos, medios y altos de MO del suelo, respectivamente, porque rendimientos altos de caña esperados generalmente están asociados a condiciones favorables que permiten una mayor eficiencia de uso del N por el cultivo.

Épocas y formas de aplicación del nitrógeno: La adecuada aplicación de nitrógeno tanto en época como en forma es importante para el mejor aprovechamiento del fertilizante por el cultivo. En caña soca, el N se recomienda aplicarlo a los 30 días después del corte (ddc), en banda, e incorporarlo a ambos lados del surco de la caña. En caña plantía, la fertilización se recomienda realizarla a los 45-60 días después de la siembra, que es el

momento cuando las raíces del cultivo inician la absorción y aprovechamiento del fertilizante.

En áreas sin riego (humedad residual) cosechadas en el primer y segundo tercio de la zafra (de noviembre a febrero) se recomienda la aplicación temprana del fertilizante (15 – 30 días después del corte) incorporándolo al suelo en ambos lados del surco con la humedad residual presente, en vez de esperar que haya humedad y retrasar la aplicación hasta en mayo-junio cuando las lluvias se han establecido. Ensayos experimentales indicaron que cuando el intervalo entre la fertilización temprana (30 ddc) y la fertilización retrasada esperando el establecimiento de las lluvias fue de 145 días hubo una significativa ventaja de 14 TCH más por fertilizar temprano como se muestra en la Figura 5 (Montenegro *et al.*, 2000).

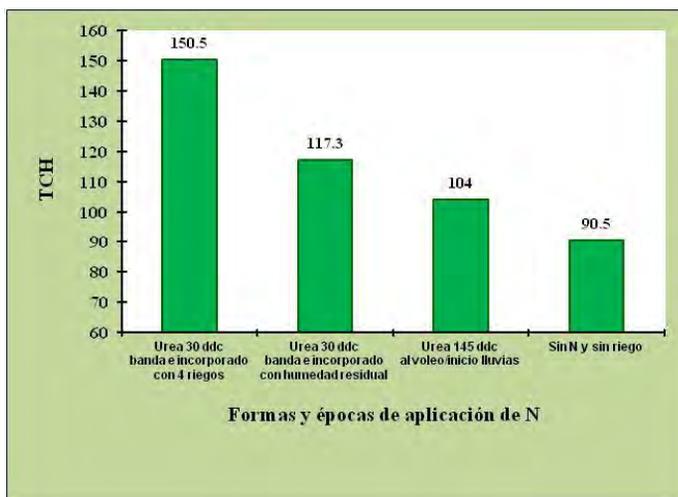


Figura 5. Efecto de la aplicación temprana e incorporada de N (urea) con humedad residual del suelo contra la aplicación tardía en espera del establecimiento de las lluvias, en un suelo Mollisol bajo en MO

La fertilización temprana contra la fertilización tardía en espera del establecimiento de las lluvias ofrece ventajas operativas muy importantes en el manejo del cultivo de la caña de azúcar, entre las cuales se puede destacar que toda la fertilización se puede hacer en forma mecanizada evitando aplicaciones manuales poco eficientes y costosas. La fertilización puede ser programada y calendarizada conforme se cosecha, y así se evita la acumulación de áreas por fertilizar con la otra modalidad.

El fraccionamiento o no de la dosis de N en el cultivo de caña de azúcar depende de factores edáficos (textura) y climáticos (lluvia), principalmente. En Guatemala se ha encontrado que una sola aplicación de la dosis (30 dcc) de N es suficiente para la mayoría de suelos y condiciones. El fraccionamiento de la dosis de N en dos aplicaciones (30 y 120 dcc) es importante en suelos Andisoles de textura gruesa, localizados en el estrato alto de la región, donde el régimen pluvial es muy alto, en suelos Andisoles superficiales del estrato medio y en suelos Entisoles arenosos (Pérez, 1998).

Fuentes de nitrógeno: Las fuentes de N más utilizadas son: a) Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) con una concentración de N del 46 por ciento en forma de amida en su totalidad (NH_2). La urea debe ser incorporada al suelo para evitar pérdidas de N por volatilización, si se deja en la superficie del terreno, además es el fertilizante preferido entre los granulados por su alta concentración de N. b) Nitrato de amonio (NH_4NO_3) con 33.5 por ciento de N, con la mitad en forma de NH_4^+ y la otra mitad en forma de NO_3^- . El nitrato de amonio debe transportarse y almacenarse con cuidado, y evitar el contacto con materiales orgánicos, ya que bajo estas circunstancias puede ser explosivo. c) Amoniaco anhidro (NH_3) con 82 por ciento de N. El amoniaco es un gas bajo presión atmosférica normal, por lo que debe ser almacenado en tanques de alta presión o en refrigeración. La aplicación de amoniaco requiere de equipos especiales para inyectarlo al suelo, y los suelos tienen que estar bien preparados. d) Sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) con 21 por ciento de N y 24 por ciento de S. Este fertilizante no es higroscópico de tal manera que no requiere especiales cuidados en su manejo. Su desventaja es que la concentración de N es baja.

Fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas y juega un papel vital en la fotosíntesis y en muchos otros procesos bioquímicos. Sus principales funciones son transporte y almacenamiento de energía, y el mantenimiento de la integridad de la membrana celular. El fósforo promueve el macollamiento y desarrollo de la raíz, de tal manera que es indispensable en las primeras fases del crecimiento del cultivo (Humbert, 1974). El mismo es absorbido por las raíces de las plantas en forma de iones ortofosfato primario y secundario (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) en función del pH del suelo (Marshner, 1995).

Las deficiencias de fósforo en el cultivo de caña de azúcar se manifiestan en un pobre macollamiento con tallos delgados y entrenudos cortos, las hojas son delgadas, angostas y más pequeñas, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Izquierda: Plantas de la variedad PR75-2002 sin la aplicación de fósforo, en un suelo Andisol pobre en este elemento. Derecha: Plantas de la misma variedad, fertilizadas con 80 kg de P_2O_5 /ha, en el mismo suelo

Fósforo en el suelo: El P se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica. Las formas inorgánicas están constituidas por compuestos de la fase sólida, predominando los fosfatos de Ca, fosfatos de Fe y Al, dependiendo del pH del suelo. El fósforo orgánico se encuentra en los fosfolípidos, ácidos nucleicos y fitina y sus derivados. Las formas orgánicas de P deben ser mineralizadas para ser aprovechadas por las plantas.

Fósforo disponible en los suelos de la zona cañera de Guatemala: En la región cañera de Guatemala la disponibilidad de fósforo está influenciada principalmente por el tipo de suelo y en especial por el tipo de arcilla (alófana) (CENGICAÑA, 1996).

La presencia de materiales amorfos y alófana en la fracción fina del suelo es una característica de los suelos derivados de ceniza volcánica reciente. Estos materiales confieren características especiales a los suelos como la alta

fijación de fósforo. La fijación de fósforo se define como la transformación de fosfatos solubles a fosfatos insolubles que no son fácilmente aprovechables por las plantas. En la Figura 7 se presenta el mapa de los contenidos de P en los suelos.

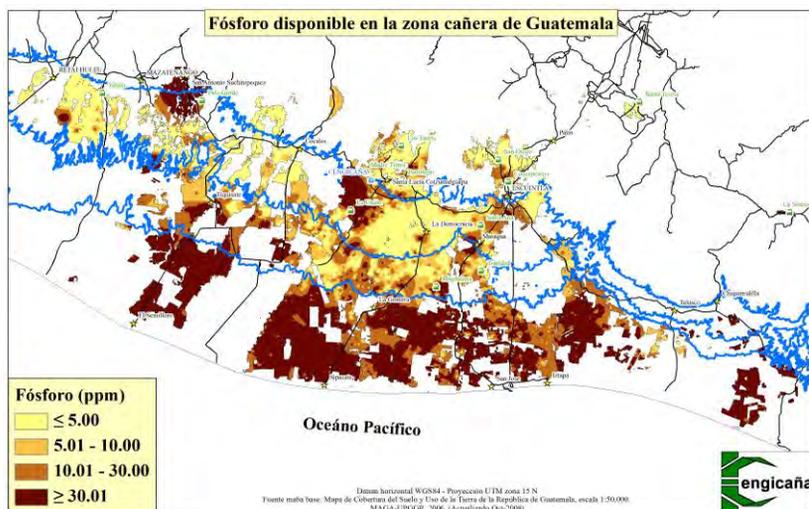


Figura 7. Fósforo disponible en los suelos de la zona cañera de Guatemala

Suelos con bajo fósforo disponible y alta retención de este nutriente se localizan en los estratos alto y medio de la región cañera, donde dominan suelos Andisoles que se caracterizan por poseer contenidos altos de alófana. Conforme se avanza hacia las zonas más bajas en dirección al océano Pacífico, los contenidos de materiales amorfos y alófana en los suelos van disminuyendo y hay predominancia de suelos Mollisoles y Entisoles con contenidos altos de P.

El pH en fluoruro de sodio es un buen indicativo de la magnitud de la presencia de materiales amorfos y alófana en los suelos. En la Figura 8 se muestra la relación entre el pH en fluoruro de sodio (NaF) y el P disponible en suelos Andisoles y otros suelos de la región cañera del país. Se observa que los pH en NaF de los suelos Andisoles tienen valores de 10 o más diferenciándose marcadamente de los pH menores de los otros suelos. También se observa que los Andisoles están asociados con valores de P disponible muy bajos en el suelo (< 5 ppm).

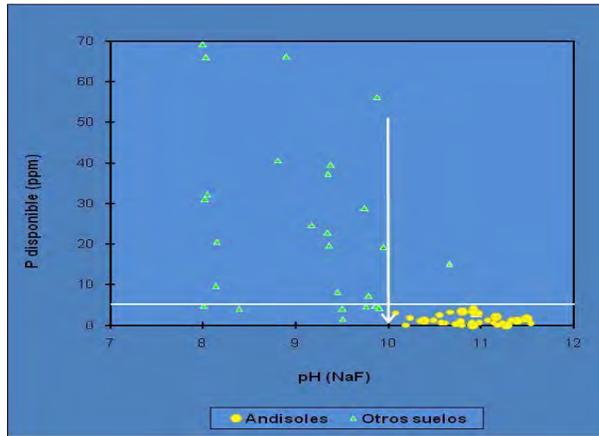


Figura 8. Relación entre pH con NaF y P disponible del suelo (Mehlich 1) en suelos Andisoles y otros de la región cañera de Guatemala

Respuestas del cultivo a las aplicaciones de fósforo: La respuesta de la caña de azúcar a las aplicaciones de fósforo en la zona cañera de Guatemala está relacionada con los contenidos de P del suelo, extraídos con Mehlich 1, tal como se muestra en la Figura 9. Ahí se observa que rendimientos relativos (RR) iguales o menores al 90 por ciento del rendimiento máximo están asociados a contenidos de P del suelo menor a 10 ppm, indicando que las mayores probabilidades de respuesta a las aplicaciones de fósforo se encuentran por debajo de este nivel (Pérez *et al.*, 2003).

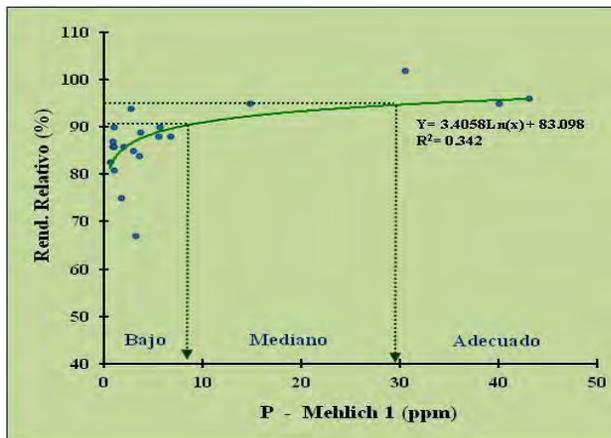


Figura 9. Relación entre P del suelo extraído con Mehlich 1 y porcentaje de rendimientos relativos de caña (RR), en caña plantía, en suelos volcánicos de Guatemala

En la Figura 10 se muestra la importancia de aplicar P en caña plantía en suelos deficientes en fósforo ($P < 10$ ppm) en suelos Andisoles, Inceptisoles y Vertisoles (Pérez *et al.*, 2011). Se observa que las aplicaciones de P en suelos deficientes en este elemento en todos los casos incrementaron los rendimientos de caña, con relación a cuando solo se aplicó N, y se obtuvieron incrementos hasta de 33 TCH más en un suelo Andisol de textura arenosa, localizado en el estrato alto de la región donde se han observado las respuestas a fósforo más altas.

Efecto residual de P: En suelos con alta retención de P (suelos Andisoles) se ha observado baja residualidad del fósforo y es preferible aplicar este elemento cada año, en vez de añadir toda la dosis al momento de la siembra, tal como se muestra en la Figura 11, en un suelo Andisol del estrato medio de la región. Se observa que independientemente de la dosis total de P aplicada en dos años (plantía y primera soca) en todos los casos el rendimiento de caña en promedio fue mayor cuando la dosis se aplicó en forma fraccionada en plantía y primera soca (Adaptado de Perez *et al.*, 2007). Similares respuestas han sido reportadas en otros estudios realizados en suelos Andisoles de la región (Pérez y Melgar, 1998).

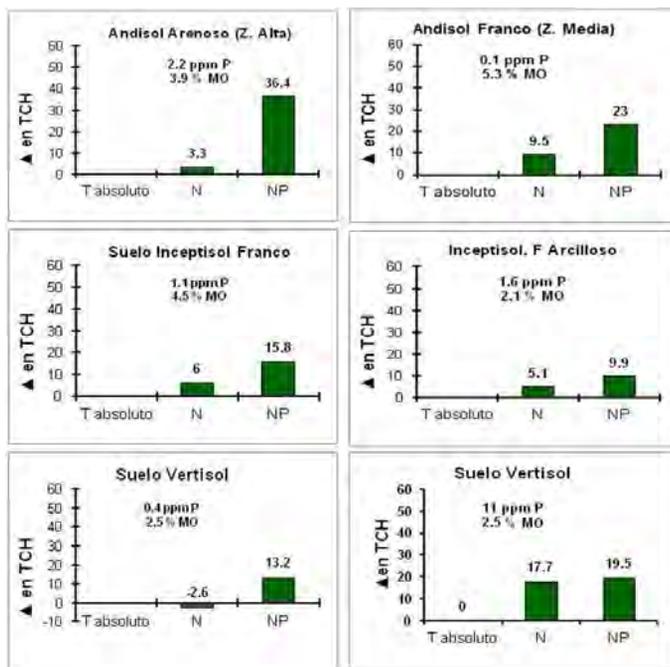


Figura 10. Incrementos en TCH por efectos de la aplicación de P en diferentes suelos de la región

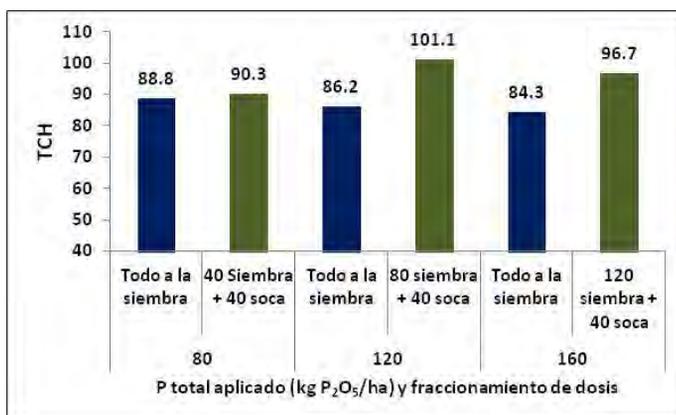


Figura 11. Efecto del fraccionamiento de la dosis total de P en plantía y primera soca en el rendimiento promedio de caña (TCH), en un suelo Andisol de la zona cañera de Guatemala

Recomendaciones de dosis de P: En el Cuadro 3 se presentan las recomendaciones de fósforo en cuanto a dosis, según las categorías definidas de P en el suelo, el ciclo de cultivo y el tipo de suelo.

En siembras nuevas o renovaciones en Andisoles con P bajo (< 10 ppm), aplicar 80 kg de P₂O₅/ha y en otros suelos aplicar 60 kg de P₂O₅/ha. En suelos con nivel medio de P, reducir la dosis a 60 y 40 kg de P₂O₅ para Andisoles y no Andisoles, respectivamente. En suelos con altos niveles de P (>30 ppm) no aplicar. En caña soca se recomienda aplicar P solo cuando los niveles de P son menores a 10 ppm, debido a la menor respuesta observada en caña soca a las aplicaciones de este elemento. Las dosis recomendadas en soca para suelos con bajo P es de 40 kg de P₂O₅/ha para Andisoles y de 25 kg de P₂O₅/ para otros suelos con menos retención de P.

Cuadro 3. Recomendaciones de fósforo (kg de P₂O₅/ha) según P del suelo, ciclo de cultivo y tipo de suelo

Nivel de P del suelo	Caña plantía		Caña soca	
	Andisoles	Otros suelos	Andisoles	Otros suelos
Bajo (< 10 ppm)	80	60	40	25
Medio (10 – 30 ppm)	60	40	0	0
Alto (>30 ppm)	0	0	0	0

Fuentes de P: Las fuentes de fósforo más comunes utilizadas en caña de azúcar son: el fosfato di amónico (DAP) con 46 por ciento de P₂O₅, el fosfato mono amónico (MAP) con 52 por ciento de P₂O₅. Estos fertilizantes

además traen en su composición nitrógeno en forma amoniacal. El triple superfosfato (TSP) que viene con 46 por ciento de P_2O_5 trae también Ca, en un porcentaje de 15.0 - 18.5 por ciento. Otra fuente de P menos soluble la constituye la roca fosfórica, con contenido de P variable y es recomendado solo para suelos ácidos.

Potasio

El potasio es un elemento esencial en la osmoregulación, activación de enzimas, regulación del pH y balance entre aniones y cationes en las células. Interviene en la fotosíntesis y ejerce un control sobre los movimientos de azúcares y en el uso eficiente del agua por las plantas. El potasio es absorbido como ion K^+ y es un elemento móvil dentro de las plantas. La falta de este elemento se manifiesta primero en las hojas viejas de las plantas con moteado y clorosis en la punta y márgenes de las hojas termina con necrosamiento en las hojas afectadas. La deficiencia prolongada de potasio puede afectar el desarrollo del meristemo apical lo que distorsiona las hojas apicales y da a la planta una apariencia de abanico (Anderson y Bowen, 1994). Sin embargo, el exceso de potasio en las plantas incrementa el contenido de ceniza en el jugo de caña lo que causa problemas en la cristalización del azúcar en el proceso de fabricación.

Potasio en el suelo: El potasio en el suelo se encuentra en varias formas y con diferentes grados de disponibilidad. Las formas intercambiables y en solución son las fracciones fácilmente disponibles para las plantas, y por lo general son extraídas para los procedimientos analíticos a nivel de laboratorio para medir disponibilidad de este elemento en el suelo. Aunque los suelos derivados de ceniza volcánica por su origen generalmente tienen buenas reservas de K en el suelo, factores como la alta cantidad e intensidad de las lluvias y las texturas livianas de estos suelos tienden a favorecer la lixiviación de las formas disponibles de K.

Potasio en los suelos de la zona cañera: En la zona cañera de Guatemala, es común encontrar bajos niveles de K intercambiable (< 100 ppm), en los suelos Andisoles del estrato alto (pie de monte), los cuales se caracterizan por una elevada precipitación pluvial (> 3500 mm anuales) y por suelos de texturas livianas. Mientras que K intercambiable, en niveles que varían de bajo a adecuado, se ha encontrado en los suelos del estrato medio, cuyos suelos predominantes son Andisoles e Inceptisoles de texturas medias, contrastando con los niveles altos de K de los suelos del estrato bajo y litoral donde dominan suelos Mollisoles de alta fertilidad.

Respuestas del cultivo a las aplicaciones de K: La investigación realizada de aplicaciones de K en la región ha mostrado una buena correspondencia entre la respuesta de la caña de azúcar con los niveles de K intercambiable del suelo. Se han obtenido significativos incrementos en el rendimiento de caña y concentración de azúcar, con las aplicaciones de K en suelos Andisoles con contenidos menores a 100 ppm. En Mollisoles de textura franco arenosa con contenidos de K mayores de 200 ppm no se ha mostrado respuesta a las aplicaciones de K. Por otro lado, se ha observado una interacción positiva entre K y N. En la Figura 12 se evidencia que cuando el potasio era muy deficiente en el suelo (86 ppm) y este no se corrigió (0 K)), el efecto de N fue nulo. Sin embargo cuando el K fue aplicado en una dosis de 120 kg de K₂O/ha se obtuvo un efecto lineal positivo del N (Figura 12 a). En tanto que cuando el K del suelo fue de 203 ppm la respuesta a N fue similar con o sin K (Figura 12 b), indicando que el mismo no fue limitante en la producción (Pérez y Melgar, 2000).

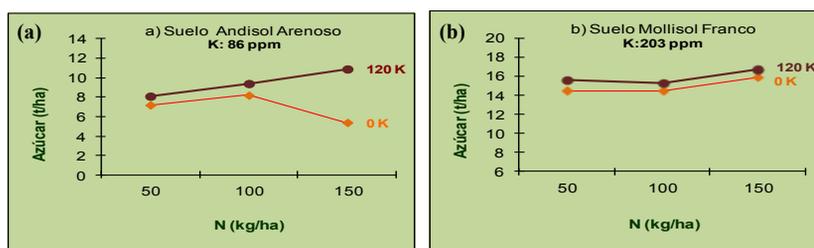


Figura 12. Efecto de la aplicación de 120 kg de K₂O/ha en la respuesta a N en el rendimiento de azúcar (t/ha), en dos suelos con diferentes contenidos de K intercambiable. a) Suelo con 86 ppm de K y b) suelo con 203 ppm de K

La aplicación de K en suelos deficientes en este elemento mejora la pureza del jugo, tal como se observa en el Cuadro 4 (Pérez y Melgar, 2000).

Cuadro 4. Efecto de K en la pureza del jugo (%) en dos suelos Andisoles de Guatemala

K aplicado (kg K ₂ O/ha)	Pureza del jugo (%)	
	Finca Cristóbal, ingenio La Unión (102 ppm K)	Finca Delicias, ingenio El Baúl (86 ppm K)
0	84.3	87.0
40	88.9	89.2
80	90.2	90.9
120	88.5	91.4
160	89.2	90.5
200	90.4	89.5
240	89.4	90.8

Recomendaciones de dosis de K: En el Cuadro 5 se presentan las recomendaciones de dosis de K de acuerdo con los niveles de K intercambiable del suelo y la cantidad de arcilla presente en los mismos.

Se recomienda aplicar 60 kg de K_2O /ha cuando los niveles de K intercambiable del suelo son menores de 100 ppm y 80 kg de K_2O /ha cuando el contenido de arcilla del suelo es mayor de 35 por ciento. Los niveles medios de K varían según se trate de suelos con arcillas menores o iguales a 35 por ciento o suelos con arcillas mayores de 35 por ciento. Para ambos casos se recomienda la aplicación de 40 kg de K_2O /ha. No se recomienda aplicar K en suelos con contenidos de K mayores a 150 ppm en el caso de suelos con menos de 35 por ciento de arcilla y en suelos mayores de 300 ppm en el caso de suelos con arcilla mayor del 35 por ciento.

Cuadro 5. Recomendaciones de dosis de K en la zona cañera de Guatemala

Suelos con arcilla ≤ 35 %		Suelos con arcilla > 35 %	
K del suelo (ppm)	Dosis K (kg)	K del suelo	Dosis K (kg)
< 100	60	< 100	80
100 – 150	40	100 – 300	40
>150	0	>300	0

Suelos con > 150 y > 300 ppm de K revisar relaciones de bases con respecto a K. Aplicar 40 kg de K_2O /ha si $(Ca+Mg)/K > 40$ y $Mg/K < 15$

Azufre

El azufre es esencial para la síntesis de aminoácidos, proteínas, vitaminas, formación de clorofila y el crecimiento de las plantas. Es absorbido por las raíces de las plantas como ion SO_4^{2+} , y es un nutriente no móvil en la planta. Los síntomas de deficiencias de S se manifiestan primero en las hojas jóvenes, estas presentan clorosis y márgenes púrpura, son más angostas y más pequeñas de lo normal, y los tallos generalmente son delgados.

Azufre en el suelo: El azufre en los suelos se encuentra en formas inorgánicas y orgánicas. Sin embargo, en suelos de áreas húmedas y semihúmedas el S se encuentra principalmente en formas orgánicas, como parte de la MO , similar a lo que sucede con el nitrógeno. La materia orgánica al mineralizarse libera S en forma de SO_4^{2+} .

La respuesta a las aplicaciones de S en la zona cañera de Guatemala no ha sido muy evidente, quizá debido a los altos contenidos de MO que tienen los suelos de la región. Respuestas a S se han observado en suelos arenosos y suelos del estrato alto con mucha pluviosidad, así como en Vertisoles con bajos contenidos de MO

con problemas de drenaje (Pérez, 2004). Se ha observado que la relación N/S en el cultivo de caña de azúcar puede ser un buen indicativo para ver el estado nutricional del S con respecto al N. En la Figura 13 se presenta la relación N/S en la planta entre 4 y 6 meses de edad del cultivo, en 28 campos de la zona cañera, y su relación con la producción de caña. Se observa que los mayores tonelajes estuvieron asociados con relaciones N/S cercanas a 12.

Las aplicaciones de S se justifican cuando los contenidos de MO del suelo son bajos (< 3.0%) y condiciones de alta pluviosidad y en suelos con mal drenaje. Generalmente, las deficiencias de S se corrigen con la aplicación de 40 kg S/ha.

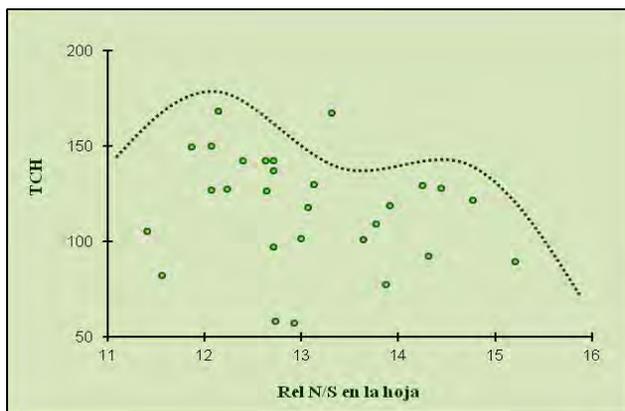


Figura 13. Relación N/S en la planta de caña de azúcar y su relación con la producción (TCH) en 28 campos del ingenio La Unión, muestreados entre los 4 y 6 meses

Fuentes de azufre: Las fuentes más comunes de azufre son sulfato de amonio (24 % S y 21 % N) y el sulfato de calcio (18.6 % S). El sulfato de amonio es un fertilizante muy soluble y rápidamente disponible, además contiene un buen porcentaje de N. El sulfato de calcio o yeso es una fuente económica de S y contiene Ca en proporciones variables. Una fuente de S mucho más económica aunque de reactividad más lenta, la constituye el S elemental (90.0 – 100% S), este necesita ser oxidado a SO_4^{2+} por los microorganismos del suelo y por lo mismo está sujeto a menos pérdidas por lixiviación.

Calcio

El calcio es un elemento esencial y forma parte de los pectatos de Ca que es importante constituyente de la pared celular. El Ca participa en el equilibrio electrostático de la célula y actúa como un activador de numerosas enzimas

como amilasas, fosfolipasas, quinasas y ATP-asas y juega un importante papel en el metabolismo del N. El Ca es un nutriente relativamente inmóvil dentro de la planta. La deficiencia de Ca produce tallos delgados y pobre crecimiento radicular. Las hojas viejas presentan manchas y clorosis en forma localizada, que a veces muestran síntomas similares a los de la roya, y pueden morir prematuramente (Anderson y Bowen, 1994). En condiciones de deficiencia aguda de Ca, las hojas son necróticas y distorsionadas.

Calcio en el suelo: Los suelos de la zona cañera de Guatemala se caracterizan por tener niveles adecuados de Ca intercambiable, a excepción del estrato alto y algunas áreas del estrato medio de la región donde se observan niveles bajos y medianos de este elemento debido entre otros factores a la alta precipitación pluvial que prevalece en la región y la presencia de suelos arenosos (Villatoro *et al.*, 2009). Los suelos que tienen niveles de Ca menores de 4.0 meq/100 g se consideran bajos. Sin embargo, hay que tener en cuenta la saturación de Ca en el suelo y la relación entre las bases.

En la zona cañera de Guatemala se ha encontrado respuesta a las aplicaciones de cal solamente en suelos asociados con pH menor de 5.5, en suelos Vertisoles y algunos suelos Andisoles del estrato alto.

Las fuentes de Ca más comunes son el yeso (18-22%) y diferentes tipos de cales como la cal dolomítica o carbonato de Ca importante en suelos ácidos. Entre los fertilizantes con Ca están el superfosfato simple (20%) y superfosfato triple (15 – 15.8%).

Magnesio

El magnesio es un constituyente de la clorofila y, por lo tanto, está involucrado en la asimilación de CO₂ y en la síntesis de proteínas. Es importante en el movimiento de P en las plantas y participa en los procesos de respiración. El Mg es absorbido por las raíces de las plantas, en forma de Mg²⁺, y es un nutriente móvil en las plantas. La deficiencia de Mg causa clorosis intervenal de color anaranjado a amarillento en las hojas viejas pero avanza a hojas jóvenes si la deficiencia es severa. Los rebrotes son débiles y el crecimiento de la caña es retardado.

Magnesio en el suelo: Bajos niveles de Mg en el suelo (< 1.0 meq/100g) se presentan principalmente en el estrato alto (arriba de 300 msnm) de la región, donde la precipitación pluvial es alta con dominancia de suelos arenosos. Los estratos medio, bajo y litoral generalmente tienen niveles de Mg adecuados y altos (Villatoro *et al.*, 2009). Niveles de Mg en el suelo menores a 1.0 meq/100 g se consideran deficientes en este elemento y se recomienda su aplicación en

dosis de 30-40 kg de Mg/ha. En suelos con niveles de Mg mayores a 1.0 meq/100 g debe revisarse la saturación de Mg y la relación de las bases en el suelo.

En suelos pobres en Mg (0.4 meq/100g) localizados en el estrato alto de la zona cañera de Guatemala se han observado incrementos de hasta 8 TCH con la aplicación de 30 kg de Mg/ha (Pérez *et al.*, 2011).

FUENTES ALTERNAS DE FERTILIZANTES

Cachaza

La cachaza es un residuo en forma de sedimento que resulta de la clarificación del jugo de caña en la fabricación del azúcar. Por cada tonelada de caña molida en la fábrica se producen alrededor de 34 kg de cachaza. De tal manera que en la última zafra en Guatemala se produjeron 680,000 t de cachaza, con una molienda de 20,000,000 t de caña.

La cachaza tiene altos contenidos de C orgánico, fósforo, calcio y en menores cantidades nitrógeno, de tal manera que es un material utilizado en la fertilización y mejoramiento de los suelos agrícolas. En el Cuadro 6 se presenta la composición química promedio de la cachaza proveniente de muestras de varios ingenios.

Cuadro 6. Análisis de cachaza (base seca) promedio de varios ingenios de Guatemala

Nutriente	Valor
Agua (%)	75
pH	5.8
N (%)	1.2
P ₂ O ₅ (%)	2.2
K ₂ O (%)	0.6
CaO (%)	1.0
MgO (%)	0.6
C (%)	40
Relación C/N	33.3

Del Cuadro 6 se deduce que cada tonelada de cachaza fresca aporta en total 3.0 kg de N, 5.5 kg de P₂O₅ y 1.5 kg de K₂O. Esta cantidad total aportada puede constituir entre 0.6 y 1.5 kg de N disponible/t de cachaza dependiendo del suelo, 3.3 kg de P₂O₅ y 0.9 kg de K₂O disponibles por tonelada de cachaza fresca (Pérez, 2003).

Las aplicaciones de cachaza incrementan los niveles de P disponible en el suelo de acuerdo con los niveles aplicados. El P del suelo varió de 6.1 a 10.4, 17.4 y 33.8 ppm con la aplicación respectiva de 100, 300 y 500 t en toda la superficie en un suelo Mollisol del estrato litoral, por tanto el P del suelo pasó de niveles bajos a niveles altos de P disponible en el suelo (Pérez, 2003).

Los mayores incrementos en TCH observados se han dado con las aplicaciones de cachaza han sido en suelos pobres, como los Entisoles superficiales con baja retención de humedad, y los incrementos hasta de 36 TCH se han dado con la aplicación de 500 t de cachaza/ha. Azañón *et al.*, 2002, reportan incrementos acumulados en 5 años de 52 y 64 TCH con la aplicación antes de la siembra de 100 y 200 t de cachaza/ha con respecto al testigo sin cachaza, siendo la dosis más económica el nivel de 100 t. En el Cuadro 7 se presentan las dosis y formas de aplicación de cachaza para la zona cañera de Guatemala.

Cuadro 7. Recomendaciones de formas y dosis de aplicación de cachaza

Forma de aplicación	Nivel de aplicación (t/ha)	Observaciones
En la superficie total incorporada con las labores antes de la siembra	100 - 300	<ul style="list-style-type: none"> - Dosis según distancia por alto costo del transporte. - Altos incrementos en TCH, especialmente en dosis altas (300 t/ha o más) - Problemas en la uniformidad de aplicación, especialmente en dosis bajas (<200t/ha) - No requiere de equipo especial - Reducir el 50 por ciento de la fertilización nitrogenada al usar 100-200 t/ha y reducir el 100 por ciento al usar dosis altas (300 t/ha o más)
Fondo del surco al momento de la siembra	20 -30	<ul style="list-style-type: none"> - Menor costo de transporte - Mejor uniformidad de aplicación - Requiere de equipo de aplicación adecuado - Se recomienda aplicar 40 kg de N junto con la cachaza al momento de su aplicación
En la mesa o banda incorporada en la soca	40-60	<ul style="list-style-type: none"> - Menor costo de transporte - Buena uniformidad de aplicación - Se requiere de equipo de aplicación - Se recomienda ajustar la dosis de N y K según suelo y ciclo de cultivo

Vinaza

La vinaza es un residuo líquido proveniente de la destilación del alcohol y está constituido principalmente por agua, MO y minerales, entre los cuales el K es el más abundante. La vinaza es utilizada en los campos de cultivo con resultados

positivos en el aumento de la productividad, economía en el uso de los fertilizantes y mejoramiento de los suelos en general (Pennatti *et al.*, 2005).

En Guatemala se ha observado que las aplicaciones de vinaza incrementan la producción de caña en distintos suelos y aportan las necesidades de K del cultivo y parte de las necesidades de N. En un ensayo de vinaza y dosis de N conducido en un suelo Andisol por seis años consecutivos, se encontró que en todos los años el rendimiento de caña se incrementó en la medida que aumentó la dosis de vinaza. En promedio con la dosis más alta (120m³/ha) se obtuvo un incremento anual de 16.6 TCH con relación al testigo sin vinaza, lo que representó en el periodo evaluado un incremento acumulado de 100 TCH (Pérez *et al.*, 2011). Así mismo, en este ensayo se encontró que la vinaza modifica la respuesta al N por parte del cultivo. En la Figura 14 se presenta el efecto promedio de las distintas dosis de vinaza en la respuesta al N en este suelo.

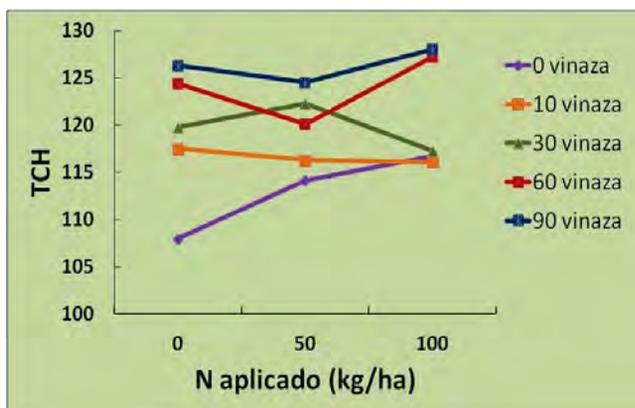


Figura 14. Efecto promedio de las aplicación de diferentes niveles de vinaza (m³/ha) sobre la respuesta a N durante 6 años consecutivos de aplicación, en un suelo Andisol con alto contenido de MO (7.6 %). Finca El Bálsamo, ingenio Pantaleón

En la Figura 14 se observa que en ausencia de vinaza (0 vinaza), la aplicación de N produjo aumentos en el rendimiento de caña (TCH), teniendo en promedio un incremento del 8 por ciento con la dosis de 100 kg de N/ha, la cual es común en este tipo de suelos. Sin embargo, en presencia de cualquier nivel de vinaza, el efecto de N en la producción fue nulo o leve y con rendimientos comparables o superiores al tratamiento testigo, que recibió solo N en dosis alta. Los más altos tonelajes observados en los tratamientos Vinaza-0N con respecto al tratamiento convencional (100 kg N/ha) es un indicativo de que este efluente está aportando las necesidades de

N del cultivo y corrigiendo otros nutrientes que están limitando la producción en estos suelos.

El uso de dosis altas de vinaza (> 60 m³/ha) resulta atractivo por los incrementos esperados en los tonelajes y en la reducción potencial de la dosis de N; sin embargo, es importante señalar que la vinaza aplicada en niveles altos en forma continuada puede aumentar significativamente los niveles de K intercambiable del suelo, tal como se muestra en la Figura 15. Se observa que la aplicación anual de 120 m³ de vinaza/ha, durante seis años consecutivos, aumentó casi 25 veces la concentración original del K en la capa superficial del suelo (0-25cm) y pasó de 70 a 1,750 ppm al final del periodo. Por otro lado, se muestra que el K se ha movido a estratos inferiores en los tratamientos con dosis altas, aunque no más allá de los 75 cm de profundidad. El incremento de K intercambiable del suelo al elevar las dosis de aplicación de vinaza y la permanencia sin cambios en los contenidos de Ca y Mg causan incrementos de la saturación de K a valores muy altos, en consecuencia se producen desbalances de las bases en el suelo (Pérez *et al.*, 2011). De tal manera que es importante tener un control sobre las dosis aplicadas de la vinaza a nivel comercial y el monitoreo de la evolución del K del suelo. En Brasil se reporta que con altas aplicaciones de vinaza se retrasa la maduración de la caña, se reduce el pol % caña y aumenta el contenido de K y cenizas en el jugo de la caña, al final causa problemas en el proceso de fabricación del azúcar, (Silva *et al.*, 1976; Orlando Filho *et al.*, 1995).

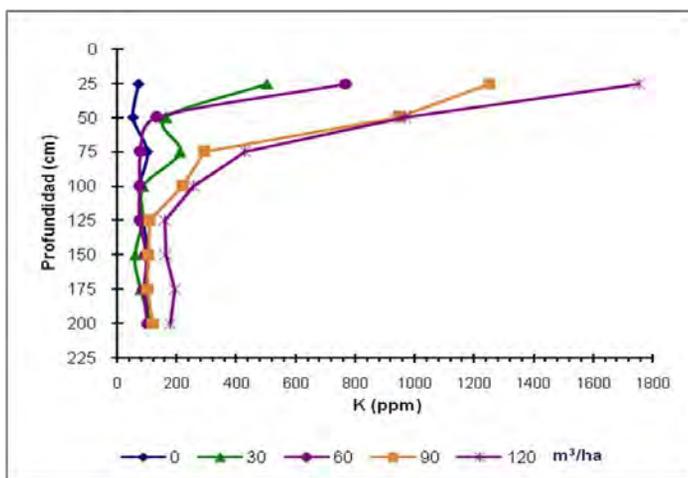


Figura 15. Efecto de la aplicación de vinaza en varias dosis durante 6 años consecutivos en el K intercambiable en el perfil de un suelo Andisol profundo. Finca El Bálsamo. Ingenio Pantaleón. (Pérez *et al.*, 2011)

Abonos verdes

Los abonos verdes constituyen una opción para reducir el uso de N en el cultivo de la caña de azúcar y es una práctica que ayuda a mejorar la productividad y sostenibilidad del cultivo. Introducir un cultivo como las leguminosas en el sistema convencional de caña trae, además, una serie de beneficios directos e indirectos al romper el monocultivo de la caña de azúcar (Wiseman, 2005). La siembra de *Crotalaria juncea* y *Canavalia ensiformis* como abonos verdes, en rotación, en semilleros de caña y en renovación de plantaciones permite un potencial ahorro hasta del 100 por ciento de la fertilización nitrogenada, con incrementos esperados en la producción. En un suelo Mollisol de la región se observaron incrementos de 4 y 11 por ciento de semilla de caña, con la rotación de *Crotalaria juncea* y *Canavalia ensiformis*, respectivamente (Balañá, 2010). En Australia se reportan incrementos de tonelaje de 20 y 30 por ciento con la rotación de soya y maní, en renovación de cañaverales (Garside *et al.*, 2001).

En suelos Andisoles superficiales de Guatemala se ha determinado que la siembra en monocultivo de *Crotalaria juncea* puede acumular hasta 235 kg de N/ha en su biomasa aérea, en 65 días, mientras que la acumulación de N en *Canavalia ensiformis* es un poco menor (175 kg de N/ha) (Pérez *et al.*, 2008).

La intercalación de *Canavalia ensiformis* en los entresurcos de caña, en las renovaciones y socas, podría ser una opción potencial en suelos con altos contenidos de MO como los suelos Andisoles superficiales del estrato alto, donde el crecimiento del cultivo es lento. En este sistema se observaron incrementos promedios de 5.3 por ciento en la producción de caña en cuatro ciclos (plantía y tres socas), con la intercalación de *Canavalia ensiformis* sin aplicación de N en los cuatro años (Pérez *et al.*, 2010).

En general, en el corto plazo, el uso de abonos verdes en Guatemala se recomienda para sembrarlos en áreas de semilleros de caña de azúcar, debido a que las áreas de los semilleros pasan de tres a cuatro meses sin un fin productivo. De la misma manera, hay un gran potencial en el corto plazo en la rotación de leguminosas con *Crotalaria juncea*, en áreas de renovación, principalmente en las zonas altas con siembras de humedad. En la Figura 16 se observa el desarrollo de *Crotalaria juncea* previo a su incorporación en un campo de renovación de caña para siembra de humedad en noviembre, en un suelo del estrato alto de la región, y el crecimiento de *Canavalia ensiformis* intercalado en los entresurcos de caña, en un ensayo experimental en la finca Pantaleón del ingenio Pantaleón.



Figura 16. Vista de *Crotalaria juncea* sembrada en mayo previo a su incorporación para la siembra de caña con humedad residual, en noviembre, en finca El Baúl (izquierda) y *Canavalia ensiformis* intercalado en los entresurcos de caña, en un ensayo experimental en finca Pantaleón. Ingenio Pantaleón (derecha)

BIBLIOGRAFIA

1. Allison, F. E. 1973. Soil organic matter. Elsevier North Holland, New York. NY.
2. Anderson, D.; Bowen, J. 1994. Nutrición de la caña de azúcar. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS). Quito, Ecuador. 40 p.
3. Azañón, V.; Sandoval J.; Pérez O. 2002. Evaluación de dos niveles de cachaza bajo dos niveles de fertilizante químico convencional en siembra y su efecto residual en 4 socas de caña de azúcar. Ingenio La Unión, S. A. Guatemala. En: Memoria de XIV Congreso de Técnicos Azucareros de Centroamérica. Guatemala. pp. 156 – 160.
4. Balañá, P.; Pérez, O.; Alfaro, M. A.; Fernández, M. V. 2010. *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis* and *Mucuna sp.* As possible nitrogen sources for fertilisation in sugarcane comercial nurseries. In: Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27, México.
5. Broadbent, F.; Jackman, R.; McNicoll. 1964. Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. Soil Sci. 98:118-128.

6. CENGICAÑA. 1996. Estudio semidetallado de suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Edición revisada. 216 p.
7. Garside, A.L.; Bell, M.J.; Bethelsen, J.E.; Halpin. 2001. Species and Management of fallow legumes in sugarcane farming system. In: Australian Society of Agronomy. <http://www.regional.org.au/au/asa/2001/2/a/garside2.htm>
8. Humbert, R. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Compañía Editorial Continental. Mexico. 697 p.
9. Marshner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. San Diego CA, USA. 889 p.
10. Mengel, K.; Kirkby, E. 2000. Principios de nutrición vegetal. International Potash Institute. Worblaufen_BERN, Switzerland. 665 p.
11. Montenegro, O.; Chan, M.; Montepeque, R; Juárez, D.; Pérez O. 2000. Épocas y formas de aplicación de N bajo diferentes épocas de iniciación de riego. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1999-2000. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 133
12. Pennati, C.; De Araujo, J.; Donzelli, J.; De Souza, S.; Forti, J.; Ribeiro, R. 2005. Vinasse: A liquid fertilizer. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 25 (1): 403 – 411.
13. Orlando Filho, J.; Bittencourt, V.C.; Alves, M.C. 1995. Aplicação de vinhaça em solo arenoso do Brasil e poluição do lençol freático com nitrogênio. IN: Congresso Nacional da Sociedade de Tecnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. Vol. 13, n°. 6. Rio de Janeiro, Annais, p14-17.
14. Pérez, O.; Ovalle, W.; Urquiaga, S. 2005. Update on biological nitrogen fixation research on sugar cane in Guatemala. Sugar Cane International the Journal of Cane Agriculture. 23:19:22.
15. Pérez, O.; Ufer, C.; Azañon, V. and Solares, E. 2010. Strategies for the optimal use of nitrogen fertilisers in the sugarcane crop in Guatemala. In: Proc. XXVII Int. Soc. Sugar Cane Technol. México.
16. Pérez, O.; Hernández, F.; López, A.; Balañá, P.; Solares, E.; Maldonado, A. 2008. The use of green manures as an alternative to improve and sustainability of the sugarcane crop. Sugar Journal. Vol. 70. No. 9. pp. 14-21.

17. Pérez, O.; López, A.; Hernández F.; Chajil E. 2007. Efecto del fraccionamiento del fertilizante fosforado en el cultivo de caña de azúcar en suelos andisoles. 2007. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2006-2007. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 143-147.
18. Pérez O.; Hernández, F.; Acan, J.; López A.; Ralda G. 2011. Potencial de la vinaza en la reducción de las dosis de nitrógeno en el cultivo de caña de azúcar y su efecto en la acumulación de potasio y otros nutrientes en el perfil del suelo. En: Memoria de Presentación de Resultados de Investigación Zafra 2010-2011. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 191-199.
19. Pérez, O.; Hernández, F.; Sandoval, F.; Azañón, V.; Ralda, G.; Fillipi, J. 2004. Efecto de las aplicaciones de azufre, nitrógeno y potasio en caña de azúcar en suelos de la región cañera de Guatemala. En: Memoria Presentación resultados de investigación. Zafra 2003-2004. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 149-157.
20. Pérez, O.; Hernández, F.; Azañón, V.; García, C.; Ramírez, C.; Cifuentes, V.; Solares E.; Acan, J.; Nataro E. 2011. Nutrientes limitantes en el cultivo de caña de azúcar en suelos de baja productividad de la zona cañera de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2010-2011. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 181-190.
21. Pérez, O. 2003. Uso y manejo agronómico de cachaza en Guatemala. En: Revista de la Asociación de Técnicos Azucareros de Guatemala, ATAGUA, Edición Septiembre.
22. Pérez, O. 2001. Fertilización nitrogenada en caña de azúcar. Síntesis de resultados de investigación de la zona cañera de Guatemala. En: Memoria de X Congreso Nacional de la Caña de Azúcar. ATAGUA. Guatemala. pp. 98-104.
23. Pérez, O.; Cruz, W.; Hernández, F. 1998. Épocas de aplicación y fraccionamiento de nitrógeno en suelo liviano. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1997-1998. Guatemala, CENGICAÑA. 107 p.
24. Pérez, O.; Melgar, M.; LAZCANO-FERRAT. 2003. Phosphorus Fertilization and Phosphorus- Extraction Method Calibration for Sugarcane Soils. Better Crops International. Vol. 17, No. 2. pp. 26-29.

25. Pérez, O.; Melgar, M. 1998. Sugar Cane Response to Nitrogen Phosphorus and Potassium Application in Andisol Soils. *Better Crops International*. Vol. 12, No. 2. pp. 20-24.
26. Pérez, O.; Melgar, M. 2000. Sugar cane Response to Potassium Fertilization on Andisol, Entisol and Mollisol soils of Guatemala. *Better Crops International*. Vol. 14 (2): pp. 20-22.
27. Silva, G. M. de A.; Pozzi de Castro, O. L. J.; Magro, J. A. 1976. Comportamento agroindustrial da cana-de-açúcar em solo irrigado e não irrigado com vinhaça. In: *Seminário Copersucar da Indústria Açucareira*, 4., Anais...Aguas de Lindóia. pp. 107 – 122.
28. Villatoro, B.; Pérez, O.; Suárez, A.; de Cano, W.; del Cid, J. 2009. Segunda aproximación de mapas temáticos de fertilidad y texturas: Herramienta de apoyo para la Agroindustria Azucarera Guatemalteca. En: *Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009*. Guatemala, CENGICANÑA. pp. 240 – 248.
29. Wiseman J. 2005. Green Manuring. *Sugar Journal*. Vol: 67, No. 12. pp. 14-21.

VIII. EL RIEGO EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

EL RIEGO EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR

Otto Castro *

INTRODUCCIÓN

El riego en la zona cañera de Guatemala es una actividad muy importante, se desarrolla junto con la zafra en el período seco, del 15 de noviembre al 15 de mayo. La actividad del riego se incrementa en la dirección al mar, debido al aumento del déficit hídrico. El despegue de la actividad del riego en la zona cañera guatemalteca empezó en el año 2000, en ese entonces el área de riego era del 61 por ciento, pero en la zafra 2009/2010, llegó a ocupar el 80 por ciento en relación con el área total administrada. La labor del riego tiene como objetivos: Asegurar la población inicial de la caña de azúcar e incrementar el peso de los tallos, para tal fin, se realizan riegos poscorte o siembra y precorte para cada una de las etapas fenológicas tipificadas por sus necesidades hídricas.

Actualmente, para seleccionar sistemas de riego se han utilizado los parámetros: Eficiencia en el uso del agua, y economía en la inversión y manejo del sistema de riego, los cuales han permitido optimizar el uso del agua derivada de la diversidad de fuentes como: ríos, norias, pozos profundos, pozos artesanales y aguas servidas de origen industrial.

En este capítulo, se describe al principio la evolución de la actividad del riego en la zona cañera de Guatemala; luego, la clasificación de los sistemas de riego utilizados, la actividad del riego en el incremento de las toneladas de caña por hectárea (TCH). Se adiciona un detalle del proceso de planificación del riego, con información para la toma de decisiones técnicas, así mismo, recomendaciones importantes sobre el uso de herramientas técnicas para facilitar la labor del riego en el campo.

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DEL RIEGO EN LA ZONA CAÑERA DE GUATEMALA

En la década de 1990 los sistemas de riego predominantes en la caña de azúcar eran los sistemas por gravedad, tipo inundación, y aspersión, tipo cañón, luego a

*Ing. Agr., M.Sc., Especialista en Riegos de CENGICANA. www.cengicana.org

partir de 1998 empezaron a surgir nuevas alternativas tecnológicas. Apareció el uso de surcos para regar, con variantes de regar todos los surcos o solo surcos alternos; así también el uso de sistemas de bombeo para derivar agua de la fuente, conducirla por gravedad y regar por aspersión tipo cañón.

El crecimiento de la actividad del riego se observa en la Figura 1. Del período 1990/91 al 1998/99 la actividad del riego solo alcanzó un índice de crecimiento de 0.89. Ya en el periodo 2001/02 al 2008/09 el índice de crecimiento del riego fue de dos veces más de área. En el periodo 2009-2010 el área física que se riega es de 146,347 hectáreas, que representa cinco veces más de lo que se regaba en el período de zafra 1990/91 y 2.58 veces en relación con período de zafra 2001/02.

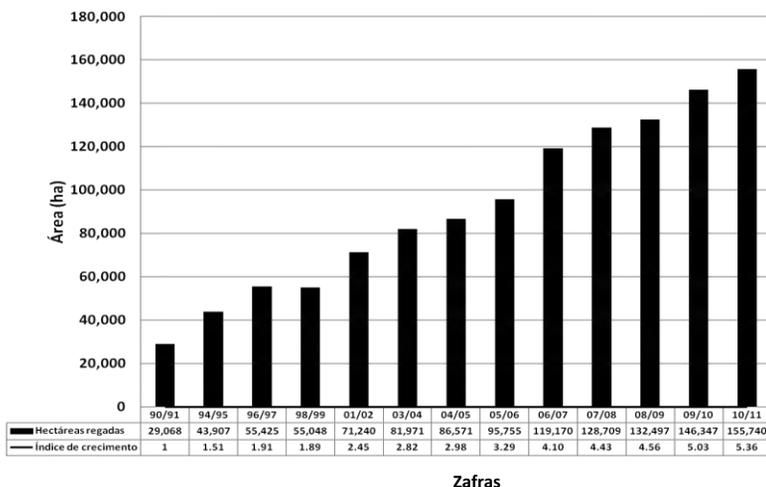


Figura 1. Crecimiento de la actividad del riego en la zona cañera de Guatemala (CENGICAÑA 2010)

Hoy en día, la vigencia de los diferentes sistemas de riego en la zona cañera de Guatemala, dependerá de requisitos como: costo de inversión, la eficiencia en el uso del agua, costo de operación y facilidad en el manejo. Para el caso de los sistemas presurizados que han mostrado una tendencia positiva en los últimos cinco años, tal como el sistema de aspersión, tipo cañón, que ha crecido 1.43 veces, se ha debido principalmente, a la facilidad en el manejo de este sistema, la experiencia acumulada en los técnicos y operadores, ante todo a la buena adaptación para áreas especiales.

Los sistemas considerados innovadores, los de mediana presión, conocidos como miniaspersión, y el sistema de baja presión mecanizado (pivote central fijo), han crecido en 38 y nueve veces más en relación con la zafra 2005/2006, respectivamente. Para el caso de miniaspersión, su crecimiento se ha dado, específicamente en las áreas de riego que administra el ingenio Magdalena, mientras que el sistema pivote central fijo, se observa como una alternativa para la mayoría de los ingenios. Los tres sistemas de riego mencionados se utilizan en riego antes y después del corte en cada uno de los estratos altitudinales.

En cuanto al uso de las fuentes de agua para la actividad del riego, los ríos siguen siendo la principal fuente, con el 63 por ciento; siguen en su orden: las norias con el 15 por ciento, luego con el 11, 10 y uno por ciento para el uso de pozos profundos, aguas residuales y los pozos artesanales, respectivamente. Es importante indicar que la alternativa de usar pozos profundos ha crecido en la última zafra cinco veces más de lo que se regaba en la zafra 2003/04.

CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO EN LA ZONA CAÑERA GUATEMALTECA

El Comité de Riegos en el año 2005, analizó y avaló para la zona cañera la siguiente clasificación:

Sistemas de riego con surcos

Estos sistemas se diferencian por la forma de extraer el agua de la fuente, las dos variantes que se utilizan son las siguientes: a) surcos, con energía por gravedad en la extracción de agua de la fuente; b) surcos, con energía fósil en la extracción de agua de la fuente. En ambas variantes para la conducción y distribución del agua a nivel de parcela se utilizan las siguientes modalidades:

1. Surcos continuos, sin tubería en la conducción y distribución del agua.
2. Surcos alternos, sin tubería en la conducción y distribución del agua.
3. Surcos continuos, con uso de impulsos con tubería PVC móvil.
4. Surcos continuos, con uso de mangas de polietileno en la distribución de agua, sistema fijo.
5. Surcos alternos, con uso de impulsos con tubería PVC móvil.
6. Surcos alternos, con uso de mangas de polietileno en la conducción y distribución, uso de compuertas, fijo.

Sistemas de riego presurizados

Sistemas de aspersión estacionarios: Permanecen fijos mientras riegan, se diferencian por el tipo de energía y presión de operación en los aspersores, se clasifican de la siguiente forma, según Tarjuelo, 1995.

1. **Aspersión presión alta tipo cañón, con energía por gravedad.** Este sistema utiliza la energía por diferencial de altura, tiene tubería fija en la conducción y distribuye el agua a la parcela a través de hidrantes. Utiliza tubería móvil en la distribución con aspersores de alta presión (40 – 50 PSI). En cada hidrante operan dos aspersores. La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 75 y 80 por ciento.
2. **Aspersión presión alta tipo cañón con energía fósil.** Sistema móvil en todos sus componentes, funciona con motobomba, tubería en la conducción y distribución con aspersores de alta presión (40 – 50 PSI). El número de aspersores en operación varía entre dos y ocho. La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 75 y 80 por ciento.
3. **Aspersión con presión media y con energía fósil.** Se utiliza las variantes: Sistema móvil en todos sus componentes y el sistema móvil solo en la distribución del agua. Funciona con motobomba, los aspersores son de presión media (30 – 40 PSI). El número de aspersores por lateral varía entre 25 y 30. La moda del diseño del sistema motobomba es para operar con ocho laterales. En la industria se conoce como miniaspersión (su nombre se origina al compararse con el sistema cañón de presión alta). La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 80 y 85 por ciento.

Sistemas de aspersión con desplazamiento continuo: Estos sistemas se desplazan mientras riegan, se diferencian por la forma de desplazamiento, los aspersores se caracterizan por operar con baja presión (< 20 PSI) y se clasifican como:

- **Ramales desplazables, conocidos como sistemas mecanizados, estos sistemas se clasifican en:**

1. **Pivotes** (desplazamiento circular) fijo y móvil

Pivote fijo (sistema no transportable): Sistema con ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica y otro móvil que describe un círculo girando sobre el primero, se caracterizan porque se

mueve mientras riega; está formado por una tubería porta-emisores que va sustentada sobre torres automotrices. Tiene aproximadamente 11 torres. La pluviometría es variable en cada una de las torres. La movilidad del ramal puede también ser hidráulica. La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 85 y 90 por ciento.

Pivote móvil (sistema transportable): Se traslada con el uso de un tractor en un número de posiciones que son asignadas dependiendo del diseño agronómico. En su posición fija, riegan como el pivote fijo, solo que en un número menor de torres, regularmente cuatro torres. La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 80 y 85 por ciento.

2. Avance frontal (desplazamiento paralelo): La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 85 y 90 por ciento.

Avance frontal con un ala, no pivoteable: Sistema que se desplaza paralelamente a sí misma mientras riega, formada por un lateral o ala, en un extremo recibe el agua a través de un canal por medio de una motobomba. Su longitud suele variar entre 200 y 600 metros. La pluviometría no varía a lo largo del lateral al regar. Cuando llega al final de su recorrido, retorna en la misma parcela.

Avance frontal con un ala, pivoteable: A diferencia del avance frontal con un ala, no pivoteable, es que este sistema cuando llega al final de su recorrido, efectúa un movimiento de 180° el cual le permite regar otra parcela.

Avance frontal con dos alas: Sistema que se desplaza paralela a sí misma mientras riega, formada por dos laterales o alas, uno a cada lado de la línea de suministro de agua. Su longitud suele variar entre 200 y 500 metros. La pluviometría no varía a lo largo del lateral al regar. Cuando llega al final de su recorrido, retorna en la misma parcela.

Aspersor gigante

Cañón viajero: Sistemas con cañón viajero montado sobre un carro que se desplaza con ayuda de un cable, y es alimentado por una manguera flexible arrastrada detrás del carro, estando el otro extremo unido permanentemente a un hidrante. Utilizan aspersores tipo cañón de alta presión > 50 PSI. La eficiencia de distribución del agua a nivel de parcela debe estar entre 75 y 80 por ciento.

Sistemas de riego con goteo: Sistemas de riego que se caracterizan por distribuir el agua por gotas y solo humedecen el área con la mayor concentración de raíces de la caña de azúcar. El agua tiene que ser de buena calidad y posee una alta eficiencia en la distribución del agua cercana a 95 por ciento.

LA ACTIVIDAD DEL RIEGO EN EL INCREMENTO DEL RENDIMIENTO DE CAÑA Y AZÚCAR

Las condiciones en que se maneja el cultivo de la caña de azúcar en la costa sur de Guatemala son muy heterogéneas; en los diferentes tipos de suelo se generan diversas capacidades de almacenamiento y/o aportes de agua; el clima, propicia varios comportamientos de déficit hídrico, según la altura sobre el nivel del mar; y la caña, al sembrarse en distintas fechas genera que **la respuesta de la caña al riego** sea diferente.

La experiencia obtenida desde 1994, a través de trabajos de investigación de tipo experimental, parcelas de validación a nivel de campo y observaciones sobre la respuesta de la caña al riego, en diferentes ambientes de la zona cañera guatemalteca, indica que la respuesta de la caña a la aplicación de agua a través del riego difiere según los factores: estrato altitudinal, fenología de la caña, períodos de zafra, capacidad de los suelos de retener humedad y forma de operar de los sistemas de riego. En la Figura 2 se analizan en forma cualitativa los resultados de las mejores respuestas de la caña a la aplicación del agua a través del riego.

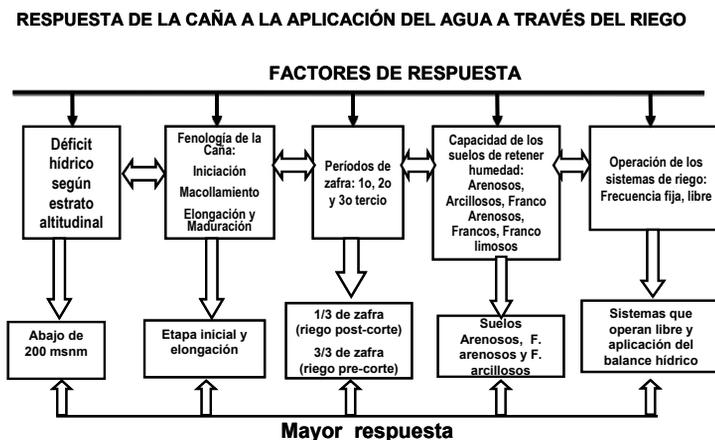


Figura 2. Análisis cualitativo de la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación del agua a través del riego. Zona cañera guatemalteca (CENGICAÑA, 2008)

Las respuestas de la caña a la aplicación del agua son más evidentes en áreas entre 0 y 200 msnm. Se han encontrado respuestas variables, con incrementos respecto a no regar entre 10 -70 TCH; los incrementos más bajos se observan en suelos franco limosos en donde hay aporte capilar y las mayores respuestas se observan en suelos con predominio de arena (Francos arenosos). En el estrato entre 200 y 300 msnm las respuestas encontradas fluctúan entre 20 y 30 TCH. Mientras que en el estrato arriba de 300 msnm, alcanza entre 10 y 20 TCH, la respuesta es menor debido, principalmente, al menor déficit hídrico.

La interacción entre las etapas fenológicas y las fechas de corte o siembra proporciona resultados variables en la respuesta de la caña a la aplicación del agua a través del riego poscorte. Es alta cuando el corte o siembra se realiza en el primer tercio de la zafra (15 nov-15 ene), principalmente, en el estrato abajo de los 200 msnm, como consecuencia de que el período seco es más largo. En el Cuadro 1 se describen los incrementos en las TCH respecto al testigo sin riego, producto de los resultados obtenidos de la investigación experimental realizados en el estrato bajo.

Cuadro 1. Incremento en las TCH producto de la aplicación del agua a través del riego poscorte en las principales texturas de suelo de la zona cañera guatemalteca (CENGICANA, 2006)

Textura	Franco Arenoso		Franco		Franco Limoso	
	30	40	50	60	70	80
LARA ²	30	40	50	60	70	80
Incrementos de TCH (respecto al testigo sin riego)	60	51	43	34	26	17
mm de agua neta requeridos ³	270	240	200	240	140	160

Nota¹: Los resultados están dados para cortes o siembras del tercio uno de zafra, para el estrato bajo (<100msnm)

Nota²: LARA=Lámina de agua rápidamente aprovechable a 60 cm de profundidad del suelo, en mm.

Nota³: el promedio de la industria para cortes primer tercio de zafra es de 360 mm al utilizar aspersión tipo cañón: 6 riegos, 20 días de frecuencia y de 3 horas de riego, 60mm/riego de lámina neta.

En cuanto a la sensibilidad de la caña de azúcar al déficit hídrico, se consideran las etapas: iniciación ó preparación, con una duración de 45 días, y elongación ó rápido crecimiento con una duración aproximada de seis meses. Estas etapas son las más sensibles al déficit hídrico, por lo que deben ser prioridad uno para la aplicación del riego en cada uno de los períodos de corte. El objetivo principal del **riego poscorte** en la etapa de iniciación o preparación es asegurar la población optima, así mismo, la eficiencia de las labores de fertilización y control de malezas. En cortes o siembras del primer período de zafra, el **período crítico** para el riego en la etapa de elongación se produce entre abril y mayo, los efectos son más evidentes cuando incide el fenómeno conocido como “ENSO” en su fase cálida (Niño), principalmente. Este fenómeno causa un retraso en las lluvias, que puede llegar a inicios de junio en el estrato bajo y litoral; en esta

situación, se han cuantificado reducciones en el tonelaje de 10 a 20 TCH si no se aplica riego en este período de retraso de las lluvias.

En cortes o siembras del segundo período de zafra (enero a marzo) el período crítico es en la fase final de la etapa de elongación, especialmente cuando el invierno termina a mediados de octubre, en este caso, el riego precorte deberá realizarse en la segunda quincena de octubre y noviembre, los cuales son necesarios hasta 30 días antes del corte, principalmente, en áreas con predominio de arena y arcilla, mientras que en suelos con buena retención de humedad como los francos limosos y/o francos arcillo limosos, el último riego precorte debe efectuarse 45 días antes del corte. La etapa de macollamiento es la menos sensible, por lo tanto debe considerarse como prioridad dos, esto no significa que no se realice ningún riego, sino que las frecuencias de riego pueden ser más prolongadas.

El **riego precorte** tiene como objetivo asegurar e incrementar el peso de los tallos molederos en la etapa final de la etapa de elongación que se realiza en el tercer período de zafra, representa un beneficio importante. En suelos con predominio de arena (francos arenosos) se obtuvieron incrementos de 27 a 36 TCH, mientras que en suelos con presencia de arcilla (franco arcilloso) incrementos entre 15 y 28 TCH. En condiciones de suelos con vetas de arena, la respuesta de la caña de azúcar al riego precorte es altamente significativa, los incrementos respecto a no regar las vetas, en dos períodos de prueba fue de 70 y 84 TCH, respectivamente.

En la Figura 3 se evidencia que la respuesta de la aplicación del agua a través del riego en un suelo franco es positiva para los tres períodos de corte, siendo mayor en

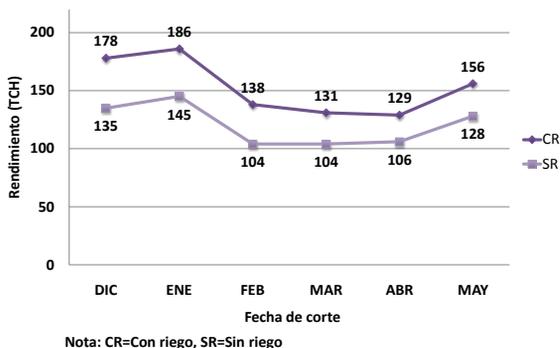


Figura 3. Respuesta de la caña de azúcar al agua en diferentes épocas de corte, en el estrato bajo de la zona cañera (La Unión, 1999)

La actividad del riego es rentable, su variabilidad dependerá de los siguientes factores: El costo de aplicación del agua; la cantidad de agua a aplicar, considerando la capacidad del suelo de retener humedad, y el precio de campo de las toneladas de caña. Al considerar un precio de campo de US \$11.00 estadounidenses, en el Cuadro 2 se observa que la LARA es igual a la lámina neta aplicar y el costo de la aplicación del agua a través del riego, son los factores que hacen que la diferencia en cuanto a la obtención de la tasa de retorno de capital, este puede fluctuar entre 4.44 a 0.33 (se interpreta de la manera siguiente: por ejemplo, si el valor dentro de la fluctuación indicada es 1.50 se entiende que por cada dólar que se invierte, se recupera el dólar invertido más US \$1.50). En la medida que los costos de aplicación sean altos, los valores de las tasas de retorno serán más pequeños y en algunos casos no rentable, tal como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Tasas de retorno de capital, según beneficios netos y costos en el riego, en diferentes tipos de suelo de la zona cañera de Guatemala (CENICCAÑA 2006)

LARA a 60 cm de prof. (mm)	20	30	40	50	60	70	80 ¹
▲ TCH ajustado (15%)	68	60	51	43	34	26	17
# total riegos	23	9	6	4	4	2	2
Requerimiento total (mm)	460	270	240	200	240	140	160
Fluctuación de costos US \$/mm/ha	Tasa de retorno = Beneficios netos / costo total tonelada extra producida						
0.3-1							
1-1.2	4.44 - 0.33						No rentable
1.2-1.7	No rentable				No rentable	No rentable	No rentable

Precio de campo: US\$ 11.00

1/los 10 centos (US\$0) son más bajos debido a la existencia del aporte capital, el cual es característico de los estratos más altos.

En las inversiones de capital para la compra de sistemas de riego se debe tomar en cuenta lo siguiente: 1. Los estratos bajo y litoral son las áreas con mayor déficit hídrico, por lo tanto, constituyen de esta manera las más indicadas para la inversión de sistemas de riego. 2. Es importante considerar que los riegos para cañas del primer tercio son los más rentables. 3. Dentro del estrato bajo y litoral, es determinante la capacidad del suelo de retener humedad, representado a través de LARA. En este sentido, con sistemas de riego mecanizado (pivotes y frontales), deben realizarse en suelos con LARA entre 30 y 60 mm, los cuales

representan tasas de retorno de 2.48 a 0.75. Mientras que las inversiones con sistemas tipo cañón deben hacerse únicamente en suelos con LARA entre 30 y 50 mm, en estas condiciones proporcionan tasas de retorno de 0.87 a 0.38, son mucho más bajas que los mecanizados debido al costo de operación.

PROCESO DE PLANIFICACIÓN DEL RIEGO

Este proceso se determina a través del método deductivo (de lo general a lo específico). Esta forma de planificar permite priorizar y optimizar el uso del agua. La secuencia de planificación se describe en la Figura 4.

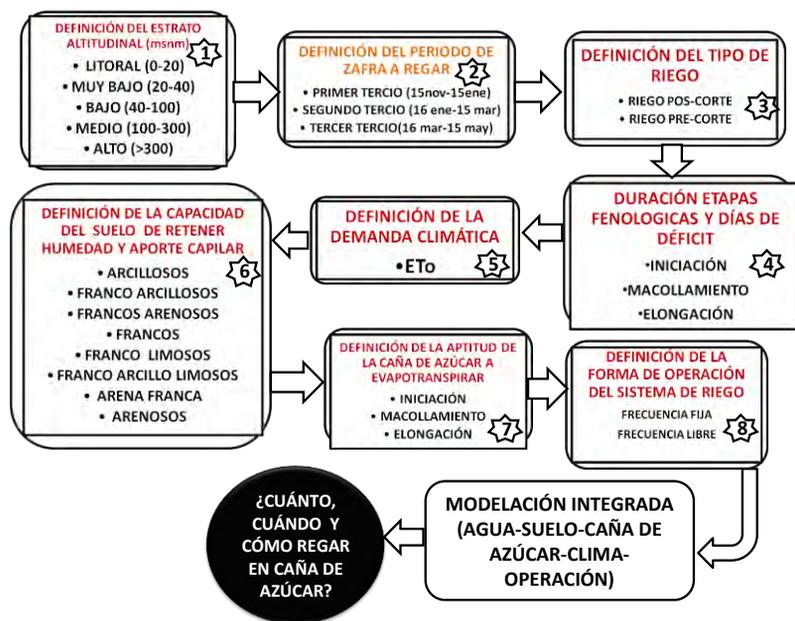


Figura 4. Proceso de planificación del riego bajo las condiciones de la zona cañera guatemalteca

Estrato altitudinal, periodo de zafra y tipo de riego: El estrato altitudinal y el periodo de zafra permiten planificar el inicio y el final de la temporada de la aplicación del agua, a través de cada uno de los sistemas de riego. El tipo de riego define si es **Riego poscorte** y/o **precorte** en cada uno de los estratos y periodos seleccionados. Para el caso del riego precorte es necesario definir el último riego según el tipo de suelo. En estos casos es recomendable planificar

en suelos con predominio de arena o arcilla 30 días antes del corte, y en suelos franco limosos 45 días antes. En la Figura 5, se presenta en forma integrada la información de los primeros procesos indicados.

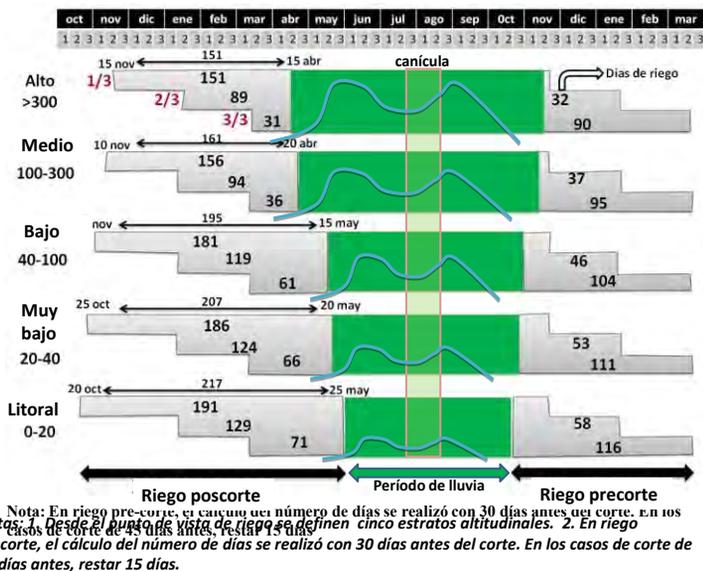
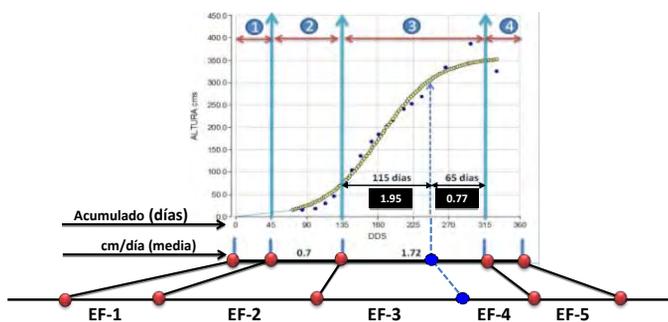


Figura 5. Información días promedio de déficit hídrico, días para riego después y antes del corte en cada uno de los periodos de zafra y estratos altitudinales

Duración de cada etapa fenológica a regar: En esta fase se determinan las etapas fenológicas que se deben regar, según el periodo de zafra y tipo de riego que corresponda. En la Figura 6 se analiza, a través de un modelo tipo gama, el comportamiento del crecimiento de los tallos molederos de la caña de azúcar, así mismo, una descripción de la duración y acumulado en cada una de las etapas fenológicas. Se observa en el periodo de 135 a 250 días después de la siembra (EF-3), que los tallos alcanzan su máximo crecimiento (en promedio 1.95 cms/día). Este periodo es relevante en el primer tercio de la zafra, luego en el tercer tercio. Dada esta característica se considera a esta etapa como crítica, en la cual no se debe permitir estrés. Otras de las etapas consideradas críticas es la etapa inicial (EF-1) debido a una condición de baja humedad en el suelo, la población por metro lineal se reduce significativamente. Con base en la Figura 6 se puede estimar el número de días para cada una de las etapas fenológicas, para que corresponda al total de días a regar en poscorte o precorte en cada uno de los estratos altitudinales.



Etapas fenológicas de la caña de azúcar y su duración			
NO.	ETAPA FENOLÓGICA	DURACIÓN (DÍAS)	ACUMULADO
1	INICIACIÓN (EF-1)	45	
2	MACOLLAMIENTO (EF-2)	90	135
3	A. ELONGACIÓN ETAPA I (EF-3)	115	250
	B. ELONGACIÓN ETAPA II (EF-4)	65	315
4	MADURACIÓN (EF-5)	45	360

Fuente: Ensayo en un área lisimétrica, estación experimental. CENGICANA 1997

Nota: La duración de las etapas fenológicas es variable en función de la variedad, número de cortes y estrato altitudinal

Figura 6. Etapas fenológicas de la caña de azúcar en condiciones de la zona cañera de Guatemala.

La demanda climática: Esta se determina a través de la evapotranspiración de un cultivo de referencia (E_{To}), el cual es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. Los únicos factores que afectan la E_{To} son los **parámetros climáticos** (FAO, 2008). En el Cuadro 3, se detallan para cada tercio de zafra y etapa fenológica los valores de E_{To} estimados a través de Penman-Monteith.

Cuadro 3. Valores de E_{To} promedio (mm) según etapas fenológicas, estratos altitudinales y tercios de zafra para las condiciones de la zona cañera guatemalteca

Estrato	EF-1			EF-2			EF-3			EF-4		
	1/3	2/3	3/3	1/3	2/3	3/3	1/3	2/3	3/3	1/3	2/3	3/3
Alto	4.36	4.75	5.00	4.84	5.08		5.16		4.48		4.44	4.45
Medio	4.70	5.30	5.41	5.39	5.54		5.47		4.66		4.60	4.89
Bajo	4.76	5.13	5.74	5.29	5.75	5.69	5.82		4.88		4.83	4.79
Muy Bajo	4.31	5.25	5.55	5.35	5.50	4.89	5.18		4.40		4.37	4.59
Litoral	4.51	5.03	5.55	5.14	5.48	5.10	5.28		4.57		4.65	4.63

Observaciones: Evapotranspiración de un cultivo de referencia (E_{To}) estimado con Penman-Monteith. Promedio años 2006-2010. La EF-3 en el 2/3 coincide con el invierno. La EF-4 no aplica para el 1/3

Etapa fenológica	Períodos de zafra
Iniciación (EF-1)	1/3=primer tercio
Macollamiento (EF-2)	2/3=segundo tercio
Elongación	a. Elongación Etapa I (EF-3)
	b. Elongación Etapa II (EF-4)

Capacidad del suelo para retener agua: La capacidad del suelo de retener agua es muy variable en la zona cañera guatemalteca y es dependiente de la clase textural. Los suelos con altos contenidos de arena tienen una baja capacidad de retención de agua, mientras que las clases texturales con predominio de limo tienen una alta capacidad de retención. La capacidad del suelo de retener agua es igual a lámina de agua aprovechable (LAA) el cual, se calcula con las constantes de humedad gravimétrica del suelo: Capacidad de campo y Porcentaje de marchitez permanente, ambas constantes definidas a nivel de laboratorio a 0.3 y 15 atmósferas respectivamente, además con el valor de densidad aparente y profundidad del suelo. Las LAA en cada una de las clases texturales, así como los valores de las constantes de humedad se observa en la Figura 7.

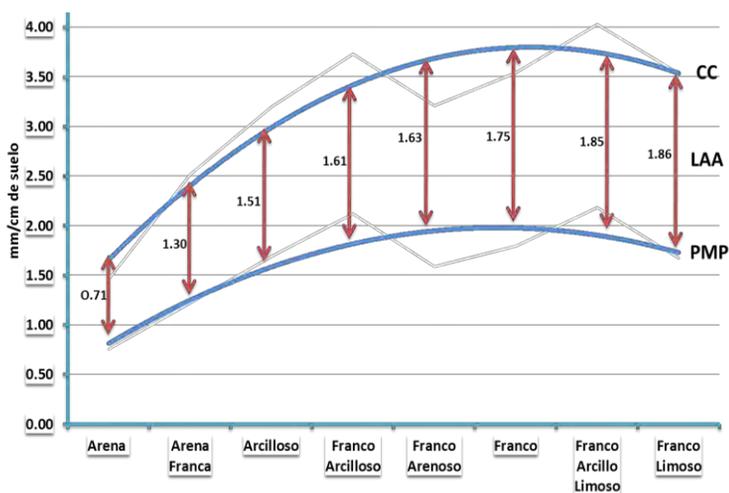


Figura 7. Valores medios de capacidad de retención de agua de los suelos de la zona cañera guatemalteca según la clase textural

Aptitud de la caña de azúcar a evapotranspirar. Con base en la aptitud de la caña de azúcar a evapotranspirar se seleccionan los valores de Kc que servirán para cuantificar las cantidades de agua que estará requiriendo el cultivo en cada etapa fenológica indicada en la Figura 6. En el Cuadro 4 se indican diferentes valores de Kc seleccionados bajo las condiciones edafo-climáticas de la zona cañera de Guatemala.

Cuadro 4. Valores de Kc según etapa fenológica y tipo de suelo, seleccionados en la zona cañera de Guatemala.

Textura	Etapas fenológicas (DDC)			
	EF-1 (0-45)	EF-2 (45-135)	Elongación	
			EF-3 (135-250)	EF-4 (250-315)
Kc (aptitud de la caña para evapotranspirar)				
Franco arenosos Franco arcillosos Arcillosos Arena franca Arena	0.3	0.6	0.9	1
Franco limosos Franco arcillo limosos Francos	0.3	0.3	0.6	0.7
Franco limoso+aporte capilar	0.3	0.3	0.3	0.3

Fuente: Los valores de Kc fueron seleccionados con base en la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación del agua a través del riego. Para tal fin se evaluaron en el proceso de experimentación distintos niveles de Kc en diferentes texturas predominantes de la zona cañera de Guatemala.

Operación del sistema de riego. Este factor es importante considerarlo en la planificación para la selección del sistema de riego a utilizar y define ¿El cómo regar? La selección estará determinada en utilizar sistemas de riego móviles que por sus características de traslado o movilidad tienen que operar con frecuencias o intervalos fijos [aspersores tipo cañón (presión alta) y miniaspersión (presión media), móviles o semifijos, desplazamiento frontal (uno o dos laterales) y surcos continuos o alternos con uso de mangas y compuertas, entre los más comunes]. La otra decisión es la selección de sistemas de riego que se pueden operar con frecuencias o intervalos libres [aspersión estacionario fijo permanente (cobertura total enterrada), aspersión estacionario temporales (cobertura total aérea), pivote fijo y goteo (cobertura total enterrada, sin turnos)]. El uso de frecuencias o intervalos fijos es la forma común de operación del riego en la zona cañera guatemalteca. En el futuro inmediato los sistemas con frecuencias o intervalos libres tomarán relevancia, principalmente, cuando se hable de agricultura de precisión. Los modelos a utilizar en cada una de las modalidades de operación se describen en la Figura 8.

- Seguimiento de la planificación

En los Cuadros 5 y 6 se describen dos ejemplos de seguimiento para la planificación del riego partiendo de la forma de operar el sistema. Como se observa en la Figura 8, el tipo de información de cada proceso determinará el modelo que se seguirá para responder las interrogantes ¿Cuánto y cuándo regar?

Ejemplo de cálculo para uso de un sistema que opera con frecuencia fija: La información que se solicita corresponde a las indicadas en cada uno de los procesos descritos anteriormente y se detalla en el Cuadro 5.

Frecuencia fija	Frecuencia libre
Balance hídrico no dinámico con parámetros: suelo, caña y clima fijos en cada etapa fenológica	Balance hídrico dinámico con parámetros de clima en tiempo real y suelo y caña fijos en cada etapa fenológica.
MODELOS	
<p>¿CUÁNTO REGAR /20 cm profundidad? LARA= LAA *DPM (1) » Donde: LARA, la lámina de agua rápidamente aprovechable expresada en mm. LAA, la lámina de agua aprovechable en mm, definida en el proceso 6. DPM, déficit permitido de manejo= 0.6 (adimensional). En el suelo existirá 0.4 de humedad residual Profundidades(cms)= 20 (EF-1), 40(EF-2) y 60 (EF-3 y 4)</p>	<p>¿CUÁNTO REGAR? LARA= LAA *DPM (2) » Donde: Diferencia del modelo (1) DPM= 0.2 a 0.3. En el suelo existirá 0.8 a 0.7 de humedad residual. Profundidades(cms)= 20 (EF-1), 40(EF-2) y 60 (EF-3 y 4)</p>
<p>¿CUÁNDO REGAR? INTERVALO DE RIEGO (IR)</p> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $IR (cms) = \frac{LARA}{ETO * Kc} \quad (3)$ </div>	<p>¿CUÁNDO REGAR?</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $LARA_{td} = LARA_{id} + \sum_{t=1}^n [P + R - (ETO * Kc)]$ <p style="text-align: center;">(4) ↓ ETC</p> </div> <p>Donde: LARA_{td} = Lámina de agua rápidamente aprovechable al final del día , LARA_{id} = Lámina de agua rápidamente aprovechable al inicio del día, P = Precipitación, R = Riego, ETO = Evapotranspiración de un cultivo de referencia (FAO), Kc = constante de aptitud de la caña a evapotranspirar (Valor adimensional) , ETc = Evapotranspiración máxima (Demanda hídrica diaria del cultivo)</p>

Figura 8. Modelos para la definición de ¿Cuánto y cuándo regar? de acuerdo a como se opera el sistema de riego en las condiciones de la zona cañera de Guatemala

Cuadro 5. Información básica para el ejemplo de cálculo de un sistema que opera con frecuencia fija

Proceso de planificación	Información
Período a regar según estrato altitudinal	Litoral, 20 oct – 25 may (Figura 5)
Período de zafra a regar	Primer tercio: 15 noviembre con 191 días de déficit (Figura 5)
Tipo de riego	Riego post-corte (Figura 5)
Duración etapas fenológicas a regar y días de déficit	Iniciación: 45, macollamiento 90 y elongación etapa I: 56(Figura 6)
Demanda climática (mm)	Iniciación: 4.5, macollamiento:5, elongación etapa I: 5.5(Cuadro 3)
Capacidad del suelo de retener humedad (mm/cm de suelo)	Franco arenoso: 1.63, sin aporte capilar(Figura 7)
Aptitud de la caña a evapotranspirar (Kc adimensional)	Iniciación: 0.3, macollamiento: 0.6 y elongación: 0.9 (Cuadro 4)
Forma de operación del sistema de riego	Frecuencia fija, sistema aspersión tipo cañón

Con base en la información indicada en el Cuadro 5 se establece que la secuencia del análisis debe realizarse como se indica en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Ejemplo de cálculos para planificar el ¿Cuánto y cuándo regar? para un sistema que opera con frecuencia fija (operación tradicional)

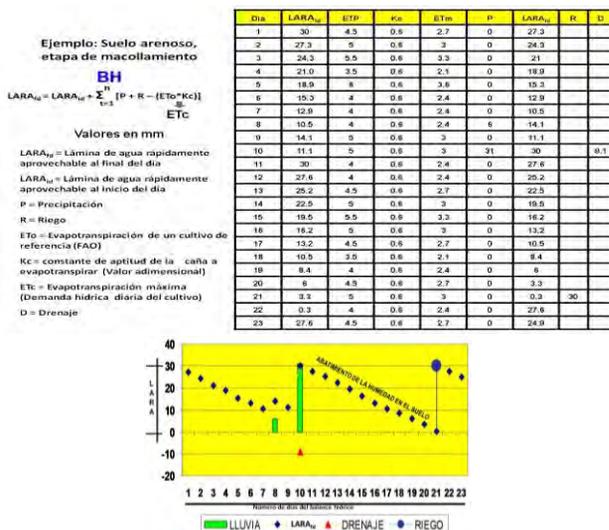
Factor	Variable a considerar	Valor	Cálculo	Resultado
LAA (mm)	mm/cm de suelo	1.63		
	Profundidad etapa iniciación (cm)	20	$20 * 1.63 =$	32.6
	Profundidad etapa macollamiento (cm)	40	$40 * 1.63 =$	65.2
	Profundidad etapa elongación (cm)	60	$60 * 1.63 =$	97.8
Observaciones: En el ejercicio se considera un suelo homogéneo, es recomendable determinar la textura para cada 20 cm de profundidad para tener un buen diagnóstico de la capacidad del suelo de retener humedad.				
LARA (mm) (¿Cuánto regar?)	LAA a 20cm	32.6	$32.6 * 0.6 =$	19.56
	LAA a 40cm	65.2	$65.2 * 0.6 =$	39.12
	LAA a 60cm	97.8	$97.8 * 0.6 =$	58.68
	DPM= 60%	0.6	se utiliza la ecuación (1)	
Observaciones: LARA es igual a la lámina neta, para cuantificar la lámina bruta, medir la eficiencia con que opera el sistema a utilizar				
Eto (mm/día)	Eto en Iniciación	4.5		
	Eto en macollamiento	5		
	Eto en elongación	5.5		
Kc (adimensional)	Kc en Iniciación	0.3		
	Kc en Macollamiento	0.6		
	Kc en Elongación	0.9		
Etc (mm)	Iniciación		$4.5 * 0.3 =$	1.35
	Macollamiento		$5.0 * 0.6 =$	3.00
	Elongación		$5.5 * 0.9 =$	4.95
IR (días) (¿Cuándo regar?)	Iniciación		$19.56 / 1.35 =$	14
	Macollamiento		$39.12 / 3.00 =$	13
	Elongación		$58.68 / 4.95 =$	12
			se utiliza la ecuación (3)	
No. de riegos	Iniciación (15nov-30 dic)	45	$45/14=$	3
	Macollamiento (31dic-30mar)	90	$90/13=$	7
	Elongación (31mar-25may)	56	$56/12=$	5
	total	191		15
Observación: La planificación considera el período del 15 de noviembre 2011 al 25 de mayo 2012. No se toma en cuenta las lluvias aisladas que puedan presentarse en el período.				

En la opción de frecuencia libre, el uso de información meteorológica es la forma sencilla y económica para dinamizar el modelo del balance hídrico indicado en la ecuación 4 de la Figura 8, principalmente, cuando se utiliza pivotes fijos (movimiento circular).

Con el uso de este modelo deben llevarse registros diarios de ETo y de la precipitación atmosférica. Como ya se indicó, la alternativa más confiable para estimar la ETo es con el modelo de Penman-Monteith, el cual puede obtenerse diariamente en el Sistema de Información Meteorológica (SIM) del sitio Web de CENGICAÑA.

El uso de otros modelos para estimar ETo implica que se tenga que definir factores de corrección tomando como base la ETo Penman-Monteith. Las grandes ventajas de uso de la ecuación (4) definida en la Figura 8 es que se puede tomar la decisión de regar desde una oficina, sin ningún problema. Además, los cálculos del balance hídrico se pueden realizar fácilmente a través de una hoja de Excel. El uso de este modelo también puede representar ahorro en el costo del riego, principalmente, los años en que incide el fenómeno “La Niña” (evento frío del ENSO), en el cual para la latitud de este país existe un incremento de lluvias aisladas en el período de riego, así mismo, constituye un método adecuado para determinar en cada año el inicio y final del periodo de riego.

Ejemplo de cálculo para uso de un sistema que opera con frecuencia libre:
En la Figura 9 se presenta un ejemplo de cálculo de un balance hídrico con el uso de la ecuación 4.



El dinamismo del balance hídrico (frecuencia libre) se debe, principalmente, al registro del consumo diario que tendrá el cultivo de la caña de azúcar con el cálculo de la $ET_c =$ Evapotranspiración máxima (demanda hídrica diaria del cultivo). El consumo diario también puede ser cuantificado en el suelo, a través del control del abatimiento de la humedad, para tal fin existe una serie de métodos directos e indirectos. El control de la humedad en el suelo *in situ*, representa, en comparación a la determinación realizada con la ET_c . Es un costo adicional en mano de obra e inversión de equipo especializado.

Control de la humedad en el suelo: Es una alternativa importante para realizar controles en la aplicación del riego, distribución del agua a nivel de parcela y ajuste de las frecuencias de riego en las etapas macollamiento y elongación, especialmente, en sistemas de riego que operan con frecuencias fijas. También es una buena opción para ejecutar el balance hídrico con sistemas que operan con frecuencia libre.

La medición de la cantidad de agua en el suelo se puede hacer con métodos directos e indirectos. Entre los métodos de medición directa están el gravimétrico-volumétrico y la determinación al tacto.

La determinación al tacto es el método más antiguo y sencillo, puede ser eficaz cuando se tiene experiencia. El método consiste en inspeccionar el suelo en forma ocular y al tacto de muestras del suelo de la zona radicular extraídas con barreno. Para la metodología de la determinación de la humedad al tacto puede utilizarse la técnica de Israelsen, 1965.

El método gravimétrico y volumétrico es el más exacto de todos, pero tiene la desventaja de que requiere mucho tiempo, es más caro y es destructivo cuando se muestrea constantemente un mismo punto. El método directo es la base para la calibración de los métodos indirectos y es muy importante para el proceso de investigación básica. En la Figura 10 se explica la relación suelo-agua y las ecuaciones (5) y (6) para determinar la humedad gravimétrica y/o volumétrica.

Los métodos indirectos se basan en la medición del contenido de agua en el suelo con el uso de instrumentos, como: El tensiómetro y sensores de matriz granular (GMS) que miden el potencial mátrico, y la sonda de neutrones que utiliza fuentes radiactivas. En la actualidad, se han desarrollado nuevos instrumentos, como los electromagnéticos, entre ellos, el TDR (Reflectometría de dominio del tiempo) y el FDR (Reflectometría de dominio de frecuencias).

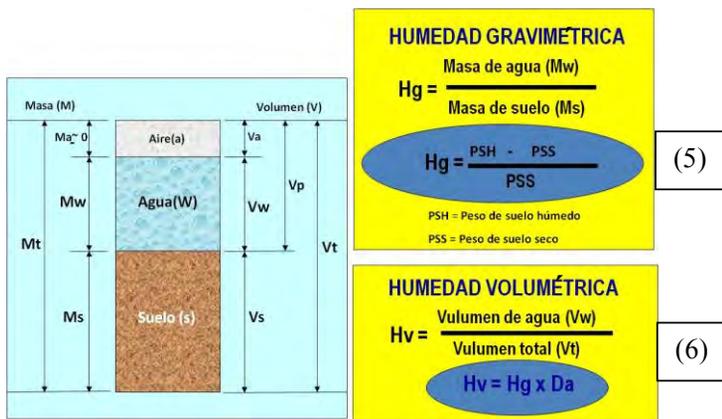


Figura 10. La relación masa-volumen y la determinación de la humedad gravimétrica y volumétrica del suelo con fines de calibración de métodos indirectos

- **Criterios técnicos importantes en la utilización de métodos indirectos:**

Selección del sitio: En la utilización de métodos indirectos, la selección del sitio es determinante, el cual tiene que ser representativo del área donde está ubicado el sistema de riego. Si el área es homogénea, los sitios representativos para medir la humedad en el suelo pueden ser uno o dos sitios de medición, pero si es heterogénea, el número de sitios representativos deberán ser mayor de dos, según el grado de heterogeneidad. En suelos muy heterogéneos, no existe una receta que indique un número fijo de sitios, pero la decisión dependerá del tipo de agricultura que se practique y del tipo de sistema de riego que se disponga. El número mayor, obviamente, sería para una agricultura de precisión. Las decisiones se centran en el ¿Cuánto y cuándo regar?.

Rango o intervalo de humedad que se desee manejar: Estará definido por la selección de la forma de operar el sistema de riego. Por ejemplo, si se utilizan sistemas de riego que se manejan con un balance hídrico dinámico; como ejemplo, el pivote central fijo. Entonces, en estas circunstancias, el rango de humedad que se cuantificará será entre saturación a 30 por ciento de consumo, entre el rango de CC y PMP. La calibración, en este caso, podría realizarse en el rango de humedad entre saturación a 40 por ciento de consumo de agua, el cual permite evaluar el abatimiento de la humedad en ese rango. Si los métodos indirectos se utilizan como medio de control de humedad en el suelo en

sistemas de frecuencia fija, el rango o intervalo a calibrar deberá estar entre saturación a 70 por ciento de consumo en el suelo. Ahora, si el fin es experimental, el método a utilizar deberá ser calibrado entre saturación a PMP.

El método indirecto a utilizar: Deberá ser seleccionado en función del rango de interés, tal como se indicó en el párrafo anterior. Es importante afirmar que cada casa matriz que vende y distribuye, proporciona recomendaciones específicas de uso y manejo del instrumento, así mismo, la metodología de calibración específicas, por lo que es importante considerarlas. Por ejemplo, para el caso de la sonda FDR tipo enviroscan, para su calibración se tienen que realizar lecturas de frecuencia del sensor en el aire seco, en el agua y el suelo con el fin de calcular la frecuencia normalizada o universal.

- Unidades de medida y conversiones

Unidades de longitud

Base 1 metro (m)

1m=0.001 kilómetros= 100 centímetros= 1000 milímetros= 39.37 pulgadas= 3.28 pies= 1.094 yardas

Unidades de área

Base 1 hectárea (ha)

1 ha=10,000 m²=2.471 acres= 1.429 manzanas

1 manzana= 16 cuerdas

1 cuerda= 20.9 * 20.9 metros =436.81 m²

Unidades de presión

La Atmósfera (Atm) equivale a 76 cm de altura de mercurio. Como el peso específico del mercurio es 13.5951 g/cm³, se deduce:

1 atm=13.5951 g/cm³ * 76= 1,033 g/cm²=1.03333 kg/cm²

1 atm=1.013 bar

Otra forma de medir la presión es hacerla equivalente a una columna de agua (h) cuya base es 1 cm² y cuya altura es h.

1 atm=1,033g/cm²=1,033 g/cm³=1 cm * 1 cm * h cm

h= 1,033 cm = 10.33 m de columna de agua (mca).

En la práctica se considera:

1 atm= 1 kg/cm² = 10 mca = 1 bar = 10⁵ Pa = 100 kPa = 100cb = 0.1 MPa = 14.7 psi

- Conversión de valores de presión a porcentajes de humedad gravimétrica en el suelo

La conversión de valores de presión o tensión en el suelo a porcentajes de humedad gravimétrica se puede realizar a través del método desarrollado por Palacios Vélez en 1966. Dicho método de basa en el conocimiento de que los parámetros CC y

PMP son determinados en el laboratorio a una tensión de 0.3 y 15 atmósferas respectivamente. En la Figura 11 se expone un ejemplo para su determinación.

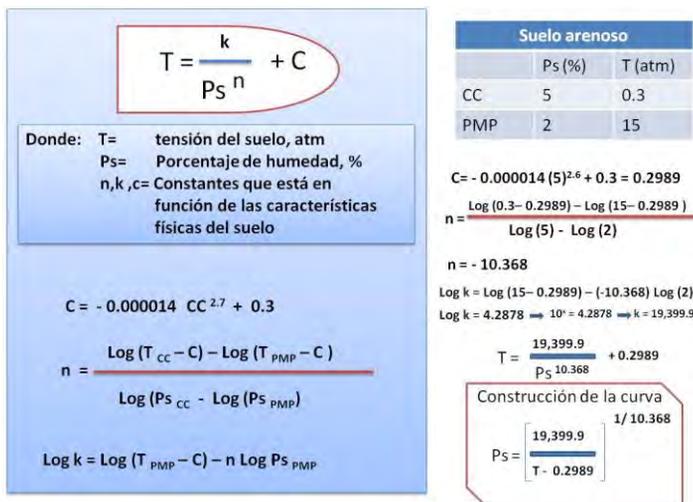


Figura 11. Conversión de valores de presión a porcentajes de humedad en el suelo

Unidades volumen

Base 1 metro cúbico (m³)

1 m³= 1,000 litros= 264.1 galones = 35.31 pies cúbicos

1 Megalitro (ML)

1 ML= 1,000 m³

Unidades de flujo

Base 1 metro cúbico /segundo (m³/s)

1 m³/s= 1,000 litros/segundo= 6 x 10⁴ litros/ minuto= 36 x 10⁵ litros/hora=864 x 10⁵ litros/día

1 m³/s=60 m³/min=36 x 10² m³/h= 864x 10² m³/día

1 m³/s=264.17 galones/segundo= 15,850.32 galones por minuto

Unidades de lámina

base 1 milímetro (mm)

1 mm= 1 litro/m²= 10,000 litros/hectárea= 10 m³/hectárea

1 mm/día= 0.116 litros por segundo/día= 1.83 galones por minuto/día= 10 m³/hectárea/día

BIBLIOGRAFÍA

1. Barragán, F., Javier. 1998. Evaluación de los regadíos y mejora de su eficiencia. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida, España.
2. Bos, M.G. 1990. On irrigation efficiencies. Publication 19. Fourth edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, P.O. Box 45,6700 AA Wageningen, The Netherlands.
3. CENGICAÑA. 2010. Presentación en PowerPoint. Análisis de la zafra 2009/10.
4. CENGICAÑA. 2011. Base de datos estaciones meteorológicas automatizadas. Base electrónica.
5. Castro, O.; Pinzón, J.; Montúfar, J. 2004. Abatimiento del aporte capilar en el período de verano, caso finca “Laguna Blanca”. Corporación San Diego-Trinidad. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2003-2004. Guatemala, CENGICAÑA. pp.168-162.
6. Castro, O.; Pinzón, J.; Montúfar, J. 2004. La respuesta de la caña de azúcar al riego, resultados de plantía temporada de riego 2002-2003. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2003-2004. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 173-179.
7. Castro, O. 2005. El balance hídrico (herramienta para la planificación del riego en caña de azúcar). En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 134-141.
8. Castro, O.; Esquit, V. 2006. Recomendaciones para la optimización del uso del agua, el balance hídrico en pivotes fijos, con un ejemplo de su utilización en la finca “Monte Alegre”, La Unión. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2004 – 2005. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 230-237.
9. Castro, O.; Veliz, E.; Osorio, R.; Esquit, V.; López, H.; Toledo, E.; Pocasangre, R.; López, F.; Rosales, E. 2006. Recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego en la caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 238-244.

10. Muñoz, E.; Castro, O. 1999. Análisis cronológico y espacial de la respuesta de la caña al riego en la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1998-1999. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 153-159.
11. Castro, O.; Suárez, A.; Villatoro, B.; Rosales, C. 2007. Estrategias técnicas de riego para el manejo de vetas arenosas. Una aproximación de agricultura de precisión para la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2006–2007. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 188-197.
12. Castro, O.; Rosales, C. 2007. Recomendaciones técnicas y económicas para la aplicación del riego en ambientes con aporte capilar, en la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2006 – 2007. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 179-187.
13. Castro, O. 2008. Recomendaciones técnicas y económicas para la programación del riego en la zona cañera guatemalteca. VII Congreso de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe. Presentación en Power Point.
14. CENGICAÑA. 2009. Base de datos de información de análisis físico de muestras de suelos ingresados al laboratorio de suelos desde 1994. Archivo electrónico.
15. CENGICAÑA. 2009. Base de datos de variables meteorológicas de 2005 a la fecha. Área de Agrometeorología. Archivo electrónico.
16. CENICAÑA. Torres, J; Cruz, R.; Villegas, F. 1996. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Colombia. 53p.
17. CIMMYT. 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. Un manual metodológico de evaluación económica. Edición completamente revisada. México D.F. México. CIMMYT.
18. García, I.; Jimenez, J.; Muriel, J.; Perea, F.; Vanderlinden, K. 2005. Evaluación de sondas de capacitancia para el seguimiento de la humedad de un suelo arcilloso bajo distintas condiciones y tipo de manejo. Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VII. Andalucía, España.
19. FAO. 2008. Evapotranspiración de un cultivo de referencia. Folleto serie Riego y drenaje Número 56. Archivo electrónico. 71 p.

20. INSIVUMEH. Base de datos históricas de lluvia de las estaciones meteorológicas “San José” y “Camantulul”. Base electrónica.
21. La UNIÓN. 1999. Base de datos estación fenológica, finca Tehuantepec. Archivo electrónico.
22. Sentek. 2001. Calibration of Sentek Pty Ltd. Soil Moisture Sensor sentek. Stepney, Australia.
23. Tarjuelo Martín, José. 1995. El riego por aspersión y su tecnología. Ediciones Mundi – prensa. España. pp. 81-135.

IX. EL MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS

EL MANEJO INTEGRADO DE PLAGAS

José Manuel Márquez*

INTRODUCCIÓN

El Manejo Integrado de Plagas (MIP) es un concepto amplio que se refiere a un sistema de manejo de poblaciones plagas, que utiliza todas las técnicas adecuadas en una forma compatible, para reducir dichas poblaciones y mantenerlas por debajo de aquellos niveles capaces de causar daño económico (Smith y Reynolds, 1966). Combina e integra los métodos químicos, culturales, físicos, etológicos, genéticos y biológicos, con el propósito de reducir las pérdidas económicas. En la toma de decisiones, la pregunta fundamental en la cual se basa es la necesidad de conocer cuántos insectos causan tal cantidad de daño y si este daño es significativo para iniciar la acción de control. Sin duda, la evaluación de una población a través del monitoreo debe llevar a un proceso de toma de decisiones, y según Pedigo (1996) estos conocimientos caen dentro de la **Bioeconomía**, definida como el estudio de las relaciones entre las densidades de las plagas, las respuestas de los hospederos al daño y las pérdidas económicas resultantes. De las reglas de decisión, ninguna ha tenido más éxito que las relacionadas con el concepto del nivel de daño económico (NDE) de Stern *et al.* (1959). Este concepto constituye la base de la mayoría de los programas de Manejo Integrado que se usan actualmente, con la ventaja de su simplicidad y aplicación práctica en la mayoría de las situaciones. El nivel de daño económico se debe interpretar como la densidad poblacional de la plaga, en la cual el costo de la medida de control iguala al beneficio económico esperado, es decir, que la acción de control “salva” una parte del rendimiento, el cual se hubiera perdido si no se toma la decisión de hacer el control. Esta condición se expresa por la ecuación:

$$C = ID \times D \times P \times K$$

De donde:

C = Costo económico asociado a la medida o plan de manejo de la plaga

ID = El índice de daño determinado para la plaga

D = Densidad poblacional de la plaga

P = Precio unitario de venta del producto

K = El grado de supresión de la plaga, efectuado por la medida de control

* Ing. Agr., M.Sc., Coordinador del Programa de Manejo Integrado de Plagas de CENGICANA.
www.cengicana.org

El rendimiento salvado o protegido tiene un valor monetario, el cual se estima utilizando parámetros biológicos y económicos que se encuentran representados por (ID, D, P, K). En total, debe ser igual al valor monetario que se invierte en la acción de control (C), es decir, que el NDE es la densidad poblacional de la plaga donde el valor del rendimiento salvado o protegido cubre exactamente los gastos del control invertidos. El índice de daño (ID) es la pérdida de azúcar (libras, kilogramos o toneladas) por hectárea, asociado a una unidad de densidad de la plaga o unidad de daño. Para determinar el ID se diseñan experimentos que permiten conocer y cuantificar la relación entre la densidad de la plaga y su efecto en la reducción del rendimiento en peso de caña o recuperación de azúcar. El programa MIP-CENGICAÑA en colaboración con el Comité de Manejo Integrado de Plagas (CAÑAMIP) ha generado valores de pérdida e índices de daño para las principales plagas, las que se presentan en el Cuadro 1. Estos valores son relativos y variables, según las condiciones locales y valores de manejo para cada genio.

Cuadro 1. Factor de pérdida e índice de daño estimado para las principales plagas en Guatemala. CENGICAÑA-CAÑAMIP

Plaga	Factor de pérdida	Índice de daño	Umbral económico
Chinche salivosa	8.21 TCH/1 ad/tallo 5.83 kg Az/t/1adulto/tallo	1465kg Az/ha/1 adulto/tallo	0.05-0.10 ninfas y adultos/tallo
Gallina ciega	0.62 TCH/larva/m ²	70.9 kg Az/ha/1 larva/m ²	10 larvas/m ²
Rata de campo	0.5 TCH/1 % infestación. 2.19 kg Az/t/1% i.i	65 kg Az/ha/1% infestación	6 % de tallos dañados
Barrenador del tallo	0.36 kg Az/t/1% intensidad de infestación	32.4 kg Az/ha/1% intensidad de infestación	7 % de intensidad de infestación
Chinche hedionda	0.053 TCH/insecto/m ²	6.09 kg Az/ha/insecto/m ²	100 insectos/m ²
Termitas subterráneas	0.45 TCH (CP72-1312) 0.22 TCH (CP72-2086)	23.3 -47.7 kg Az/ha/1 % infestación	10 % de tallos dañados en cosecha

MANEJO INTEGRADO DE LOS BARRENADORES DEL TALLO EN CAÑA DE AZÚCAR

Barrenadores del género *Diatraea*

Las especies del género *Diatraea* (Lepidóptera:Pyralidae) son las de mayor importancia económica y mayor distribución geográfica en Guatemala. *Diatraea* nr. *crambidoides* (Grote) tiene una abundancia relativa del 73 por ciento en el estrato bajo y litoral, comparado con un 27 por ciento de *D. saccharalis* (Fabricius). Otras especies como *Xubida dentilineatella*

(Lepidóptera:Crambidae), *Phassus phalerus* Druce (Lepidóptera:Hepialidae) y otras aún no determinadas, ocurren a altitudes mayores de 300 msnm en un ambiente templado y húmedo de la zona cañera. La biología de las especies de *Diatraea* indica que ambas colocan huevos agregados en posturas (Figura 1) y requieren entre 5 y 6 días para eclosionar (Figura 2). El período de desarrollo larval es significativamente diferente, ya que en *D. saccharalis* es de 21 a 23 días, en tanto que en *D. nr. crambidoides* se prolonga de 33 a 43 días. Es por ello que el ciclo promedio de vida se estima entre 41 y 57 días, respectivamente. Las larvas de *D. saccharalis* presentan el tubérculo mesotorácico dorsal alargado transversalmente y redondeado en la parte anterior, mientras que *D. nr. crambidoides* tiene el tubérculo mesotorácico dorsal en forma de “B” alargada, con una incisión media anterior (Figura 3). El período de pupa requiere de 8 a 10 días, luego emergen los adultos (Figura 4), que viven de 3 a 4 días en promedio. Rara vez se ven los adultos en el campo, ya que son de hábitos nocturnos y voladores de poco alcance, atraídos por las luces artificiales nocturnas.



Figura 1. Postura de huevos de *Diatraea nr. crambidoides*



Figura 2. Emergencia de larvas del Barrenador de una postura de huevos



Figura 3. Tubérculo mesotorácico de *D. saccharalis* (izquierda) y *D. nr. crambidoides* (derecha)



Figura 4. Hembra y macho adultos de *D. nr. crambidoides*

El daño es el resultado de la actividad alimenticia del estado larval, que puede ocasionar la muerte del meristemo apical (corazón muerto) en la etapa de macollamiento, pero en las etapas de elongación y maduración, el daño se asocia a la construcción de galerías, en donde la larva habita la mayor parte de su ciclo (Figura 5). La reducción en el tonelaje parece no ser significativa, pero sí en la calidad de jugo, ya que en las galerías prolifera el hongo *Calletotrichum falcatum*, responsable del muermo rojo que produce reducciones en el Pol, Brix y aumenta el porcentaje de fibra. Estudios de CENGICANA-CAÑAMIP indican que el factor de pérdida es de 0.36 kg Az/t, por cada uno por ciento de entrenudos dañados. Para una producción promedio de 90 t/ha, se estima un índice de daño de aproximadamente 32.4 kg de azúcar por hectárea/1 por ciento de entrenudos dañados. Las mayores pérdidas ocurren en el estrato litoral

Pacífico, en donde al menos 57,075 hectáreas se han monitoreado, de esas aproximadamente el 11.9 por ciento superó el umbral de acción de 5.0 por ciento de intensidad de infestación (i.i), en la zafra 2010-2011.



Figura 5. Perforaciones en el tallo y larva del Barrenador dentro de la galería

***Phassus phalerus* Druce**

Phassus phalerus (Lepidóptera:Hepialidae) es un Barrenador de ocurrencia estacional entre julio y noviembre, en campos de caña ubicados a altitudes mayores de 300 msnm. Según Márquez *et al.* (2009) la abundancia relativa está entre 19.9 y 20.8 por ciento en un ambiente templado y húmedo de la zona cañera de Guatemala. En la Figura 6, se observan larvas, pupa y adulto de este Barrenador.



Figura 6. Formas vivas del Barrenador *Phassus phalerus* en caña de azúcar. Programa MIP-CENGICAÑA

***Elasmopalpus lignosellus* Zeller (Lepidóptera:Pyralidae)**

La larva presenta una coloración variable de amarillo pálido a amarillo verdoso, luego verde pálido y, finalmente, verde azulado. Presenta bandas transversales rojizo púrpura y varias líneas longitudinales marrón rojizo en el dorso, que se

interrumpen al final de cada segmento (Figura 7). La mayor infestación ocurre cada año entre enero y abril (15.7-19.9 por ciento), cuando el suelo está seco y el cultivo está en su fase de macollamiento. La larva perfora a la altura del cuello de las plántulas, penetra y construye una galería en donde se alimenta y provoca el secamiento del cogollo central (corazón muerto). Desaparece cuando se establecen las lluvias o con el período de riego. No representa una especie de importancia económica.



Figura 7. Larva de *Elasmopalpus lignosellus*

Estrategias de control

En macollamiento: Con base en el valor del daño medido en cosecha, se establecen rangos para programar una secuencia básica de control. Rangos bajos de daño entre 0.001 y 2.00 de intensidad de infestación (i.i) requieren de al menos dos liberaciones de *Trichogramma exiguum* (Hymenóptera: Trichogrammatidae) un parasitoide de huevos, a razón de 40 pulgadas cuadradas por hectárea. Rangos de 2.01 a 4.00 (% i.i) requieren de igual liberación de *Trichogramma* (Figura 8) y un entresaque de “corazones muertos” para extraer larvas, entre los 60 y 90 días después del corte. Entre 4.01 y 6.00 por ciento, requiere de tres liberaciones de *Trichogramma*, el entresaque de corazones muertos y considerar la aplicación de algún bioinsecticida comercial, como *Bacillus thuringiensis*, virus de la poliedrosis nuclear (VPN), virus de la poliedrosis citoplasmática (VPC). Daños mayores del 6 por ciento requieren de una captura de adultos con trampas de luz, entre los 20 días después del corte; un programa de cuatro liberaciones de *Trichogramma*; el entresaque de corazones muertos, cuando el muestreo indique una densidad larval mayor de 1,300 larvas/ha; así como la posibilidad de un programa de tres aplicaciones de bioinsecticida. El control de malezas dentro y fuera de la plantación es necesario para eliminar hospederos alternos del Barrenador.

En elongación: Las acciones de control se reducen debido a la dificultad de ingreso a los campos de cultivo, pero según la priorización obtenida con el muestreo de daño y densidad larval, será necesario implementar un programa de liberaciones alternas de *Cotesia flavipes* (Hymenóptera: Braconidae) y *Paratheresia claripalpis* (Díptera: Tachinidae). Esta acción debe apoyarse con el muestreo de parasitismo, que se obtiene mediante la colecta de larvas del Barrenador a los 15 y 30 días después de las liberaciones (Figuras 9 y 10).

En maduración: La infestación es creciente en esta etapa, asociada al establecimiento de la época seca y el alto desarrollo del cultivo, sin embargo, por las acciones de control tomadas en las etapas anteriores debería observarse una reducción efectiva. En casos de alta infestación, pueden hacerse aplicaciones aéreas de bioinsecticidas o Tebufenozide. Es recomendable realizar una cosecha en bloques, procurar un corte al ras de la caña y eliminar los cogollos, pues se convierten en hospederos alternos para el siguiente ciclo de cultivo.

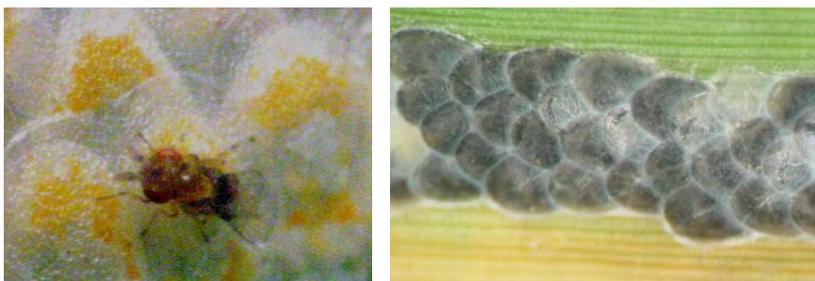


Figura 8. Avispa de *Trichogramma exiguum* sobre una postura del Barrenador (izquierda) y el detalle de huevos parasitados (derecha)



Figura 9. Adulto de *Paratheresia claripalpis* (izquierda), parasitismo sobre larva del Barrenador (derecha)



Figura 10. Adulto de *Cotesia flavipes* (a), vasos de liberación (b) y cocones resultantes de la parasitación (c)

PLAGAS QUE AFECTAN EL FOLLAJE

Manejo integrado de la Chinche salivosa (Homóptera: Cercopidae)

Aeneolamia postica y *Prosapia similans* son las especies de importancia en el cultivo de caña de azúcar, con el 96 y 4 por ciento de abundancia, respectivamente (Márquez *et al.*, 2002). Es un insecto con aparato bucal picador-chupador, que se alimenta del xilema de una gran variedad de gramíneas neotropicales y cuya infestación en caña de azúcar se repite cada año con los huevos diapáusicos depositados en el suelo, el ciclo anterior. Estos huevos dan origen a la primera generación de ninfas en la estación lluviosa, y de ahí surgen (Figura 11) varias generaciones de adultos cuyos huevos ya no tienen diapausa y eclosionan en 15 días, lo que aumenta la densidad poblacional en el campo (Figura 12).



Figura 11. Salivazos de Chinche salivosa en cuyo interior se encuentra una ninfa

Tanto ninfas como adultos utilizan su estilete para elaborar túneles de alimentación, que finalizan en los elementos del xilema ((Byers y Wells, 1996). Debido a la baja calidad nutritiva de la savia del xilema el estado de ninfa se prolonga por al menos 30 días, formando una espuma alrededor de su cuerpo blando y permanecen en las raíces adventicias del cultivo. Cuando alcanzan el estado adulto, estos insectos migran hacia el follaje y al alimentarse introducen una sustancia tóxica que destruye e interfiere en la formación de clorofila (Figura 13), cuyo síntoma es conocido como “quemazón”, que afecta tanto el desarrollo normal de la planta como la acumulación de sacarosa.

Con base en esta biología, es evidente que el mayor éxito en el control de la plaga está en la reducción de la población de huevos diapáusicos y las ninfas, reducir o atrasar la ocurrencia del período crítico que produce altas densidades de adultos (Márquez *et al.*, 2009) entre julio y agosto. Debido a la acumulación de los huevos diapáusicos, a través del tiempo y a las condiciones de alta humedad, hay campos que rápidamente alcanzan el estatus de “alta infestación”, donde el daño foliar es mayor del 60 por ciento y dado que el período crítico de ocurrencia es de 6 a 8 meses de edad del cultivo, los índices de pérdida pueden alcanzar 8.21 TCH de caña y 5.83 kg Az/t, por cada adulto/tallo (Márquez *et al.*, 2001).

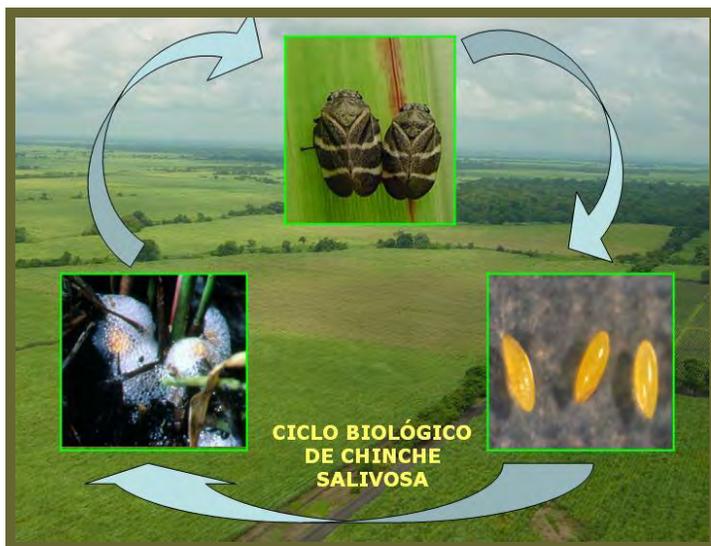


Figura 12. Ciclo biológico de Chinche salivosa



Figura 13. Daño foliar causado por Chinche salivosa (izquierda) y el síntoma de quemazón en un campo de caña de azúcar (derecha)

Control de huevos diapáusicos después del corte: El Comité de Manejo Integrado de Plagas (CAÑAMIP) y el Programa de Manejo Integrado de Plagas de CENGICAÑA han documentado una secuencia básica de referencia que incluye información sobre la época para cada actividad, forma de realizarla, criterio de uso, equipo, eficiencia operativa y las condiciones especiales para garantizar la eficacia de su ejecución (Márquez, 2010). El éxito del manejo integrado se basa en la reducción de la población de huevos, mediante la implementación de una secuencia básica de labores mecanizadas que incluye el uso de implementos como la rastra sanitaria (Figura 14), el rodillo de púas o Lilliston (Figura 15), descarne, desaporque, cultivo-aporque y las mejoras en el drenaje de los campos que se anegan en la época lluviosa. El propósito de este control cultural es el de reducir la cantidad de huevos diapáusicos, mediante su exposición al sol y a los depredadores. Estas labores se practican inmediatamente después de la cosecha de la caña, para no dañar la brotación de la cepa y asegurar al menos un 60 por ciento en la reducción de huevos.



Figura 14. Uso de la rastra sanitaria



Figura 15. Uso del rodillo de púas o Lilliston

Control de ninfas y adultos: Cuando empieza la época de lluvia es necesario iniciar los monitoreos de ninfas y adultos, ya sea mediante el uso de trampas amarillas adhesivas en el contorno de los campos, o con el muestreo visual utilizando las macollas como unidades de observación. El umbral de acción para aplicaciones terrestres de *Metarhizium anisopliae* varía entre 0.05 y 0.10 insectos/tallo dirigidas al control de la primera generación de ninfas, lo que causará la epizootia en adultos en el campo (Figura 16). Las áreas con antecedentes de daño severo en la zafra anterior requieren de un análisis que considere la opción de aplicar productos químicos sistémicos preventivos (Thiamethoxam, Imidacloprid) o bien el cambio de fecha de corte o la renovación del cultivo.



Figura 16. Aspecto de adultos parasitados por *Metarhizium anisopliae*

El daño foliar debe medirse a finales de septiembre o principios de octubre y, con base en el porcentaje, clasificar los campos en las categorías de daño leve (0-40 %), moderado (41-60 %) o severo, cuando es mayor del 60 por ciento de daño foliar.

Chinche de encaje, *Leptodyctia tabida* (Hemíptera: Tingidae)

Chinche de encaje es un insecto con aparato bucal picador-chupador, que fue descrita por primera vez por Herrich-Schaeffer como *Monanthia tabida* en especímenes colectados en México en 1839, aunque más tarde fue nombrada *Leptodyctia tabida* por Champion, en 1900. Los adultos tienen el cuerpo aplanado; sus alas de forma oval y alargadas que se extienden más allá del abdomen; además son semitransparentes y las nervaduras parecen un fino encaje, de donde proviene su nombre “Chinche de encaje” (Figura 17). Las antenas son amarillentas, largas y finas; el pronoto es estrecho en la parte anterior. Las ninfas son planas, de color blanquecino y con muchas espinas dorsales ramificadas, erguidas y largas. Las ninfas mudan cinco veces y alcanzan su madurez en, aproximadamente, 15 días. Los huevos son muy

pequeños y se depositan en las células del parénquima en el envés de la hoja. Según Chang, 1985, Chinche de encaje se ha reportado sobre maíz (*Zea mays*); pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq); pasto Johnson (*Sorghum halepense*); *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauvois; bambú; caña de azúcar (*S. officinarum*) y teosinte (*Zea mexicana*). Pareciera existir una relación entre los niveles de estrés en las plantaciones provocados tanto por el exceso de humedad como la sequía, que favorecen el surgimiento de la plaga y su eventual dispersión.

La presencia de Chinche de encaje en Guatemala (Figura 18) ha sido cada vez más evidente en los campos de cultivo, tal como se reporta en el Análisis de la Zafra 2007-2008, en donde al menos 19,670 hectáreas tuvieron algún grado de incidencia. La ocurrencia de lluvias intensas en el período de julio a septiembre influye en la reducción de la infestación de Chinche de encaje, debido a que provocan la caída al suelo de las colonias de ninfas. Por ahora, la lluvia representa un factor benéfico en los campos de caña, para evitar que las infestaciones se prolonguen por más tiempo y con ello reducir los riesgos de los efectos negativos en el desarrollo. Se determinó una preferencia de infestación en la variedad CP88-1165, cuya dispersión ha sido amplia en la zona cañera.



Figura 17. Detalle del adulto y formación de colonias en caña de azúcar



Figura 18. Aspecto de un campo de caña de azúcar infestado por Chinche de encaje

**Coludo o Saltahojas antillano; *Saccharosydne saccharivora*
(Homóptera: Delphacidae)**

Es un insecto con aparato bucal picador chupador, conocido como Saltahojas antillano, Saltahojas verde de la caña, Coludo, Green leaf - hopper, West indian cane leafhopper. Ha sido importante en regiones del Caribe como Jamaica, aunque su distribución ocurre desde el sur de los EEUU, pasa por el Caribe y llega hasta Venezuela. El macho adulto (Figura 19) posee alas bien desarrolladas y transparentes, mientras que las hembras y las ninfas tienen unos filamentos blancos cerosos, pegados al abdomen (Figura 20), del cual deriva el nombre de Coludo. El daño directo es un debilitamiento general de la planta, pero el indirecto resulta del rápido desarrollo de la colonia, en donde, tanto las ninfas como los adultos, producen gran cantidad de secreciones azucaradas que caen sobre el haz de las hojas inferiores. Esta secreción sirve como sustrato para la reproducción del hongo *Capnodium* spp, el cual cubre las hojas con una costra gruesa negra compuesta por las esporas del hongo (fumagina). Dicha capa obstruye el intercambio gaseoso a través de las hojas, afectándose severamente la transpiración, la fotosíntesis y, por consiguiente, limita el crecimiento de las plantas (Giraldo-Vanegas *et al.*, 2005). El control con insecticidas sistémicos es recomendado cuando ocurre en plantaciones menores de tres meses, y en especial si es en condición de caña plantía, además de una fertilización nitrogenada para acelerar su recuperación.



Figura 19. Macho adulto del Coludo



Figura 20. Colonia de ninfas del Coludo (izquierda) y presencia de fumagina en las hojas inferiores (derecha)

Saltahojas hawaiano; *Perkinsiella saccharicida* (Homóptera: Delphacidae)

Perkinsiella saccharicida (Figura 21) es originaria de Australia y su ocurrencia en la caña de azúcar produce síntomas de amarillamiento, crecimiento lento, acortamiento de los entrenudos, secamiento prematuro de las hojas y muerte de las plantas jóvenes en caso de daños severos. Las ninfas y adultos excretan un líquido azucarado que cubre el follaje y sirve de sustrato para el desarrollo de fumagina. En general, tanto el Coludo como el Saltahojas aparecen en forma conjunta en los campos de caña. No obstante, la importancia real de este insecto radica en ser el transmisor de la virosis conocida como enfermedad de Fiji, patógeno no reportado en la región.



Figura 21. Adulto de *Perkinsiella saccharicida*

El Pulgón amarillo o dorado de la caña de azúcar; *Sipha flava* Forbes (Homóptera: Aphididae)

Los pulgones se manifiestan gregariamente, formando colonias que se ubican en el envés de las hojas, y se caracterizan por su color amarillo, que los diferencia del Pulgón gris *Melanaphis sacchari*. Las infestaciones importantes en Guatemala se presentan entre febrero y abril, en un ambiente cálido seco, cuando el cultivo alcanza entre 3 y 4 meses de edad (Figura 22). Las poblaciones del Pulgón se incrementan, principalmente, por el mecanismo de reproducción asexual (partenogénesis), en donde las hembras no son fecundadas porque no hay machos y por ello colocan pequeños pulgones en forma de adulto. Los síntomas de daño se caracterizan porque las hojas presentan en los bordes y su ápice una coloración amarilla y finalmente se secan, lo que puede producir un retardo en el crecimiento del cultivo.



Figura 22. Colonia de Pulgones y el síntoma en caña de azúcar

Estrategias de control

El riego por aspersión: es una medida efectiva cuando se detecta el foco inicial de infestación y su eficiencia es mayor cuando es factible el uso de la vinaza en el riego.

Liberaciones de larvas de *Crysopepla carnea*: Este es un depredador de pulgones conocido como “León de los áfidos” (Figura 23), cuya liberación requiere de al menos 23 mil larvas/ha, en forma aérea o terrestre. También se recomiendan liberaciones de larvas de coccinélidos (*Hippodamia convergens*, *Cycloneda sanguinea*). En la zona cañera de Guatemala con frecuencia se encuentran larvas de *Cycloneda sanguinea* (Coleóptera: Coccinellidae) depredando Pulgones (Figura 24).



Figura 23. Larva de *Crysoptera* spp



Figura 24. Adulto de *Cycloneda sanguinea*

ROEDORES

Manejo integrado de la Rata; *Sigmodon hispidus* (Rodentia: Crecetidae)

Sigmodon hispidus (Figura 25) es la especie predominante de Ratas en la región cañera tropical de Guatemala, con un 93 por ciento de abundancia, comparada con la ocurrencia de otros géneros como: *Peromyscus*, *Heteromys*, *Liomys* y *Oryzomys*. Su distribución se asocia con grandes áreas de pastizal, riberas de los ríos, áreas baldías y de cultivos como maíz, arroz, sorgo y caña de azúcar. La población de *Sigmodon hispidus* se incrementa debido a la alta capacidad reproductiva, expresada por sus ciclos poliéstricos continuos en la hembra, un útero bicorne y la rápida madurez sexual, de 40 a 60 días de edad. El período de gestación promedio es muy corto y requiere de sólo 27 días para una camada que puede ser de 5 hasta 12 crías. La longevidad es de 3 a 5 años, pero bajo condiciones naturales del cultivo de caña, la expectativa de vida es de alrededor de 6 meses.



Figura 25. *Sigmodon hispidus*, la especie de mayor abundancia en la zona cañera de Guatemala

Para Guatemala, los mayores incrementos de población de Ratas y daño se registran en el estrato litoral del océano Pacífico, en donde alrededor de 10, 949 hectáreas monitoreadas indican un nivel superior al umbral de cinco por ciento de tallos dañados en cosecha, para la zafra 2010-2011. El daño lo causan estos roedores por la actividad alimenticia y la necesidad de desgastar los incisivos, mordiendo tallos, que eventualmente provocan el acame y posterior deterioro de las plantas. Los estudios del Programa MIP-CENGICANA afirman que la reducción en el peso del tallo es más significativa que la calidad del jugo, y el factor de pérdida es de 0.5 TCH por cada uno por ciento de tallos dañados, al momento de precosecha (Márquez, 2002; Estrada *et al.*, 1996)

La cosecha como factor de reducción de la población: La cosecha de la caña genera cambios en la población de Ratas porque destruye su hábitat y reduce su fuente principal de alimento, lo que obliga a un proceso de dispersión de los sobrevivientes hacia las áreas aledañas a los campos de cultivo. La maquinaria para el alce y transporte de caña son los principales factores de mortalidad y dispersión en las áreas de alta infestación, y es el momento adecuado para iniciar un proceso de sanidad dentro y fuera de los campos de cultivo, con el propósito de reducir las fuentes de refugio y hacer menos favorable el ambiente para la sobrevivencia de la Rata. El control mecánico al momento de la quema es una actividad necesaria para aquellas áreas de los estratos bajo y litoral, en donde el muestreo de precosecha presente un valor superior al 30 por ciento de captura. Es una medida extrema para el control de altas poblaciones en campo al momento de la cosecha, ya que evitará la dispersión y mayores daños a los lotes vecinos.



Figura 26. Implementos para el control mecánico al momento de la quema de caña; estructura metálica diseñada por el ingenio Pantaleón (izquierda), y otra del ingenio La Unión a base de un hule (derecha)

El control biológico en la fase de macollamiento: Esta fase es la adecuada para aprovechar el control biológico mediante la colocación de estructuras llamadas “perchas” (Figura 27), que facilitan la acción depredadora de lechuzas *Tito alba* (Figura 28) y gavilanes (*Buteo platypterus*), que aún ocurren en los campos de

caña. La preservación y fomento de las áreas de reserva natural en las fincas y el uso de “cajones” de anidamiento, colocados en árboles frondosos (Figura 29), son otras actividades de gran importancia.



Figura 27. Perchas o porterías de bambú, diseñadas correctamente para facilitar la acción depredadora de lechuzas y gavilanes en los campos de caña (ingenio Palo Gordo)



Figura 28. Lechuzas *Tito alba* (ingenio Pantaleón)



Figura 29. Cajones de madera para el anidamiento de lechuzas (ingenio La Unión)

El control de malezas es clave en la fase de elongación: Generalmente, en esta etapa inicia la estación lluviosa (mayo) y es el factor que promueve la abundancia de vegetación en las áreas vecinas a los campos de caña. Estas áreas pueden convertirse fácilmente en criaderos llamados “hábitats fuente”, en donde la población de Ratas tiene condiciones ideales para una mayor tasa de natalidad, propiciada por la abundancia de semillas de malezas gramíneas, que le brindan el suplemento de proteína a las hembras para los periodos continuos de gestación y lactancia. También es un período en el que aumenta el impulso exploratorio de los individuos, por lo que amplían su rango de acción y con

ello, luego colonizan nuevas áreas de alimentación y refugio. Estas condiciones incrementan significativamente la probabilidad de sobrevivencia de la población y con esta abundancia se inicia el proceso de organización social que, finalizará con la formación de una estructura jerárquica compuesta por individuos adultos corpulentos, agresivos y hábiles, llamados “dominantes” y el resto, que acepta el rol de “subordinados”. Los individuos dominantes tienen acceso preferencial a los recursos de agua, alimentación, espacio y reproducción. Para contrarrestar este fenómeno, se recomienda el control de malezas (Figura 30) dentro y fuera de los campos de caña.



Figura 30. Control de malezas para eliminar “hábitats fuente” como criaderos de Ratas

Otro elemento que ha dado buenos resultados en la mayoría de ingenios, es un programa de capturas masivas con trampas “Victor” o “guillotina” y de tipo “jaula” (Figura 31).



Figura 31. La captura masiva con trampas requiere procedimientos específicos de mantenimiento y distribución

Otro factor favorable se desarrolla cuando el cultivo alcanza su mayor crecimiento y, ocurren vientos fuertes, lo que causa el vuelco de las macollas y así se crea una excelente cobertura y protección a la población de Ratas. Es por ello que el monitoreo y control químico, mediante el uso de cebos anticoagulantes de primera generación, se recomienda como una opción racional al final de esta etapa.

El proceso de colonización en el período de maduración: En la fase de maduración de la caña de azúcar, la población de Ratas encuentra las condiciones adecuadas para su incremento ya que la caña aumenta su valor energético y con ello se convierte en el recurso de alimentación más abundante. La alta densidad poblacional conlleva al surgimiento de una gran competencia entre las Ratas, que las obliga a realizar mayores desplazamientos en busca de alimento, apareamiento o espacio, de esta forma se favorece la infestación uniforme de los campos de caña. Además, en octubre, la condición postrada de la caña de azúcar y la humedad residual estimulan la emergencia de nuevos brotes (mamones) que las Ratas utilizan como una fuente alterna de agua.

En los últimos meses de ese período (noviembre-febrero), debido al descenso en la temperatura nocturna la Rata tiene un gasto adicional de energía por efecto de la termorregulación de su cuerpo. Es bueno saber que la Rata es un individuo “homeotermo”, es decir, que mantiene constante su temperatura corporal y también que es “endotermo” porque el calor metabólico es el que determina su temperatura interna. De este modo, las Ratas son capaces de modificar su metabolismo para mantener constante la temperatura corporal, siendo este proceso un componente básico de la termorregulación (Coto, 1977). En consecuencia, el déficit energético producido por la termorregulación es compensado por un mayor consumo de alimento diario. Pero este proceso es también responsable de una reducción en la actividad reproductiva de la Rata, ya que esta energía es ahora destinada a subsidiar la búsqueda de alimento y espacio. Comprender estos aspectos de la ecología de la Rata en el sistema de producción de la caña de azúcar, permite justificar los recursos e implementar el plan preventivo con una racionalidad ineludible y de mayor eficiencia para reducir las pérdidas en el campo (Figura 32).



Figura 32. Tallos dañados por Ratas en el campo

Taltuzas; *Orthogeomys hispidus* (Rodentia: Geomyidae)

Se conocen como Tuzas, Topos y Taltuzas y son mamíferos roedores, de tamaño moderadamente pequeño; sin diferenciación clara del cuello; orejas poco notables y ojos muy reducidos (Figura 33). Sus patas son cortas, con una musculatura bien desarrollada; las uñas son largas, poderosas, curvadas y puntiagudas. Por sus hábitos alimenticios y su vida subterránea estos mamíferos se han convertido en una plaga de importancia económica para áreas del estrato alto y medio de la zona cañera de Guatemala. En la caña de azúcar son responsables de la despoblación de macollas, al destruir el sistema radicular hasta causar su muerte (Figura 34).



Figura 33. Espécimen de Taltuza que causa despoblación al cultivo en la zona cañera de Guatemala



Figura 34. Destrucción de macollas por Taltuza en la caña de azúcar

Estrategia de control: El manejo integrado de la Taltuza depende, en gran parte, de la habilidad y astucia del taltucero en los programas de capturas, ya sea con el uso de trampas tipo fuele o bien con las trampas de vara o arpón. El control químico no es recomendable, ya que expone a una población de personas que utilizan la Taltuza como fuente de alimento. La modificación del hábitat, mediante el control de malezas y rastrojos; barbecho profundo y las barreras vivas con arbustos repelentes, como el higuerrillo, son estrategias culturales de importancia.

COMPLEJO DE PLAGAS DE LA RAÍZ

El complejo de plagas que habitan el sistema radicular presenta variaciones, según la región y altitud. Dentro de este complejo se ha identificado de importancia a las especies de Gallina ciega: *Phyllophaga dasypoda* (Figura 35); *Phyllophaga latipes*; *Phyllophaga parvisetis* y *Phyllophaga anolaminata*. Los géneros de Gusano alambre y su abundancia relativa son: *Dipropus* spp (92 %); *Horistonotus* spp (3.3 %); *Agrypnus* spp (2.6 %) y *Dilobitarsus* spp (2 %). También se han integrado insectos como Chinche hedionda (*Scaptocoris talpa*), Picudos (*Sphenophorus* spp) y Termitas (*Heterotermes convexinotatus*).

La población conjunta de insectos que afectan las raíces se expresan en el número de individuos por metro cuadrado y el tamaño de la unidad de muestro es un bloque de 0.90 m x 0.60 m y 0.40 m de profundidad, revisando todos los insectos que ocupan el suelo y las raíces. Las Termitas subterráneas (Isoptera: Rhinotermitidae) son insectos sociales que infestan con mayor frecuencia los campos de caña en Guatemala y los estudios realizados por CENGICANA con la colaboración del Dr. Rudolf H. Scheffrahn de la Universidad de Florida, muestran que al menos cuatro especies han sido identificadas: *Heterotermes convexinotatus*, *Microcerotermes* nr. *gracilis*, *Amitermes beaumonti* y *Nasutitermes nigriceps* (Márquez, 2006), no obstante, la de mayor abundancia es *Heterotermes convexinotatus* (Figura 37).



Figura 35. Larva, adulto y forma de la genitalia del macho de *Phyllophaga dasypoda*



Figura 36. Larvas del Gusano alambre (izquierda) y ninfas de Chinche hedionda (*Scaevola palpalis*) en caña de azúcar en Guatemala



Figura 37. Soldado, colonia y daño del tallo de caña de azúcar por *Heterotermes convexinotatus*

Estrategia de control: El muestreo antes del volteo y siembra es la base para la toma de decisiones de control cultural o químico. Una buena preparación del suelo con arado profundo y el uso de rastra con el barbecho prolongado de al menos 15 días, han mostrado alta eficiencia, al reducir en 73 por ciento la población de larvas de Gallina ciega, y 40 por ciento del Gusano alambre (Márquez, 2001). El mayor desmenuzamiento posible de los desechos de raíces del cultivo anterior infestados con larvas del Gusano alambre, Termitas o larvas del Mayate negro (*Euethela bidentata*) es necesario para incrementar la mortalidad de éstos y reducir las reinfestaciones. El uso de trampas de luz (Figura 38), recorridos nocturnos con la luz del tractor o personal con linternas, en el período de abril-junio es efectivo para las capturas masivas de adultos de Gallina ciega. Otra estrategia es la siembra de árboles como flamboyán (*Caesalpinia pulcherrima*) y caulote o guácimo (*Guazuma ulmifolia*) debido a la atracción alimenticia que ejercen sobre los adultos para luego, asperjarlos con una solución de insecticida. El control químico en caña soca es recomendable cuando las poblaciones de Gallina ciega sobrepasan el umbral de acción de 10 larvas/m² y la aplicación debe realizarse entre junio y julio. Actualmente se fomenta el control biológico y se experimenta con cepas de *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* y nemátodos entomopatógenos del género *Heterorhabditis*. Se ha observado la presencia de parasitoides

nativos del género *Ptilodexia* (Diptera:Tachinidae) en hospederos de Gallina ciega, tal como se muestra en la Figura 39. El uso del nemátodo entomopatógeno *Heterorhabditis* spp., en dosis de 60 millones/ha, es una opción biológica adecuada en áreas endémicas.



Figura 38. Diferentes tipos de trampas de luz para la captura de adultos de Gallina ciega



Figura 39. Larvas del parasitoide *Ptilodexia* spp., afectando larvas de Gallina ciega. Entomología, CENGICAÑA

El Ronrón; *Podischnus agenor* en caña de azúcar

El Ronrón, *Podischnus agenor*, Oliv (Coleóptera: Scarabaeidae, Dynastinae) es una plaga eventual en caña de azúcar que, generalmente, aparece en el período de lluvias, entre junio, julio y agosto. Se conoce por otros nombres comunes como escarabajo rinoceronte, coco, cucarrón, mayate rinoceronte y escarabajo cornudo. Su ciclo de vida es anual, las hembras ovipositan en suelos con altos contenidos de materia orgánica. Las larvas completan su desarrollo en el suelo, pero a diferencia de otras larvas de coleópteros, estas únicamente se alimentan de materia vegetal en descomposición. El estado larval puede durar de 4 a 8 meses, con una fase pupal de 2 a 3 meses, y los adultos pueden vivir hasta 2.5 meses (Mendonca, 1,996). Los adultos dañan los tallos al perforarlos en la parte media y superior de la planta (Figura 40), o bien introduciéndose debajo del suelo para perforar la base de los brotes jóvenes, y así causan la muerte del primordio foliar, dando el síntoma de “corazón muerto” (Figura 40). Los machos adultos emiten un olor penetrante, capaz de atraer a otros adultos de ambos sexos, lo que puede mejorar las capturas con trampas de luz en el campo. Debido a que las galerías les sirven de vivienda por 1 ó 2 semanas, cada adulto dañará varios tallos durante su vida, con mayor actividad por la noche. Las áreas con alta infestación de adultos pueden presentar una gran cantidad de agujeros en el suelo, lo cual puede servir para localizarlos.



Figura 40. Adulto de *Podischnus agenor* y los daños en caña de azúcar

BIBLIOGRAFIA

1. Byers, R. A.; Wells, H.D. 1,966. Phytotoxemia of coastal bermudagrass caused by the two lined spittlebug, *Prosapia bicincta* (Homóptera: Cercopidae). Annals of the Entomological Society of America 59 (6): 1067 1071

2. CAÑAMIP (Comité de Manejo Integrado de Plagas de la Caña de Azúcar, GT). 2004. Boletín No.7; Importancia del control de ninfas de Chinche salivosa (*Aeneolamia postica*) en gramíneas. Guatemala, CENGICAÑA, Julio de 2004. 4 p.
3. Chang, V. C. S. 1985. The sugarcane lace bug: a new insect pest in Hawaii. Annual Conference Report, Hawaiian Sugar Technology 44: A27-A29.
4. Coto, H. 1977. Biología y control de Ratas sinantrópicas. Editorial Abierta, Buenos Aires, Argentina. 187 p.
5. Estrada, J.; Salazar, R.; Carrillo, E. 1996. Estimación de pérdidas causadas por la rata cañera en caña de azúcar variedad CP72-2086. En: Memoria I Simposio Nacional de Plagas de la Caña de Azúcar. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 64-67.
6. Fewkes, D. W. 1969. The biology of sugar cane froghoppers. En: J.R. Williams, J.R. Metcalfe, R.W. Montgomery y R. Mathes (Eds.). Pests of Sugar Cane, pp. 283-307. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
7. Giraldo-Vanegas, H.; Nass, H; Hernández, E.; Amaya, F.; A. Vargas P.; Amírez, M., Ramírez, F.; Ramón, M.; Lindarte, J.O. 2005. Incidencia del Saltahojas verde de la caña *Saccharosydne saccharivora* (Westwood), en siete cultivares de caña de azúcar en el Valle San Antonio-Ureña, Táchira, Venezuela. *Agronomía Trop.* 55(4): 553-567
8. Márquez, M.; Hidalgo H.; Asencio J. 2001. Estudios de las pérdidas causadas por Chinche salivosa (*Aeneolamia postica*) en tres etapas fenológicas de la caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de Resultados de Investigación. Zafra 2000/2001. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 69-76.
9. Márquez J. M.; Hidalgo, H.; Echeverría L. 2001. Efecto del daño del ronrón (*Podischnus agenor*) en caña plantía. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2000/2001. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 82-85.
10. Márquez, M. 2001. Efecto de la mecanización sobre la población de plagas de la raíz en caña de azúcar y su estimación con diferentes tamaños de unidad de muestreo. En: Memoria X Congreso Nacional de la Caña de Azúcar y II Simposio Nacional de Plagas. Guatemala, ATAGUA. pp. 15-20.

11. Márquez, J. M.; Peck, D.; Barrios, C. O.; Hidalgo, H. 2002. Identificación de especies de Chinche salivosa (Homóptera: Cercopidae) asociadas al cultivo de caña de azúcar en Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2001-2002. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 54-59.
12. Márquez J. M. 2002. Metodología del muestreo de daño y pérdidas ocasionadas por rata en caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2001-2002. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 69-75.
13. Márquez, M.; Barrios, C.; Hidalgo, H. 2002. Identificación de especies de Gallina ciega del género *Phyllophaga* en tres sitios de la zona cañera de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2001-2002. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 47-53
14. Márquez, M.; Ralda, G. 2005. Efecto de Gallina ciega (*Phyllophaga* spp.) y Gusano alambre (*Dipropus* spp.) sobre el rendimiento de caña de azúcar en Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2004-2005. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 67-72.
15. Márquez, J. M.; López, E. 2006. Nivel de daño económico para las plagas de importancia en caña de azúcar y su estimación con base en un programa diseñado por CENGICAÑA. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 194-200.
16. Márquez, J. 2006. Biología básica e identificación de termitas subterráneas que afectan el cultivo de caña de azúcar, en varias fincas de Guatemala, Zafra 2005/2006. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 146-154.
17. Márquez, J.; Valle, F. 2006. Caracteres taxonómicos de los géneros de elatéridos de mayor ocurrencia en caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2005-2006. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 155-164.
18. Márquez, J. M. 2007. Chinche de encaje (*Leptodyctia tabida*: Hemíptera: Tingidae) una plaga de daño potencial en caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2006-2007. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 131-136.

19. Márquez, M.; Rivas, B.; Aguirre, S.; Torres, E.; López, A. 2009. Estudio de la distribución y abundancia de los Barrenadores del tallo en finca Concepción, ingenio Pantaleón, S.A. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 134-148.
20. Márquez, M.; Ortiz, A.; Motta, V. H.; Lemus, J. M.; Torres, E.; Aguirre, S. 2009. Evaluación de la eficiencia de planes de manejo integrado de Chinche salivosa: efecto de nuevos productos en el control de la población de ninfas y adultos de Chinche salivosa (*Aeneolamia postica*). Finca La Libertad, ingenio Palo Gordo, y finca Carrizal, ingenio La Unión. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 116-126.
21. Márquez, M. 2010. Secuencia de labores en el manejo integrado de la Chinche salivosa (*Aeneolamia postica*) en Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 166-173
22. Mendonca. A. F. 1996. Pragas da cana-de-acucar. Maceió, Brasil. Insetos & Cia. 239 p.
23. Pedigo, L. P. 1996. Entomology and Pest Management. Second Edition. 1996. Prentice-Hall Pub., Englewood Cliffs, NJ. 679 p.
24. Smith, R. F.; Reynolds, H. T. 1966. Principles, definitions and scope of integrated pest control. Proc. FAO Symp. Integrated Control. 1:1 1-17.
25. Stern, V. M.; Smith, R. F.; Van den Bosch , R.; Hagen, K. S. 1959. The integrated control concept. Hilgardia 29:81-101.

X. ENFERMEDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR

ENFERMEDADES DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Werner Ovalle*

INTRODUCCIÓN

En términos generales, las enfermedades en los cultivos pueden afectar procesos tales como la fotosíntesis, respiración, circulación del agua y de la savia en los haces vasculares, absorción de agua y nutrientes del suelo y en consecuencia, disminuye la producción del componente de la planta que sea de interés para el hombre, sea el grano, la biomasa vegetal u otro, como la sacarosa en el caso de la caña de azúcar. Por eso es importante mantener al cultivo libre de enfermedades, lo cual puede lograrse ya sea por la aplicación de productos químicos o por el uso de variedades resistentes. En caña de azúcar, en la mayoría de países del mundo se enfoca el control de enfermedades con el uso de variedades resistentes y Guatemala no es la excepción.

En la caña de azúcar se han reportado más de 126 enfermedades en 109 países (China *et al.*, 2000), y en Guatemala se han identificado 24 (información no publicada). Tomando en cuenta la incidencia, severidad, efecto en la producción y eliminación de variedades con buen potencial de producción, al estar libres de enfermedad, se ha determinado que en Guatemala las más importantes son: Raquitismo de las socas, Carbón, Escaldadura foliar, Roya marrón o café y Roya naranja. El segundo grupo en importancia está integrado por: Mosaico, Raya roja y Hoja amarilla (Amarillamiento foliar) y el tercer grupo por: Cogollo retorcido (Pokkah boeng), Mancha púrpura, Mancha amarilla y Raya clorótica.

En CENGICANÑA se han hecho estudios del efecto en la producción por algunas enfermedades como el Raquitismo de las socas. Se comprobó que la producción disminuye, dependiendo de la resistencia de las variedades, pero que en promedio de nueve variedades las pérdidas fueron importantes. En el primer corte la pérdida en la producción de caña fue de 7.88 por ciento; en el segundo, 16.47; en el tercero, 21.38; en el cuarto, 23.2; y en el quinto, 20.9, (Ovalle y García, 2008). Esos resultados son una muestra de lo que las enfermedades pueden significar en la producción, y de la importancia de mantener las plantaciones libres de enfermedades.

* Ing. Agr., M.Sc., Fitopatólogo de CENGICANÑA. www.cengicana.org

A continuación se presenta la descripción de síntomas, la transmisión, la importancia para nuestro país y los métodos de control recomendados para esas y otras enfermedades comunes en la zona cañera del Pacífico de Guatemala.

ENFERMEDADES CAUSADAS POR HONGOS

Carbón de la caña de azúcar

Agente causal: *Sporisorium scitamineum* (Syd.) M. Piepenbring = *Ustilago scitaminea* H. Syd & P. Syd.

Síntomas: El síntoma característico del Carbón de la caña de azúcar es una estructura en forma de látigo que se desarrolla en el ápice de los tallos infectados (Figura 1). La estructura está formada por un centro de apariencia corchosa, que inicialmente se encuentra recubierto por millones de esporas (clamidosporas) que en conjunto presentan una coloración negra. Esa es la razón del nombre común de la enfermedad, pues tiene la apariencia de polvo de carbón (Martin *et al.*, 1961). La estructura en forma de látigo se encuentra recubierta por una membrana delgada de color gris-plateado que al romperse libera las esporas (Vázquez de Ramallo y Ramallo, 2004). Luego de la liberación de las esporas la estructura puede quedar desnuda como un apéndice corchoso. La estructura no presenta ramificaciones, es de grosor variable dependiendo de la variedad y la longitud varía desde unos pocos centímetros hasta más de un metro (China *et al.*, 2000). Puede ser recta o curva.

Antes de la emergencia de los látigos, los tallos infectados pueden mostrar alteraciones y verse más delgados, aplanados en lugar de cilíndricos y las hojas de la planta infectada se reducen en tamaño y anchura, tomando una posición en la cual el ángulo de inserción con el tallo se reduce (posición más vertical que las normales) (Ovalle, 1997; Vázquez de Ramallo y Ramallo, 2004).

En variedades susceptibles, las infecciones de los trozos utilizados como semilla pueden producir macollas con docenas y hasta cientos de tallos delgados que producen macollas con apariencia “zacatosa” y que finalmente desarrollan látigos en sus ápices.

Las infecciones secundarias pueden causar el apareamiento de pequeños látigos laterales de tipo “lalas” (se denomina lalas a los brotes anticipados de yemas laterales), sobre tallos con desarrollo normal (Martin *et al.*, 1961).

Transmisión y diseminación: La transmisión y diseminación de la enfermedad ocurre cuando el viento o la lluvia desprenden las esporas y las llevan a plantas vecinas o plantaciones vecinas (China *et al.*, 2000). Las esporas germinan e

infectan las yemas, la infección puede permanecer latente hasta el siguiente ciclo cuando los trozos de tallo son usados como semilla en otros campos, o producen el apareamiento de los látigos laterales en el mismo ciclo donde ocurrió la infección (Ovalle, 1997).

Importancia: El Carbón se considera una de las enfermedades más importantes en la caña de azúcar, debido al potencial que posee para causar disminuciones en la producción, lo cual ha impactado en diferentes países productores de caña. En Guatemala produjo pérdidas severas en la década de los ochenta en variedades como CP57-603 y B49-119 lo que obligó a la sustitución por variedades resistentes.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes (Tokeshi, s.f)



Figura 1. Látigos típicos en ápices de tallos infectados con *S. scitamineum*

Roya marrón o café

Agente causal: *Puccinia melanocephala* H. Syd. & P. Syd.

Síntomas: El primer síntoma de esta enfermedad sobre las hojas es el apareamiento de manchas alargadas pequeñas, amarillentas que son visibles en ambas superficies de las hojas. Las manchas cambian a color café con un halo delgado verde-amarillento alrededor (Hughes *et al.*, 1964). El tamaño de las manchas es variable y se han observado lesiones desde 2 milímetros hasta 30 ó 40 milímetros. Posteriormente, cuando se inicia el desarrollo de las pústulas se

observan abultamientos ligeramente alargados, debajo de la epidermis del envés de las hojas. Generalmente, esos abultamientos se rompen para liberar las esporas (uredosporas) que cuando maduran son de color café (Figura 2). Luego de un período de esporulación activa, las lesiones se oscurecen hasta alcanzar un tono negruzco y la esporulación cesa. La mayor presencia de lesiones ocurre hacia los ápices de las hojas bajas. Cuando la variedad es susceptible y las condiciones ambientales son favorables, las lesiones coalescen (se unen) y producen grandes áreas de tejido necrosado que pueden secar completamente las hojas

Transmisión y diseminación: Ocurre de una manera muy rápida y cuando se rompe la epidermis de las pústulas, las esporas son acarreadas a otras plantas y a otros campos por el viento y la lluvia (Ovalle, 1997). Las esporas requieren de una capa fina de agua sobre la superficie de la hoja, por lo menos durante seis horas, para germinar de manera óptima (generalmente en el envés de la hoja) y la temperatura óptima para la germinación es de 21° C. (Magarey *et al.*, 2004).

Importancia: La importancia asignada a la Roya café es variable en los diferentes países. En Guatemala se considera muy importante, ya que recientemente han surgido brotes de la enfermedad en variedades que habían sido resistentes, como CG97-97, CP73-1547 y PR75-2002. Además es una de las enfermedades que más inciden en el descarte de variedades en el proceso de selección.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes, sin embargo, debido a que es común el rompimiento súbito de la resistencia, en ocasiones se recomienda la aplicación de fungicidas mientras se sustituye la variedad susceptible por una resistente.

Figura 2. Lesiones causadas por *P. melanocephala* en el envés de una hoja. Uredosporas vistas en microscopio

Roya naranja

Agente causal: *Puccinia kuehnii* (Kruger) Butler

Síntomas: El síntoma inicial de esta enfermedad es el apareamiento de lesiones amarillentas, pequeñas y alargadas, que desarrollan un halo verde-amarillento pálido cuando aumentan de tamaño (NORTH AMERICAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION (NAPPO), 2007). Después se tornan de color naranja a café-naranja cuando las pústulas abren para liberar las esporas (Figura 3). Las pústulas tienden a ocurrir en grupos o manchas en el envés de las hojas y son más abundantes en la zona apical de las hojas. Una de las características que permite diferenciar a la Roya naranja de la Roya marrón o café es la tendencia de la primera a producir también infecciones en las áreas media y basal de las hojas y en manchones o grupos de pústulas. Otro síntoma diferente entre ambas royas es el tamaño y forma de las lesiones, las cuales son de mayor tamaño y más alargadas en la Roya café, lo cual se podrá distinguir sólo mediante la experiencia de observaciones repetidas. El color de las lesiones no permite la diferenciación, pues en lesiones viejas la coloración puede ser similar. La diferenciación segura se logra solamente al observar las esporas en el microscopio. El comportamiento de las infecciones es diferente en ambas royas, puesto que en la Roya marrón lo normal es que ocurran infecciones en estados jóvenes de la planta (hasta 5 ó 6 meses) y luego los síntomas de la enfermedad desaparecen. En la Roya naranja se han observado lesiones con esporulación activa y abundante hasta la madurez de la planta y aún sobre tejido necrosado y en épocas secas.

Transmisión y diseminación: La transmisión y diseminación, al igual que en la Roya café, ocurre cuando se rompe la epidermis de las pústulas y las esporas son acarreadas a otras plantas y a otros campos por el viento y la lluvia. Las esporas requieren de valores de humedad relativa superiores a 98 por ciento para germinar de manera óptima y la temperatura óptima para la germinación es de 21° C. (Magarey *et al.*, 2004).

Importancia: En Guatemala se considera de alta importancia, puesto que la llegada de la Roya naranja al país causó cambios importantes en las áreas sembradas de la variedad más utilizada. La variedad CP72-2086 disminuyó del 66 por ciento al 30 por ciento en tres años y la variedad CP88-1165 incrementó de 5 por ciento a 35 por ciento en ese período, con los consecuentes gastos necesarios para esos cambios. Además, la enfermedad eliminó muchas variedades en los diferentes estados de selección del Programa de Variedades de CENGICANA.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes, sin embargo, en países como Australia y Estados Unidos, se ha

recomendado la aplicación de fungicidas, mientras se sustituye la variedad susceptible por una resistente.



Figura 3. Lesiones causadas por *P. kuehni* en el envés de una hoja. Uredosporas vistas en microscopio

Cogollo retorcido (Pokkah boeng):

Agente causal: *Gibberella moniliformis* (Sheldon) Wineland
Fusarium moniliforme Sheld. Snyd et Hans

Síntomas: Los síntomas de la enfermedad del Cogollo retorcido se manifiestan inicialmente en el ápice del tallo, aunque posteriormente pueden verse en hojas de posición más baja, cuando el tallo continúa su crecimiento. Los síntomas van desde una decoloración (clorosis) de las hojas cuando aún no han abierto, las cuales se presentan blanquecinas o amarillentas (Figura 4), hasta la muerte del meristemo apical (esto último no es común). Otros síntomas de intensidad intermedia son deformaciones de las hojas no abiertas, las cuales se arrugan o enredan, y por lo tanto dificultan su apertura y expansión. En otros casos se observa una decoloración blanquecina o amarillenta en la parte basal de las hojas jóvenes y a partir de la decoloración se proyectan rayas de color rojo que pueden confundirse con las causadas por la enfermedad Raya roja (*Pseudomonas rubrilineans*). Durante períodos de alta humedad relativa, la base de las hojas apicales puede presentar áreas de tejidos necróticos de color café rojizo y allí ocurre la esporulación del hongo (Ovalle, 1997) (Figura 4). En ocasiones, la infección provoca malformaciones del tallo, que varían en intensidad y a veces los tallos presentan rajaduras horizontales superficiales o profundas. Cuando la variedad es susceptible puede causar la muerte del meristemo apical y brotación de yemas laterales (lalas).

Transmisión y diseminación: La transmisión de la enfermedad ocurre principalmente por el traslado de las esporas por el viento (Martin *et al.*, 1961).

Importancia: A pesar de los síntomas descritos, la enfermedad del Cogollo retorcido raramente provoca efectos en la producción. Es común en las variedades cultivadas en Guatemala, a veces con síntomas alarmantes que luego desaparecen, con efectos mínimos o sin efectos en la producción.

La enfermedad se muestra con mayor severidad cuando los veranos son muy cálidos y secos y a esto sigue un invierno que propicia alta humedad ambiental ((Martín *et al.* 1961).

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes.



Figura 4. Síntomas causados por *F. moniliforme* en ápices de los tallos. Necrosis de tejidos en donde ocurre la esporulación del hongo

Mancha púrpura:

Agente causal: *Dimeriella sacchari* (B. de Haan) Hansford

Síntomas: La enfermedad Mancha púrpura se caracteriza por el apareamiento en las hojas de manchas irregulares, de color rojo claro al principio y oscuro después, de entre 2 y 10 milímetros de diámetro (Figura 5). Los síntomas inician en las hojas bajas y con el transcurso del tiempo avanzan hacia las hojas más jóvenes. Esto hace que en etapas avanzadas la severidad sea mayor en hojas bajas. A veces la mancha no es sólida y es formada por una serie de líneas paralelas muy finas y juntas de color rojo que siguen la dirección de las nervaduras secundarias (Ovalle, 1997). Cuando las condiciones ambientales son favorables, el hongo produce peritecios (estructuras globosas que cubren a las

esporas) sobre la superficie de las manchas en el envés de las hojas. Estos asemejan pequeñas pelotitas negras que pueden verse con una lupa. En hojas bajas secas puede observarse claramente las manchas pero de un color café-rojizo a negro. La enfermedad es favorecida por períodos de alta humedad y alta temperatura, por lo cual en Guatemala aparece hacia finales de agosto y se desarrolla al máximo en septiembre (Ovalle, 1997).

Transmisión y diseminación: Como la mayoría de enfermedades causadas por hongos, la transmisión y diseminación ocurre a través de las esporas producidas en las lesiones. Las esporas son acarreadas por el viento y la lluvia.

Importancia: A pesar de ser una enfermedad que se observa en todas las variedades cultivadas en Guatemala, se ha considerado sin importancia debido a que se presenta en hojas bajas y en plantas ya desarrolladas. Sin embargo, puede llegar a ser importante debido a que la variedad CP88-1165, actualmente en expansión rápida, muestra infecciones por Mancha púrpura más severas que en las otras variedades y en áreas de drenaje lento, ha mostrado efectos sobre el desarrollo de las plantas.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes.



Figura 5. Lesiones causadas por *D. sacchari* en la superficie de las hojas

Mancha amarilla

Agente causal: *Mycovellosiella koepkei* (Krüger) Deighton

Síntomas: Esta enfermedad se manifiesta como manchas de color amarillo sobre las hojas, de entre 2 y 10 milímetros de diámetro, de formas irregulares,

que al madurar pueden tomar coloraciones rojizas (Ovalle, 1997), (Figura 6). Si se presentan condiciones adecuadas (principalmente alta humedad ambiental) el hongo esporula principalmente por el envés de la hoja y entonces aparece un crecimiento afelpado de color blanquecino o grisáceo sucio (Martin *et al.*, 1961). Cuando las manchas han tomado coloraciones rojizas, este crecimiento afelpado permite diferenciar las manchas de aquellas causadas por la mancha púrpura. En variedades susceptibles y con condiciones adecuadas para la infección, las manchas pueden unirse y llegan a cubrir grandes áreas de la hoja. En esos casos las hojas pueden deformarse y desprenderse prematuramente de la planta. La Mancha amarilla puede confundirse con la manifestación de manchas de origen genético, que por lo general son de color amarillo. Se pueden diferenciar porque las de origen genético son de menor tamaño (como pecas) y no muestran ningún tipo de esporulación sin importar las condiciones de humedad y temperatura.

Transmisión y diseminación: La transmisión de planta a planta y la diseminación de un campo a otro suceden en períodos de alta humedad relativa, cuando ocurre alta esporulación y las esporas son salpicadas por el agua de lluvia y llevadas por el viento ((Martin *et al.*, 1961).

Importancia: La enfermedad se considera de importancia menor en Guatemala, ya que en las variedades cultivadas actualmente, la enfermedad aparece en estados avanzados de desarrollo de las plantas.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes (Vázquez de Ramallo y Ramallo, 2004).

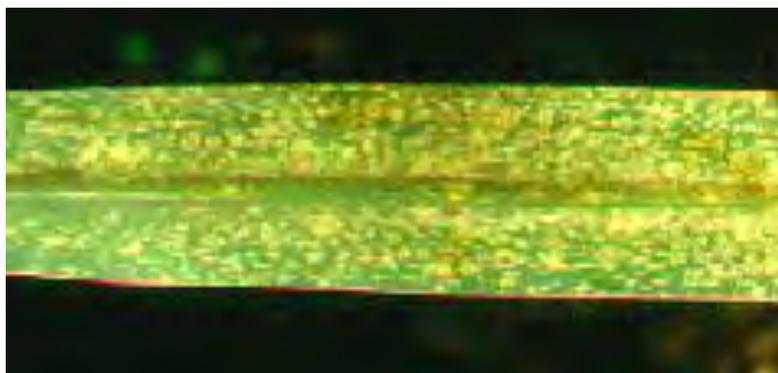


Figura 6. Lesiones causadas por *M. koepkei* sobre la superficie de las hojas

Pudrición de la base del tallo, de las vainas y de las raíces
Agentes causales: *Marasmius sacchari* Wakker y *M. stenospilus* Montagne

Síntomas: El síntoma característico de esta enfermedad es el desarrollo de micelio en las vainas de las hojas basales y en la porción basal del tallo (Tokeshi, s.f., Hughes *et al.*, 1964). El crecimiento del micelio se nota con mayor facilidad al separar del tallo las vainas de las hojas bajas, con lo cual queda expuesto un crecimiento blanquecino en ambas superficies. Cuando se hace la separación se tiene la impresión de que las vainas están pegadas o adheridas al tallo, eso es debido al crecimiento del micelio entre ambas estructuras. Si las condiciones de humedad y temperatura son altas, ocurre el desarrollo de la estructura de reproducción, la cual se caracteriza por la forma de sombrilla (cogumelo) de color blanco y centro amarillo a café-claro de 2-4 cm de diámetro, con bases (estípites) largas (2-7 cm.) (Tokeshi, s.f.), (Figura 7), normalmente muy cerca o sobre el nivel del suelo (Hughes *et al.*, 1964). Estas estructuras producen y liberan grandes cantidades de esporas en la parte inferior. En infecciones severas los tallos mueren, los cuales presentan pudriciones de color pardo en la base y las hojas secas adheridas. En ocasiones también sucede en macollas completas.

Transmisión y diseminación: El hongo se mantiene como saprófito en restos de cosechas anteriores (Hughes *et al.*, 1964) y se transmite a través del micelio y esporas desarrolladas cerca del nivel del suelo. La diseminación de un campo a otro ocurre por implementos contaminados y por trozos de semilla infectados.

Importancia: Es una enfermedad de poca importancia. En Guatemala las infecciones se han observado en campos con drenaje lento y principalmente en áreas que han permanecido inundadas.

Métodos de control: Se considera un patógeno débil que causa infecciones en condiciones no adecuadas para el desarrollo normal de la planta. Si estas condiciones se mantienen, especialmente en cuanto al drenaje suficiente del suelo en áreas de alta humedad, el hongo no será capaz de causar daños.



Figura 7. Estructuras de reproducción de *M. sacchari*. Cogumelos (sombrillas) abundantes en la base de las macollas. Detalle que permite observar los estípites (la base larga de los Cogumelos -flecha-)

Fumagina

Agentes causales: *Capnodium* sp. y *Cladosporium* sp.

Síntomas: La condición conocida como Fumagina ocurre en plantas infestadas con plagas tales como el Coludo (*Saccharosydne saccharivora*), Saltahojas (*Perkinsiella saccharicida*), Escama acanalada (*Orthezia* sp) y en ocasiones Pulgón amarillo (*Sipha flava*), los cuales exudan sustancias azucaradas que sirven como sustrato para el desarrollo del hongo. El síntoma puede presentarse sobre hojas, vainas o tallos y consiste en el ennegrecimiento de esos órganos (Figura 8). La característica que permite identificarlo es que tal ennegrecimiento se elimina al frotarlo con la uña porque las estructuras del hongo no penetran los tejidos de la planta y solamente forman una costra negra delgada y superficial. Aunque los hongos *Capnodium* sp. y *Cladosporium* sp. no son parásitos de la planta, éstos pueden causar trastornos en el desarrollo, ya que interfieren con el proceso de fotosíntesis al bloquear la penetración de la luz solar a los tejidos y el intercambio gaseoso al obstruir los estomas (Chinea *et al.*, 2000).

Transmisión y diseminación: Estas ocurren a través de las esporas (ascosporas o conidios según el hongo causante) que son acarreadas por el viento y la lluvia. Las esporas también pueden ser acarreadas por los insectos plaga cuando se desplazan de zonas afectadas a sanas.

Importancia: En años recientes la Fumagina ha incrementado su importancia, debido a que también han aumentado las infestaciones por Coludo (*S. saccharivora*), y Escama acanalada (*Orthezia* sp).

Métodos de control: El control se logra eliminando las plagas que secretan los compuestos azucarados. Para ello deberán usarse los productos adecuados que tengan el menor impacto posible en el ambiente.



Figura 8. Ennegrecimiento de la superficie de hojas por el desarrollo superficial de *Capnodium* y/o *Cladosporium*, causantes de la Fumagina

Pudrición seca del cogollo (Punta seca)

Agente causal: *Ligniera vasculorum* (Matz.) Cook

Síntomas: La enfermedad denominada Pudrición seca del cogollo se inicia con el secamiento de las puntas de las hojas enrolladas del cogollo, luego se seca toda la superficie de las hojas superiores, los entrenudos del ápice se acortan y se arrugan, posteriormente se seca todo el tallo (Comstock *et al.*, 1994) (Figura 9). Cuando el tallo aún no se ha secado, en un corte longitudinal se puede observar un cambio de color en algunos de los haces vasculares, los cuales se tornan de color salmón (Comstock *et al.*, 1994). Las infecciones ocurren generalmente en tallos desarrollados por lo cual las pérdidas pueden ser severas. En Guatemala se han observado infecciones que presentan la sintomatología descrita, pero no se han encontrado los signos (esporas) que permitan la confirmación del agente causal.

Transmisión y diseminación: La transmisión se da por suelo infectado y la diseminación, por el uso de trozos de semilla infectados.

Importancia: Debido a su baja incidencia en variedades comerciales, actualmente se considera de poca importancia.

Métodos de control: Se recomienda el uso de semilleros sanos.



Figura 9. Síntomas de infecciones por *L. vasculorum* en tallos de caña de azúcar

ENFERMEDADES CAUSADAS POR BACTERIAS

Escaldadura foliar

Agente causal: *Xanthomonas albilineans* (Ashby) Dowson

Síntomas: El síntoma característico que da el nombre a esta enfermedad es la muerte de tejido foliar con apariencia de quemazón en las puntas de las hojas, en cuyo caso éstas se curvan hacia arriba o hacia abajo. Sin embargo, la enfermedad presenta diferentes síntomas dependiendo de la fase o forma de la enfermedad. Se pueden presentar dos fases o formas:

Fase crónica: El síntoma característico de la fase crónica es la presencia de líneas finas de cerca de 0.5 milímetros de ancho, de bordes bien definidos que se desarrollan en las nervaduras secundarias de las hojas y que forman ángulos cerrados con la nervadura central (llamadas líneas de lápiz) (Martin *et al.*, 1961; Ovalle, 1997). En la mayoría de los casos, son largas e inicialmente de color blanquecino a amarillento (Figura 10). Posteriormente pueden presentar secciones rojizas intercaladas con secciones de color amarillento (Martin *et al.*, 1961). Este tipo de líneas se originan de infecciones provenientes del tallo y a través de las nervaduras centrales de las hojas. La mayoría de variedades resistentes pueden presentar solamente este síntoma cuando son inoculadas, sin experimentar efectos en la producción.

En ocasiones las líneas no se originan de las nervaduras centrales sino de infecciones que se inician en los bordes de las hojas a través de los hidátodos. En esos casos las líneas tienden a ser más anchas y con bordes irregulares.

Otro síntoma de la fase crónica es el apareamiento de brotes laterales (lalas), que se desarrollan de abajo hacia arriba, desde la base del tallo o desde la parte media del tallo. En la mayoría de los casos las lalas van disminuyendo en tamaño conforme se asciende a lo largo del tallo (Martin *et al.*, 1961; Tokeshi, s.f.; Vázquez de Ramallo, y Ramallo, 2004) (Figura 10), al contrario de las que se desarrollan por efecto de maduradores químicos como Glifosato y Fluazifop butil o por daños en el meristemo apical. En esos casos la brotación ocurre primero en las yemas superiores, las lalas superiores son de mayor tamaño y este disminuye conforme se baja a lo largo del tallo. Los brotes laterales inducidos por la Escaldadura pueden o no mostrar “líneas de lápiz”, clorosis o quemazón del área foliar. Finalmente, también pueden presentarse brotes jóvenes (mamones) con hojas etioladas (de color blanco a crema por la carencia de clorofila y cloroplastos) (Martin *et al.*, 1961).

En la parte interna de los tallos se puede presentar un cambio de color de los haces vasculares, los cuales se presentan de color rojo claro al inicio y rojo oscuro (casi negro) después (Figura 10). El desarrollo del cambio de color se inicia en los nudos y se extiende hacia los entrenudos (Martin *et al.*, 1961).

Fase aguda: Cuando se presenta esta fase los tallos pueden marchitarse de súbito y cambiar del color normal a un color rojo oscuro y morir repentinamente sin haber presentado otros síntomas (Martin *et al.*, 1961)

Transmisión y diseminación: La transmisión ocurre principalmente por el uso de trozos de “semilla” infectados y por herramienta contaminada con la bacteria durante las labores de campo o corte en la cosecha (Martin *et al.*, 1961). Sin embargo, la transmisión y diseminación también pueden darse por la

combinación de viento y lluvia fuertes, los cuales pueden romper los tejidos de tallos infectados permitiendo la exposición de la bacteria, la cual es arrastrada por el agua y el viento. (Autrey *et al.*, 1991). Ese tipo de transmisión también se ha asociado a las infecciones que ocurren a través de los hidátodos en el proceso de gutación.

Importancia: En Guatemala es una enfermedad importante, debido a que las condiciones ambientales (períodos lluviosos severos y períodos secos severos) favorecen su diseminación y expresión.

Además porque ha provocado la eliminación de variedades comerciales de potencial alto de producción.

Métodos de control: Se recomienda el uso de variedades resistentes. Algunas variedades con potencial alto de producción (como CP73-1547 y CP72-1312) que han presentado infecciones limitadas (menores que cinco por ciento) por Escaldadura foliar se siguen utilizando con éxito, aplicando el tratamiento hidrotérmico adecuado para eliminar las infecciones (inmersión de los trozos de semilla en una corriente de agua a temperatura ambiente por 48 horas, seguido de inmersión en agua a 50°C por tres horas) (Steindl, D., 1971; Frison and Putter, 1993)



Figura 10. Tallo con brotes laterales inducidos por la infección con *X. albilineans*. Línea de lápiz “joven” en la hoja. Cambio de color de los haces vasculares en un tallo infectado

Raya roja

Agente causal: *Acidovorax avenae* subsp. *avenae* (Manns) Willems *et al.* = *Pseudomonas rubrilineans* (Lee *et al.*) Stapp

Síntomas: La Raya roja de la caña de azúcar puede producir síntomas sobre las hojas y en el ápice de los tallos. Las infecciones en la lámina foliar de las hojas causa el síntoma que da su nombre a la enfermedad. Las infecciones se presentan como líneas de color rojo de diferente intensidad, dependiendo de si son recientes o viejas, de bordes bien definidos y con una anchura de entre menos de un milímetro y dos milímetros (Figura 11). Las líneas pueden ser cortas o largas pero en general son largas, a veces ocupan la longitud total de la hoja y en ocasiones pueden fusionarse formando bandas de tejido de color rojo. En períodos de alta humedad relativa y alta temperatura la bacteria causante de la infección exuda por el envés de las hojas y en el sitio de las bandas o rayas. Estos exudados al secar dejan una especie de escamas como de goma seca. En ocasiones, cuando ocurren vientos fuertes, las hojas se rompen en las líneas de infección quedando la hoja fraccionada en “tiras”.

La infección de los ápices de los tallos causa la muerte del punto de crecimiento y el secamiento de las hojas jóvenes. En esos casos se observa una pudrición blanda, húmeda, con olor característico y desagradable (Figura 11). La muerte del punto de crecimiento induce la brotación de las yemas laterales superiores y el desarrollo de “lalas” (Martin *et al.*, 1961).

Transmisión y diseminación: Ocurren cuando la bacteria exuda por el envés de las hojas, lo cual coincide con períodos de alta humedad. Si ocurren lluvias y vientos fuertes, la bacteria se transmite por salpicaduras y arrastre, y penetra por heridas en las hojas (Martin *et al.*, 1961). La bacteria no circula por los haces vasculares de los tallos y por lo tanto la diseminación no ocurre a través de la semilla.

Importancia: Actualmente la Raya roja es de importancia relativa en Guatemala, porque entre las variedades importantes ataca con severidad solamente a CP72-2086 cuando se cultiva en zonas bajas y en campos con drenaje lento y encharcamiento.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes. Se ha observado que algunas variedades muestran susceptibilidad en estados jóvenes y resistencia a partir de los 7 u 8 meses de edad, con lo cual pueden recuperarse de los tallos perdidos por la infección, emitiendo nuevos tallos.



Figura 11. Síntoma de Raya roja sobre una hoja y en el punto de crecimiento de un tallo

Raquitismo de las socas

Agente causal: *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* (Davis *et al.*) Evtushenko

Síntomas: Esta es una de las enfermedades más difíciles de diagnosticar con certeza en el campo, debido a que sus síntomas son poco claros y pueden confundirse con los producidos por otros agentes abióticos (CENICAÑA, 1995). Cuando las plantas están infectadas ocurre una reducción progresiva en la producción de caña a través de los cortes, cuyo efecto dio origen al nombre de la enfermedad. Tal reducción se debe a que en variedades susceptibles la bacteria obstruye el xilema, por lo cual ocurre menor crecimiento (acortamiento de entrenudos y disminución en el diámetro –ver en la Figura 12, diez tallos sanos y diez tallos enfermos–). Además las macollas o cepas enfermas pueden producir un menor número de tallos (CENICAÑA, 1995; Ovalle y García, 2008). En algunas variedades, si se hace un corte longitudinal del tallo se pueden observar pequeñas líneas (1-2 milímetros) de color rojizo en las bases de los entrenudos (CENICAÑA, 1995) (Figura 12).

Transmisión y diseminación: Principalmente ocurren a través de trozos de semilla infectada y por herramientas de corte y laboreo infectadas.

Importancia: Se le considera como una de las enfermedades más importantes a nivel mundial. Muestra infecciones en todas las variedades cultivadas en Guatemala y se ha demostrado que es capaz de causar efectos importantes en la producción. (Bailey and Bechet, 1995; Ovalle y García, 2008).

Métodos de control: El método de control más usado es el tratamiento térmico a los trozos de semilla. En Guatemala se evaluaron cinco tratamientos hidrotérmicos (Ovalle *et al.*, 2001), y se encontró que los mejores resultados se obtienen con la inmersión en agua caliente a 51°C por 10 minutos, seguido por reposo a temperatura ambiente durante 12 horas, y finalmente inmersión en agua caliente a 51°C por una hora. Sin embargo, también se obtuvieron buenos resultados con la inmersión directa de los trozos de semilla en agua a 52 grados, durante 30 minutos, lo cual es un tratamiento más sencillo. Además del uso de semilla sana, el control del Raquitismo de las socas debe incluir la eliminación del patógeno de la herramienta de corte y laboreo de las plantaciones. Se hace con el uso de productos químicos y para eso se han obtenido buenos resultados con el producto Vanodine al 1 % (Victoria, J. L. *et al.*, 1985; CENICAÑA, 1995).

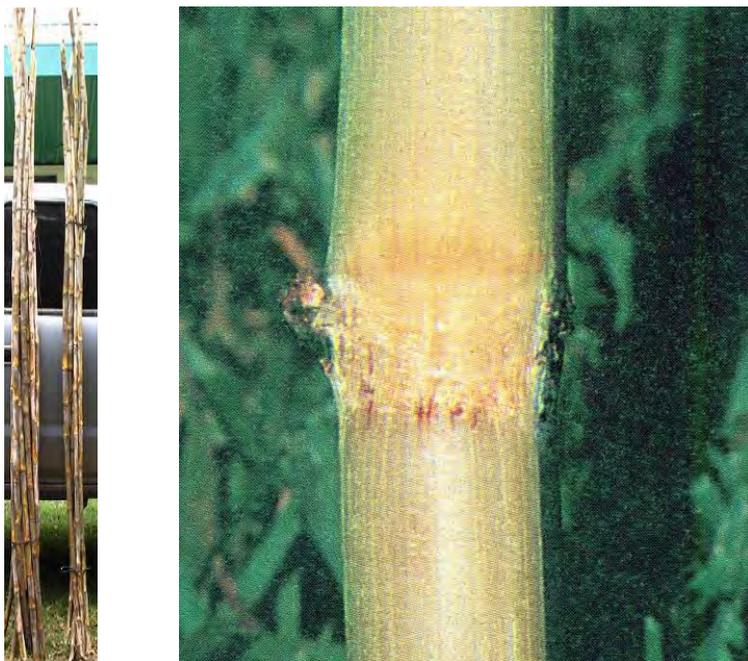


Figura 12. Efecto de la infección por *L. xyli* en los tallos. Líneas de color rojizo en la base de un nudo de un tallo infectado

ENFERMEDADES CAUSADAS POR VIRUS

Mosaico de la caña de azúcar

Agente causal: *Sugarcane mosaic virus (SCMV)*, *Sorghum mosaic virus (SrMV)*

Síntomas: Esta enfermedad se caracteriza porque causa disminución del número y tamaño de los cloroplastos en ciertas áreas de la hoja, dejando otras sin daño aparente. Esto provoca el característico síntoma de mosaico con áreas verdes normales sobre un fondo de verde más claro a amarillento (Figura 13), con patrones que varían dependiendo de la raza del virus (Martin *et al.*, 1961), de la variedad (Koike y Guillaspie citados por CENICANÑA, 1995) y a veces de las temperatura y otras condiciones de crecimiento. A veces solo se observan franjas cloróticas escasas sobre verde normal, y en casos más comunes, las áreas cloróticas predominan sobre el verde normal, con intensidades y patrones variables. El síntoma de mosaico puede o no estar asociado a la disminución en el crecimiento normal (Brandes, citado por Martin *et al.*, 1961). El mosaico es más evidente en brotes jóvenes (1 a 3 meses) y en las bases de las hojas apicales (Cook, citado por Martin *et al.*, 1961). En algunas variedades pueden observarse cambios de color en la corteza del tallo similares a los síntomas en las hojas (Tokeshi, s.f.).

Transmisión y diseminación: El virus se transmite en los trozos de semilla y también a través de los áfidos *Rhopalosiphum maidis* e *Hysteroneura setariae* (CENICANÑA, 1995) y *Toxoptera graminum*.

Importancia: Se considera que en Guatemala actualmente no es importante a nivel comercial, a pesar de que una de las variedades más cultivadas (CP72-2086) por lo general presenta infecciones altas por este virus, sin mostrar efectos en la producción.

Métodos de control: El método recomendado es el uso de variedades resistentes (Vázquez de Ramallo, y Ramallo, 2004). Se ha observado que algunas variedades presentan síntomas en estados jóvenes pero sin mostrar disminución en el desarrollo por lo cual se consideran tolerantes.



Figura 13. Síntomas de infecciones en las hojas por el virus del Mosaico

Hoja amarilla (Amarillamiento foliar)

Agente causal: *Sugarcane yellow leaf virus (SCYLV)*

Sugarcane yellows Phytoplasma (SCYP)

Síntomas: Los síntomas de esta enfermedad inician con un amarillamiento de la nervadura central de las hojas +3 a +5 que es evidente por el envés (la hoja +1 es la primera hoja con el cuello completamente visible en el ápice. Para designar las siguientes hojas se cuenta hacia abajo). Al inicio se manifiesta como un amarillamiento pálido y después llega a tomar una coloración similar a la de la yema de un huevo (Figura 14). En algunas variedades la parte del haz de la nervadura central toma una coloración rosada o rojiza. Luego se observa secamiento de las puntas de las hojas, y en variedades susceptibles avanza hasta secar completamente la hoja. Las plantas pueden mostrar o no efecto en el crecimiento (enanismo), dependiendo de la susceptibilidad de la variedad. En casos muy severos, lo que ocurre raramente, se observa muerte del meristemo apical y emisión de raíces adventicias en el ápice del tallo (lo cual fue descrito por Witteveen, P., en 1969 en Tanzania, en lo que él denominó “Marchitamiento amarillo”, pero que tiene muchas coincidencias en síntomas, por lo que posiblemente es la primera descripción de la enfermedad de la Hoja amarilla). La manifestación de los síntomas de la enfermedad está asociada a cualquier tipo de estrés, principalmente por sequía, y es común observar mayor severidad en los bordes de los lotes. También se ha encontrado cierta asociación entre temperaturas bajas y mayor severidad, por lo cual ciertas variedades muestran problemas con la enfermedad en zonas altas y no en zonas bajas. Aunque el SCYLV había sido confirmado en Guatemala por métodos serológicos hace nueve años (Ovalle y Nelson, 2003), recientemente también se ha detectado por métodos moleculares la presencia del fitoplasma del

Amarillamiento de la caña de azúcar (SCYP) que causa el mismo cuadro de síntomas que el virus SCYLV (Maldonado *et al.*, 2009).

Transmisión y diseminación: La transmisión de la enfermedad causada por el virus es a través de los trozos de semilla y por los áfidos *Melanaphis sacchari* y *Rhopalosiphum maidis* (China, 2000; Vázquez de Ramallo, y Ramallo, 2004). La transmisión del fitoplasma es a través del Coludo (*Saccharosydne saccharivora*) reportado como el insecto vector (Arocha *et al.*, 2005).

Importancia: A pesar de que cerca del cien por ciento de variedades analizadas por métodos de laboratorio en Guatemala han resultado infectadas con el virus, ninguna de las variedades importantes o promisorias muestra efectos en la producción.

Métodos de control: En los países en los cuales la enfermedad ha ocasionado pérdidas en la producción, el método recomendado para el control es el uso de variedades resistentes.



Figura 14. Síntomas de la infección por el SCYLV. En la fotografía de la derecha se muestra una hoja sana (superior) y dos que manifiestan diferente intensidad del síntoma

Raya clorótica

Agente causal: A pesar de las investigaciones llevadas a cabo por más de 80 años en diversos países, no ha sido posible identificar el agente causante de la Raya clorótica. La enfermedad presenta algunas características que indican que

puede tratarse de un virus, pero nadie ha sido capaz de confirmar la causa de la enfermedad (CENICANA, 1995).

Síntomas: La manifestación principal de esta enfermedad es el apareamiento en las hojas de bandas de color verde claro, de longitud variable, de bordes definidos que posteriormente se tornan en bandas amarillentas de bordes irregulares y eventualmente ocurre necrosis (Figura 15), a veces a todo lo largo de la banda. Las bandas son anchas (de entre 3 y 10 milímetros) de bordes irregulares (CENICANA, 1995) a veces ondulados. Las plantas enfermas manifiestan disminución en el desarrollo, el cual es evidente en la menor altura de la planta y menor amacollamiento. Los trozos de semilla provenientes de macollas infectadas presentan problemas en la germinación y la enfermedad se observa con mayor frecuencia en plantas adultas que se desarrollan en suelos pesados y húmedos (Tokeshi, s.f.; CENICANA, 1995).

Transmisión y diseminación: La enfermedad se transmite a través de las raíces, trozos de semilla (Victoria *et al.*, 1984) y escorrentía de agua de lluvia o riego. Un campo infestado puede mantenerse así por períodos largos de tiempo (varios meses) incluso en ausencia de plantas de caña de azúcar. La Raya clorótica no se transmite por herramientas de corte o machetes.

Importancia: La variedad CG96-135 se ha mostrado susceptible en zonas cercanas al mar, cuando se siembra con semilla sin tratamiento térmico, en campos de drenaje lento o con encharcamiento.

Métodos de control: El tratamiento térmico de la semilla por inmersión en agua caliente a 50°C por 30 minutos es efectivo (Chinea *et al.*, 2000) por lo cual, el tratamiento aplicado para el manejo del Raquitismo de las socas es más que suficiente para controlar también la Raya clorótica. (Victoria *et al.*, citado por CENICANA, 1995).



Figura 15. Síntomas de Raya clorótica sobre las hojas

BIBLIOGRAFÍA

1. Arocha, Y.; López, M.; Fernández, M.; Piñol, B.; Horta, D.; Peralta, E.; Almeida, R.; Carvajal, O.; Picornell, S.; Wilson, M.; Jones, P. 2005. Transmission of a sugarcane yellow leaf phytoplasma by the delphacid planthopper *Saccharosydne saccharivora*, a new vector of sugarcane yellow leaf syndrome. *Plant Pathology* 54. 634-642. (on line), <http://ag.udel.edu/delpha/110.pdf>
2. Autrey, L. J. C.; Saumtally, S.; Dookun, A.; Sullivan, S.; Dhayan, S. 1991. Aerial transmission of the leaf scald pathogen, *Xanthomonas albilineans* (Ashby) Dowson. In: ISSCT Third Sugarcane Pathology Workshop. (Abstr. p. 4.)
3. Bailey, R. A.; Bechet, G. R. 1995. The effect of ratoon stunting disease on the yield of some south african sugar cane varieties under irrigated and rainfed conditions. *Proceedings. South African Sugar Technologists Association.* pp. 74-78.
4. Barrera, W. 2010. Effect of environmental variables and crop growth on development of Brown rust epidemics in Sugarcane. Master of Science Thesis. Louisiana State University. 78 p.
5. BSESQCANES-Varieties for your future. Chlorotic streak. Information sheet IS10013. (on line). <http://www.bses.org.au/InfoSheets/2010/IS10013.pdf>
6. CENICANA (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 1995. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cassalet, C.; Torres, J. e Isaacs, C. (eds.). Cali, Colombia. 412 p.
7. China, A.; Nass, H.; Daboin, C.; Díez, M.D. 2000. Enfermedades y daños de la caña de azúcar en Latinoamérica. FonaLAP, INICA, FUNDAZUCAR, Universidad de los Andes. Barquisimeto, Venezuela. 108 p.
8. Comstock, J. C.; Miller, J.D.; Farr, D. F. 1994. First report of dry top rot of sugarcane in Florida: symptomatology, cultivar reactions and effect on stalk water flow rate. *Plant Disease* 78 (4):428-431.
9. Frison, E. A.; Putter, C.A.J. (eds.) 1993. FAO/IBPGR Technical guidelines for the safe movement of sugarcane germplasm. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome/International Board for Plant Genetic Resources, Rome. 44 p.

10. Hughes, C. G.; Abbott, E.V.; Wismer, C. A. 1964. Sugar-cane diseases of the world. Vol. II. New York, Elsevier. 354 p.
11. INTERNATIONAL SOCIETY FOR PLANT PATHOLOGY. Committee on common names and plant diseases. List of pathogens, diseases and references (on line).
http://www.isppweb.org/names_sugarcane_pathogen.asp
12. Maldonado, A. P.; Ovalle, W.; García, S. 2009. Metodología para la detección molecular de enfermedades en caña de azúcar. Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. CENGICAÑA. pp. 106-115.
13. Martin J. P.; Abbott, E. V.; Hughes, C. G. 1961. Sugar-cane diseases of the world. Vol. I. New York, Elsevier. 542 p.
14. Magarey, R. C.; Neilsen, W. A.; Magnani, A. J. 2004. Environmental requirements for spore germination in three sugarcane leaf pathogens. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. Vol. 26.
15. NORTH AMERICAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION (NAPPO). 2007. Detections of Orange Rust of Sugarcane, *Puccinia kuehnii*, in Palm Beach County, Florida – United States. (on line).
<http://www.pestalert.org/oprDetail.cfm?oprID=270>
16. Ovalle Sáenz, W. R. 1997. Manual para identificación de enfermedades de la caña de azúcar. Guatemala, CENGICAÑA. 83 p.
17. Ovalle, W.; López, E.; Oliva, E. 2001. Evaluación de cinco tratamientos hidrotérmicos para el control de Raquitismo de las socas. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2000-2001. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 63-65.
18. Ovalle, W.; Nelson, A. 2003. Detección de patógenos con pruebas serológicas en caña de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2002-2003. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 67-69
19. Ovalle, W.; García, S. 2008. Efecto de la enfermedad del Raquitismo de las socas (*Leifsonia xyli* subs. *xyli*) en el rendimiento de caña de nueve variedades en cinco cortes. 2004-2008. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2007-2008. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 89-93.

20. Steindl, D.R.L. 1971. The elimination of leaf scald from infected planting material. Proc. Int. Soc. Cane Technol. 14:925-929.
21. Tokeshi, H. s.f. Doenças da cana-de-açúcar. Programa Nacional de Melhoramento da cana-de-açúcar. Instituto do Açúcar e do Alcool. Piracicaba, São Paulo. 70 p.
22. Vázquez de Ramallo, N. E.; Ramallo, J. 2004. Enfermedades de la caña de azúcar en Argentina. Guía para su reconocimiento y manejo. Tucumán. Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres”. 55 p.
23. Victoria, J. I.; Ochoa, O.; Cassalet, C. 1984. Enfermedades de la Caña de Azúcar en Colombia. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. 27 p. Serie Técnica No. 2.
24. Victoria, J. L.; Guzmán, M. L.; Ochoa, B. 1985. Chemicals used to disinfect tools in order to limit the spread of ratoon disease of sugarcane. Centro de Investigación de la Caña de azúcar de Colombia CENICAÑA. Documento Técnico No. 69. s.p.

XI. MADURACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y FLORACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y SU MANEJO

MADURACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Gerardo Espinoza*

INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar muestra durante su desarrollo cuatro etapas: *Iniciación, macollamiento, elongación o gran crecimiento y maduración* (Castro y Montúfar, 2004, Bezuidenhout, *et al.*, 2003). La etapa de *iniciación* comprende generalmente desde la germinación hasta 45 días después de la siembra. La etapa de *macollamiento* tiene una duración promedio de tres meses. La *elongación* ocurre en un periodo de seis meses; esta etapa es la más importante en términos de crecimiento del cultivo. La última etapa es la de *Maduración* con una duración media de 45 días.

En la etapa de *maduración* la planta de caña disminuye su ritmo de crecimiento y comienza a acumular sacarosa en el tallo. En general, el proceso de *maduración* es gradual hasta llegar a un punto máximo, después del cual el contenido de sacarosa en los tallos de caña declina. Según Buenaventura, (1986), la concentración de sacarosa en el jugo depende de varios factores como la oscilación de la temperatura entre el día y la noche (15°C), la humedad del suelo o precipitación (30-100 mm/mes) y la luminosidad (11.5-12.5 horas luz) entre 4 y 6 semanas antes de la cosecha. Esta etapa es clave por ser la etapa de la concentración del producto industrial final de interés: la sacarosa. En la mayoría de los países productores de caña de azúcar, las condiciones climáticas marcan la época de cosecha. En Guatemala, las condiciones ambientales antes mencionadas ocurren entre noviembre y abril que es el período donde se realiza la zafra.

En muchos países productores de caña se utiliza la maduración artificial, que consiste en proporcionar al cultivo ciertas condiciones para inducir su maduración, cuando éstas no se dan naturalmente, como, la reducción en la humedad del suelo, oscilaciones en la temperatura (Deuber, 1998; Caputo *et al.*, 2008; Alexander, 1973 y Legendre, 1975). En Guatemala la caña de azúcar que se cosecha al principio de la zafra tiene en general baja concentración de sacarosa, por cuanto que está iniciando su maduración y aún conserva un alto contenido de humedad en los tallos. La aplicación de maduradores permite la mayor acumulación de sacarosa en ese período inicial de la zafra. Conforme avanza el período de cosecha, se obtienen valores mayores de concentración de sacarosa en los tallos y especialmente en febrero se obtiene una mejor

* Ing. Agr., M.Sc. Especialista en Malezas y Madurantes de CENGICANA. www.cengicana.org

acumulación, debido a que las condiciones del clima coinciden con las indicadas anteriormente como favorables para la acumulación de sacarosa en ese período del año.

En términos generales, la aplicación de maduradores forma parte de la estrategia de cosecha para inducir incrementos en la recuperación de azúcar. Los resultados indican que la aplicación de maduradores ayuda a anticipar la *maduración* de la planta, mejorando la concentración de sacarosa (Villegas, 2003; Caputo *et al.*, 2008 y Leite, 2005).

MADURACIÓN NATURAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La maduración natural de la caña de azúcar, se inicia cuando se disminuye la tasa de crecimiento del tallo, hay menor humedad en el suelo y bajas temperaturas (Almeida, *et al.*, 2003); sin embargo, en Guatemala esto es un problema cuando se inicia la zafra, debido a que no se cumplen esas condiciones porque el exceso de humedad en la planta y el suelo hacen que la planta continúe creciendo.

El contenido de sacarosa en la caña es el resultado de un balance entre la cantidad total sintetizada y la cantidad hidrolizada por la actividad de las invertasas ácidas y neutras (Venkataramana y Naidu, 1993). La invertasa ácida es una enzima soluble que se localiza en el apoplasto y la vacuola de las células de la planta (Hatch *et al.*, 1963). Su función es hidrolizar y transportar la sacarosa desde las hojas hasta los tallos durante el crecimiento. La mayor actividad de esta enzima cuyo funcionamiento se da en pH 5.0-5.5 ocurre en el periodo de crecimiento y disminuye en la etapa de maduración. La invertasa neutra, por su parte, es una enzima soluble, que presenta su máxima actividad a pH 7 y se localiza en el citoplasma de los tejidos maduros, por lo que está relacionada con la acumulación de sacarosa en los tallos; su máxima actividad se presenta en el periodo de maduración (Hatch *et al.*, 1963; Batta y Singh, 1986). A medida que existe mayor maduración del tallo de caña de azúcar, la acumulación de sacarosa se incrementa y los niveles de azúcares reductores van disminuyendo en los entrenudos (Azevedo, 1981). En el proceso de fabricación, la calidad del jugo se define en función de un alto contenido de sacarosa y un bajo contenido de azúcares reductores (Glucosa y Fructosa) (Chen, 1991). Desde el punto de vista industrial, Fernandes, 1985; Salgado, 1995, y De Stefano, 1985, indican que al inicio de la maduración de la caña de azúcar y durante el transcurso de esta, los valores mínimos de los parámetros tecnológicos deben oscilar entre 80-85 por ciento de pureza del jugo, Pol % caña entre 14.4 y 15.3 y azúcares reductores < 1 por ciento.

APLICACIÓN DE MADURADORES

En Guatemala antes del uso de la tecnología de la aplicación de maduradores, el rendimiento de azúcar promedio fue de 72 kg azúcar/tonelada de caña (Buenaventura, *et al.*, 1992, Buenaventura, 2000). Hay que tomar en cuenta que en esa época se cultivaron otras variedades, la zafra era de duración diferente (entre diciembre y marzo), los procesos de corte, transporte y extracción del azúcar han sido modificados. Todos estos factores también son causa del mejoramiento de la productividad en general.

De 1980 a 1990, se iniciaron pruebas aisladas de maduradores en diferentes ingenios en Guatemala, con diversos productos incluyendo entre estos el Glifosato. Estas pruebas consistieron en aplicaciones a variedades tempranas cosechadas entre diciembre y enero. Se utilizaron dosis de entre 0.75 y 1.25 l/ha. En la zafra 1990-1991 se aplicaron maduradores en 13,000 hectáreas cultivadas con caña de azúcar. En la zafra 2010-2011 el área con aplicación registró un incremento a 148,300 hectáreas, equivalentes al 82 por ciento del total de la caña cosechada (Figura 1). En esa zafra, el Glifosato fue el madurador más utilizado y se reportó en más del 80 por ciento del total de área aplicada. Actualmente se están evaluando productos diferentes buscando algunas ventajas en comparación con el Glifosato, tales como menor efecto herbicida en variedades de caña susceptibles al producto y menos residuos indeseables en el ambiente.

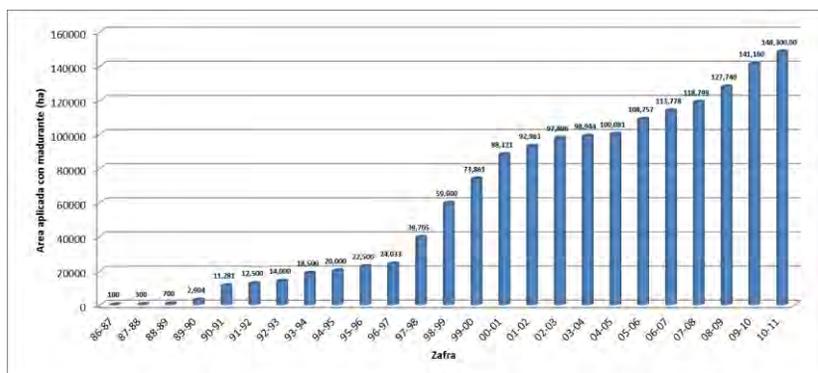


Figura 1. Tendencia en el área de aplicación de maduradores desde 1986 a 2011 en la Agroindustria Azucarera de Guatemala

MADURADORES QUÍMICOS

Los maduradores químicos en su mayoría son compuestos con propiedades herbicidas que, aplicados en dosis pequeñas inhiben, fomentan o alteran de alguna manera procesos fisiológicos en la planta de la caña de azúcar (Lavanholi *et al.*, 2002 y Almeida *et al.*, 2003).

La aplicación de maduradores tiene como objetivo alterar o modificar las condiciones morfológicas y fisiológicas de la planta de caña de azúcar. Estas modificaciones pueden ser cualitativas y cuantitativas, tales como: anticipa la maduración, retarda o inhibe el desarrollo vegetativo, promueve el incremento de sacarosa, sobre todo en los entrenudos inmaduros cercanos al ápice del tallo, permite un corte de punta más alto, disminuye el material extraño que va del campo a la fábrica (Trash), provoca el desecamiento temprano del follaje y mejora la eficiencia de la cosecha y la calidad de la materia prima (Villegas, 2003; Lavanholi *et al.*, 2002 y Almeida *et al.*, 2003).

Los maduradores químicos modifican el desarrollo de la planta en el nivel de las enzimas que catalizan la acumulación de sacarosa, lo cual favorece mayor concentración de azúcar en el tallo. En general la *maduración* es un proceso fisiológico resultado del balance entre la fotosíntesis (proceso que produce azúcares) y la respiración (proceso que consume azúcares). Estos compuestos son capaces de modificar la morfología y fisiología de la planta, paralizando el desarrollo vegetativo de la caña de azúcar, induciendo a la translocación y el almacenamiento de azúcares, principalmente sacarosa, pudiendo ocasionar modificaciones cualitativas y cuantitativas de la producción (Castro, 1999).

Los productos maduradores más utilizados en Guatemala son herbicidas químicos no selectivos, que contienen como ingrediente activo la molécula de Glifosato. También se utilizan herbicidas selectivos gramínicos y en los últimos tres años, CENGICANA juntamente con los ingenios azucareros de Guatemala, han investigado una serie de opciones entre estos maduradores no herbicidas, tales como nutrientes con base en potasio y boro entre otros reguladores de crecimiento. En la actualidad se están buscando opciones de mezclas de herbicidas con elementos mayores o menores, tales como boro (B) y potasio (K) (Espinoza y Corado, 2011).

Los maduradores basados en elementos como boro, potasio y fósforo son una opción, debido a la función fisiológica de cada elemento nutricional, que tienen un efecto aditivo en la acumulación de sacarosa; para el caso de boro, tiene la función de acelerar el transporte de la molécula de sacarosa en el floema, de las hojas al tallo, a través del complejo sacarosa-borato. Otras funciones del boro son: síntesis de paredes celulares, lignificación de la pared celular, estructura de

paredes celulares, metabolismo de carbohidratos, metabolismo de ARN y ácido indol acético (AIA), respiración, metabolismo fenólico, metabolismo de ascorbato e integridad de la membrana plasmática. Dentro de las funciones anteriores, dos son bien definidas en el proceso fisiológico de la planta: síntesis de la pared celular e integridad de la membrana plasmática (Cakmak&Römheld, 1997).

Para el caso del potasio, la función según Taiz y Zeger, (2006), es que juega un papel muy importante como catalizador dentro del metabolismo de las plantas y generalmente se encuentra donde existe transferencia de energía dentro de la planta.

El potasio participa en la formación y neutralización de ácidos orgánicos. Además juega un papel muy importante en la acumulación y consumo de azúcares dentro de la planta durante el desarrollo vegetativo (Lazcano-Ferrat, 2000 e IPNI, 2007).

El papel del potasio en la transporte de azúcares es esencial, ya que la deficiencia de este nutriente limita el transporte (movimiento) de azúcares desde la hojas (punto de fabricación) a los lugares de almacenamiento. El movimiento de los azúcares recién formados en las hojas se realiza a una velocidad aproximada de 2.5 centímetros por minuto en las plantas de caña (Lazcano-Ferrat, 2000 e IPNI, 2007).

La deficiencia de fósforo no ha manifestado tener un efecto significativo en el transporte de azúcares, la deficiencia de nitrógeno tiene un efecto intermedio, mientras que la falta de potasio puede bajar la eficiencia de transporte de azúcares por debajo de la mitad (Lazcano-Ferrat, 2000 e IPNI, 2007).

Actualmente, tanto en Guatemala como en otros países productores de caña de azúcar (EE.UU., Brasil, Colombia, Perú, Ecuador, Australia), la tendencia del uso de maduradores con base en fertilizantes y reguladores de crecimiento es mayor utilizando productos como: nitrato de potasio, nitrato de potasio + boro, carbonato de potasio, compuestos de radicales carboxílicos, reguladores del crecimiento como: Trinexapac Etil, Ethephon y mezclas entre herbicidas y/o fertilizantes (K, P, Si y B) o reguladores del crecimiento (CENICAÑA, 2011; Legendre, 1975; Almeida, 2003, Leite, *et al.*, 2008,; Leite y Crusciol, 2008; Leite, *et al.*, 2010,; Crusciol, *et al.*, 2010, Leite, 2010, Toro y Jara, 2011). Dentro de este contexto, esta tecnología promisoriosa aún necesita mayor investigación, debido a que los ensayos realizados no han mostrado los resultados esperados, comparados con los maduradores tradicionales Glifosato y graminicidas (CENICAÑA, 2011).

Productos químicos utilizados como maduradores y sus mecanismos de acción

Los maduradores químicos se dividen en dos tipos: retardadores del crecimiento e inhibidores del crecimiento. En Guatemala se utilizan ambos. Entre los retardadores del crecimiento que se utilizan se pueden mencionar el Ethephon y el Trinexapac Etil, que son reguladores del crecimiento aplicados en países productores de caña. Entre los inhibidores del crecimiento se encuentran el Glifosato, el Fluazifop-butil y el Cletodim. Los dos últimos son utilizados en menor medida en Guatemala.

A continuación se describen algunas características químicas y diferencias estructurales así como el mecanismo y modo de acción de los principales maduradores empleados en la agroindustria cañera guatemalteca y en otros países productores de caña de azúcar.

Glifosato: El Glifosato es el ingrediente activo de varias marcas de herbicidas. Existen diferencias estructurales dentro de la molécula del Glifosato con base en ácido. La molécula puede contener isopropilamina (IPA) como sal del ácido desplazando el OH como en el caso de Roundup (Hartzler, 2000). La molécula de Glifosato N (fosfometil) glicina, el ingrediente activo de Roundup, está relacionada con la glicina, el aminoácido esencial más simple que existe. Otro caso ocurre cuando la molécula de la sal es sustituida por el sulfosato que contiene trimetilsulfonio (TMS) como sal del ácido, lo que sucede en el producto Touchdown, en consecuencia, los dos tienen diferente peso molecular (Hartzler, 2000).

El Glifosato penetra en el follaje y se transporta por el floema junto con los productos de la fotosíntesis y se acumula en los meristemos (Yamada y Castro, 2007). La hipótesis más aceptada sobre el mecanismo de acción del glifosato como herbicida, plantea la inhibición de la acción de dos enzimas: la mutasa corísmica y la deshidratasa prefénica, que intervienen en la síntesis del ácido corísmico el cual es, a su vez, precursor de tres aminoácidos exclusivos que sintetizan solamente las plantas: el triptófano, la tirosina y la fenilalanina (Jaworski, 1972; Zablutowicz and Reddy, 2004). Así mismo, el Glifosato parece reducir los niveles de invertasa ácida en cañas tratadas, lo cual reduce la tasa de desdoblamiento de la sacarosa en glucosa y fructosa (Hatch *et al.*, 1963).

Fluazifop-butil y Cletodim: Fluazifop-butil es un graminicida basado en propionato de 2-(4-(5-trifluorometil-2-iloiloxipiridina)fenoxi)-N-butil. Este madurador inhibe el crecimiento al restringir el volumen del parénquima sin jugo y promover la acumulación de sacarosa en 30 días aproximadamente (Crusciol *et al.*, 2010).

El mecanismo de acción herbicida del Fluzifop-butil es igual al del Cletodim. Estos productos son capaces de inhibir la biosíntesis de lípidos específicos para gramíneas y actúan en el nivel de las enzimas que inhiben la acción de la carboxiltransferasa que pertenece al complejo enzimático de la Acetil-CoA Carboxilasa, y este a la vez bloquea la formación de triglicéridos que se combinan para formar las membranas celulares (Crusciol *et al.*, 2010).

Tanto el Fluzifop-butil como el Cletodim se acumulan en las zonas de crecimiento afectando los tejidos meristemáticos en los nudos de los tallos y yemas, lo cual detiene el crecimiento en 48 horas. Los tejidos jóvenes en expansión y los meristemas resultan ser los más sensibles (Crusciol *et al.*, 2010).

Estos productos se aplican en áreas donde existen cultivos vecinos de especies sensibles a la aplicación de Glifosato, en dosis iguales a las que se utilizan como madurador de la caña de azúcar o cuando se requiere un intervalo entre aplicación y cosecha más corto.

En Guatemala, cuando se usan estos productos se cosecha entre 30 y 40 días después de la aplicación porque en períodos mayores se puede deteriorar la caña. Lo anterior, debido a que el mecanismo de acción destruye el punto de crecimiento, con lo cual se pierde la dominancia apical y ocurre la brotación de yemas laterales, proceso que desdobra una porción de la sacarosa en glucosa y fructosa. Además, ocurre necrosis progresiva en los anillos de crecimiento de los entrenudos apicales (Crusciol *et al.*, 2010).

APLICACIÓN DE MADURADORES EN LA CAÑA DE AZÚCAR

Efecto general de la aplicación de un madurador

El resultado final más importante de la aplicación de un madurador es el incremento de la concentración de sacarosa en el jugo, siempre que se haga dentro del período adecuado establecido para cada madurador. La Figura 2, muestra la curva de maduración para el Glifosato en la variedad CP88-1508; ahí se observa el periodo de mayor acumulación de sacarosa, el cual es el intervalo ideal de cosecha.

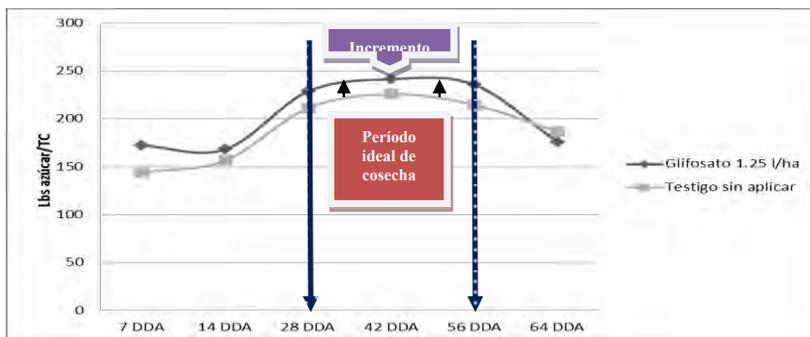


Figura 2. Curva de maduración de la variedad CP88-1508 en un régimen de aplicación y no aplicación de Glifosato como madurador. (Espinoza *et al.*, 2011b) DDA= Días después de la aplicación

Otros efectos de la aplicación de maduradores

Desecamiento temprano del follaje: Los efectos visuales de desecamiento por la aplicación de maduradores herbicidas se observan alrededor de 15 días después de la aplicación (Figura 3). Este desecamiento o efecto “quemante” es importante, ya que hace más eficiente la quema del cultivo al momento de la cosecha, y disminuye el volumen de material extraño (trash) que se transporta a la fábrica. Debido a las condiciones de humedad residual de la época lluviosa, esta práctica es particularmente importante al inicio de la zafra. Las evaluaciones de otros productos maduradores no herbicidas muestran que no poseen el efecto quemante.



Figura 3. Comparación de maduradores con y sin efecto desecante. Fotografía Manuel Corado, Ingenio Madre Tierra, 2011

Mayor contenido de sacarosa: Como ya se mencionó, la finalidad de aplicar maduradores es inducir el aumento de la concentración de sacarosa. Generalmente, en los entrenudos apicales la concentración de sacarosa es baja y la de glucosa y de fructosa son mayores, todo esto en comparación con los entrenudos basales e intermedios (Barreto, 1991). La glucosa y la fructosa reducen la pureza del jugo. La eficiencia en el uso de maduradores está directamente relacionada con la eficiencia en la recuperación final de sacarosa en la fábrica (Barreto, 1991).

Mayor altura de corte: Cuando se aplica madurador, la altura de corte puede estar definida por el efecto del madurador. Debido a que el madurador aumenta la concentración de sacarosa en los entrenudos apicales del tallo, el corte de la punta es más alto con el consecuente aprovechamiento de mayor materia prima para la fábrica (Villegas, 2003).

Efectos herbicidas en la planta de caña de azúcar: La aplicación de Glifosato disminuye el tamaño de los entrenudos sin causar efecto necrótico, lo cual se puede observar entre 15 y 30 días después de la aplicación. Para el caso de la aplicación de Fluazifop-butil y Cletodim aparecen anillos necróticos que se desarrollan a partir de los anillos de crecimiento de los entrenudos jóvenes del tallo, normalmente hasta el punto de quiebre natural, lo que permite el despuntado químico entre cuatro a seis semanas.

En la Figura 4 se muestran los diferentes efectos de maduradores: se observa acortamiento de entrenudos, follaje amarillo, aspecto de “quemado o desecado” (4A); así mismo se aprecia necrosis de la base de entrenudos apicales (4B), y se advierten efectos similares a los de Fluazifop-butil (4C).



Figura 4. A) Aplicación de Glifosato a la variedad CP72-2086, 27 días después de la aplicación (dda). B) Efecto del graminicida Fluazifop-butil 12 .5 EC en la variedad Mex82-114, 31 dda. C) Efecto de Cletodim 12 EC en la variedad Mex 82-114, 9 dda

Efecto de la aplicación de maduradores sobre el rebrote: En la Figura 5 se muestran los resultados de un estudio (CENGICAÑA, 2010), donde se observa que una sobredosificación (como la que ocurre en el traslape) a variedades susceptibles al Glifosato, como CP88-1165 en plantía, origina una serie de efectos adversos en el desarrollo normal del cultivo como la altura de planta. La diferencia en altura de la planta entre lo aplicado y no aplicado podría representar una diferencia en edad de 30 días a lo largo del ciclo de vida del cultivo afectando de esta manera la producción de caña (CENGICAÑA, 2009).

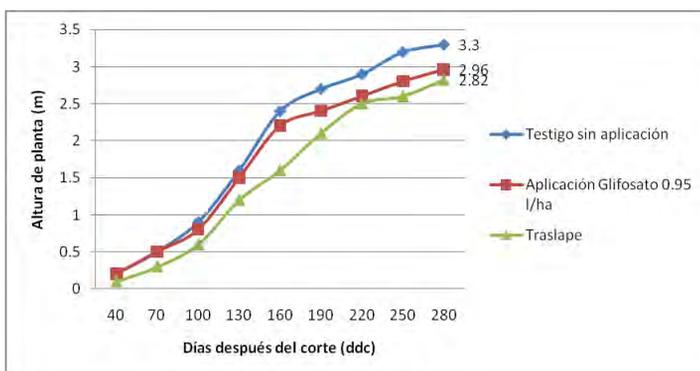


Figura 5. Efecto de sobredosificación de madurador Glifosato en caña de azúcar variedad CP88-1165, plantía. Ingenio Pantaleón, 2009

Otro efecto que se puede observar del madurador es la inhibición del crecimiento en franjas de aplicación, esto puede deberse a la altura de vuelo de la nave que puede provocar una sobredosificación y también al estado fisiológico del cultivo al momento de la aplicación (Figura 6).



Figura 6. Franjas con inhibición de crecimiento del rebrote después de la cosecha en un área aplicada con madurador



Figura 7. Clorosis foliar en rebrotes después del primer corte, por el transporte de Glifosato a las raíces en la variedad susceptible CP88-1165

Aunque los rebrotes frecuentemente emergen entre 20 y 30 días después del corte, estos pueden presentar clorosis foliar (pérdida de clorofila) y efectos násticos como plantas con enrollamiento hacia abajo (hiponastia) y arriba (epinastia), plantas que con estos efectos muy comúnmente mueren (Figura 7).

Beneficios en la producción

El uso de la tecnología de maduradores es otro de los factores importantes en los costos de producción de azúcar, debido a que el contenido de azúcar con base en el peso fresco es un factor determinante de los costos de producción de azúcar y la rentabilidad industrial. Esto debido a que los costos variables, incluidos la cosecha, transporte y costos de molienda son relacionados con la cantidad de caña requerida para producir cada tonelada de azúcar (Morgan *et al.*, 2007). El empleo de maduradores químicos para acelerar el proceso de acumulación o incremento de sacarosa es una tecnología, de relativamente bajo costo y actualmente rentable. El potencial es el de obtener hasta 450 kg de azúcar/ha extra, imputable a la aplicación de la tecnología de maduradores. Con los precios actuales se requiere incrementar aproximadamente 83 kg de azúcar/ha imputable a la aplicación de madurador, para poder pagar la inversión de la aplicación.

En la Figura 8 se muestra que con la aplicación de madurador existe mayor producción de azúcar por unidad de peso de caña (kg de azúcar/tonelada de caña), comparada con la producción de azúcar en caña sin madurador (Espinoza, 2011a). En promedio general, en ambos años se obtienen entre 270

a 493 kg de azúcar/tonelada de caña extra, por la aplicación del madurador comparado con el testigo sin aplicar. Según este estudio, el uso de maduradores es rentable de acuerdo con el costo por la aplicación, corte, alce y transporte. En la Figura 9 se muestra la tendencia de la producción de caña por unidad de área (toneladas de caña por hectárea) del mismo experimento, el cual muestra que no hubo reducción en el peso de caña para los maduradores Moddus (Trinexapacetil) y Roundup (Glifosato) cuando se comparan con el testigo sin aplicación.

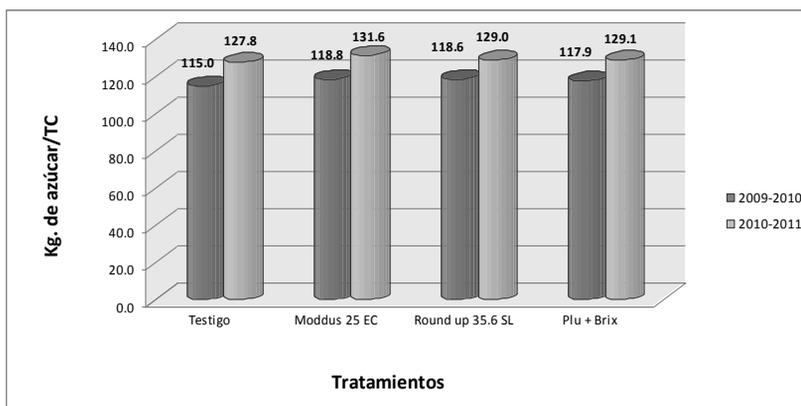


Figura 8. Rendimiento de azúcar por unidad de peso en el cultivo de caña de azúcar en la variedad CP88-1165, en condiciones de aplicación de tres maduradores, en comparación con un testigo sin aplicación

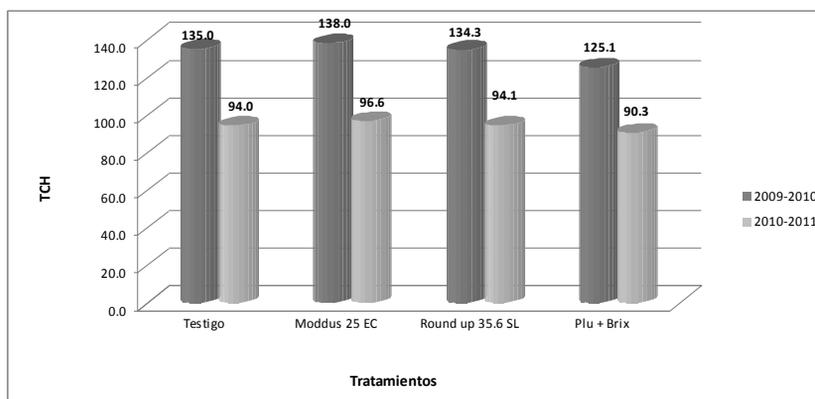


Figura 9. Rendimiento de caña por unidad de área en el cultivo en la variedad CP88-1165, en condiciones de aplicación de tres maduradores, en comparación con un testigo sin aplicación

Época de aplicación

Las aplicaciones de maduradores en Guatemala inician entre septiembre y octubre, para la cosecha en el primer tercio, de mediados de noviembre a mediados de enero. Las aplicaciones de noviembre y diciembre para las cosechas en el segundo tercio (enero-febrero) y aplicaciones en enero y febrero, para cosechas entre marzo y abril.

En Guatemala el periodo entre aplicación de Glifosato y la cosecha oscila entre 40 y 65 días de acuerdo con el tercio de cosecha, a medida que transcurre la zafra es necesario disminuir dicho periodo y las dosis, debido a que las condiciones de maduración natural se presentan en forma progresiva. Es necesaria una coordinación adecuada entre aplicación de madurador y cosecha, para obtener un corte continuo en el momento apropiado, de las áreas aplicadas.

Selección de lotes

Para la selección de lotes a aplicar con madurador químico se requiere del conocimiento de las condiciones de las áreas. Las condiciones para la selección de lotes con caña que no es para renovación, son más extensos, en comparación con aquellos lotes que serán renovados.

Entre las condiciones de selección están:

- Variedades con buena respuesta al madurador
- Variedades con alta producción de caña (>100 TCH)
- Plantaciones sin estrés por humedad, enfermedades o plagas
- Topografía que no limite un vuelo seguro de la aeronave
- Lotes sin cultivos vecinos de especies sensibles al producto
- Plantaciones uniformes en cuanto al tamaño de la caña
- Áreas grandes para mejor eficiencia de la aplicación
- Áreas con caña sin acame.

Factores que se deben considerar para la aplicación de los maduradores

Productividad: En Guatemala la aplicación de maduradores se planifica de acuerdo con la estimación de la productividad, tipo de suelo, dosis en cada época de aplicación y de los lotes seleccionados, según las condiciones mencionadas arriba. Para el caso del criterio de productividad se calcula una estimación de las toneladas de caña/ha, antes de la aplicación (desde 50 días hasta un día antes de la aplicación). La estimación se hace tomando en cuenta la población, altura y diámetro de cinco muestras por cada 20 hectáreas y el

historial de producción del lote en cuestión. En el menor de los casos se toma en cuenta también el peso de la muestra.

Suelos: En suelos arenosos normalmente las dosis son menores que el promedio, el cual es 1.4 l/ha. Los suelos arcillosos favorecen la *maduración* natural y por eso se utilizan dosis menores que las normales al inicio de la zafra.

Los suelos donde se produce caña en Guatemala son de naturaleza variable. Se encuentran suelos de los órdenes Mollisoles, Andisoles, Inceptisoles y Vertisoles (Pérez, 2008). Los suelos Vertisoles tienen la característica de facilitar la *maduración* natural de algunas variedades. Se encuentran en mayor porcentaje en el área del ingenio Tzulá, por lo tanto en esos sitios es menor el uso de maduradores para el tercer tercio (Posadas, 2008). La aplicación de Glifosato en áreas con predominio de suelos arenosos debe considerar el uso de no más de 1.0 l/ha (basado en una producción de 100 toneladas de caña), ya que puede dañarse el rebrote del ciclo subsiguiente.

Humedad del suelo: En algunos ingenios se recomienda limitar el riego hacia los 30-45 días antes de la cosecha, con el fin de facilitar a la planta el transporte de azúcares hacia el tallo. Cuando no se cumple con esa recomendación se le puede dar a la planta “una señal” de utilizar el azúcar para continuar su crecimiento y, por lo tanto, disminuir el rendimiento de azúcar en los tallos. Debido a lo anterior, es importante aumentar la dosis de madurador cuando existen condiciones de alta humedad en el suelo (Villegas, 2003).

En el nivel comercial, las dosis de Glifosato que se utilizan en Guatemala pueden variar de acuerdo con el mes de zafra y variedad. Por ejemplo para inicios de la zafra la dosis puede oscilar entre 0.8 y 1.5 l/ha. Puede variar también de acuerdo con la biomasa esperada o estimada del área a aplicar. Cuando se aplica en un área que será renovada, la dosis del producto madurador varía entre 1.25 y 1.75 l/ha. En promedio las aplicaciones de Glifosato oscilan entre 1 y 1.40 l/ha. Para el caso de graminicidas se aplica en un rango de dosis de 0.5 a 0.8 l/ha.

Para obtener los resultados esperados con la aplicación de maduradores se deben tener en cuenta las características agroecológicas de cada zona, producto a aplicar, dosis y época, debido a que en Guatemala normalmente se inician las aplicaciones de maduradores con dosis mayores al promedio y a medida que se avanza en la zafra se van reduciendo. Esto se debe a la reducción gradual del exceso de humedad, por lo cual se favorece la maduración natural.

La variedad y el número de corte (plantía o soca): Estos aspectos son importantes para definir la dosis. Entre las variedades de caña de azúcar, de mayor uso y más susceptibles a la aplicación de madurador Glifosato, están la CP88-1165 y la CP72-1312, ambas sufren daños principalmente en plantía, los cuales pueden notarse a partir de una dosis de 0.8 l/ha que es una dosis baja. Es importante mencionar que la última variedad no es cultivada en áreas extensas. En caña soca, estas variedades por lo general no presentan daños de consideración probablemente debido a la mayor cantidad de biomasa.

Las variedades CP72-2086 y CP73-1547, entre otras, no presentan problemas por la aplicación de madurador Glifosato en plantía, con dosis entre 1.0 y 1.2 l/ha de Glifosato para producciones de 100 y 120 toneladas de caña/ha respectivamente.

GENERALIDADES SOBRE LAS APLICACIONES AÉREAS

Aeronaves

En Guatemala los maduradores se aplican con avionetas o helicópteros, estos últimos son los más utilizados debido a que permiten la aplicación en áreas con topografía irregular. Las avionetas se usan en bloques uniformes de gran tamaño (>100 ha), logrando con ello mejor eficiencia en la aplicación.

Equipo

Para las aplicaciones aéreas se utilizan equipos como receptores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para precisar la ubicación y aplicar sobre el objetivo, esto evita que cultivos o áreas colindantes sean rociadas.

También se utiliza el medidor de flujo (Flow control), la función principal de este dispositivo es fijar la descarga del volumen calibrado, lo cual compensa automáticamente la descarga cuando la velocidad de la aeronave varía.

Otro de los dispositivos empleados es el Termoanemómetro para medir las condiciones climáticas en el transcurso de la aplicación, como la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa. Esa información sirve para cambiar los volúmenes de la aplicación y así evitar efectos negativos en el ambiente. En ocasiones, esos registros climáticos permiten explicar variaciones en el efecto del producto aplicado.

Otro de los equipos para medir la calidad de la aplicación de los maduradores es el “Escáner”, el cual se utiliza con el programa DepositScan (USDA), para determinar variables como: Numero de gotas/cm²; tamaño de gota (µm), volumen de aplicación y de esta manera obtener el coeficiente de variación (CV%) en cuanto a la cobertura (Figura 10). Estos parámetros tienen la finalidad de determinar posteriormente la calidad de la aplicación.

Algunos ingenios aún utilizan el sistema de lupa para contabilizar las gotas en un centímetro cuadrado, sin embargo, con ese método no se determina el tamaño de gota, el cual es un aspecto importante como se verá más adelante.

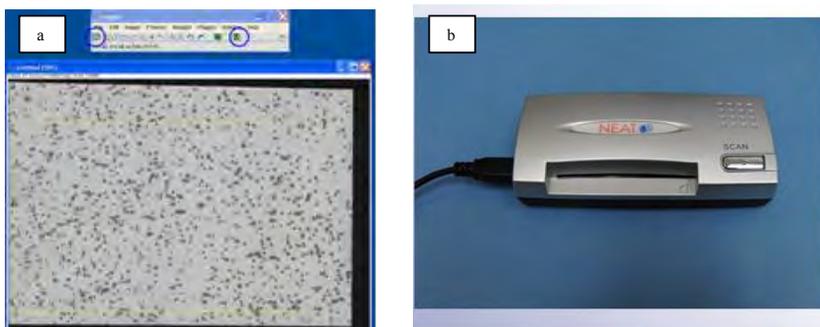


Figura 10. Equipo utilizado para determinar parámetros de calidad de aplicación. a) Tarjeta hidrosensible. b) Escáner para establecer parámetros de calidad de la aplicación

Otro equipo importante son las boquillas de aplicación. En la Industria Azucarera de Guatemala para las diversas naves se usan las boquillas DG80-02, DG80-03 DG80-04, DG80-05, DG80-06 y CP11TT. Estas boquillas tienen la característica de minimizar la deriva del producto aplicado y manejar el tamaño de las gotas, de tal manera que reducen el tamaño de gotas a menos de 150 µm, así se evita la deriva.

Control y normas de las aplicaciones aéreas

Durante la planificación, los encargados de las aplicaciones aéreas de maduradores, deben coordinar todo el trabajo con las personas responsables de las áreas de cultivo donde se aplicarán. Este personal verifica que no existan complicaciones para la aplicación, tales como cultivos vecinos susceptibles al madurador, cables del tendido eléctrico, árboles, etcétera. Cuando hay algún obstáculo se deja al menos entre 300 y 500 m de franja de seguridad.

Para asegurar una buena aplicación, con anticipación se calibra la aeronave con el fin de cumplir con las normas y estándares de una buena aplicación. Para ello deben contemplarse varios aspectos:

- a. **Anchura de la franja de aplicación.** Ésta, para helicópteros, oscila entre 16 y 20 m, y para avionetas entre 15 y 22 m.
- b. **La uniformidad del tamaño de las gotas, la distribución de las gotas y el número de gotas/cm².** Para algunos ingenios en Guatemala, el número ideal de gotas/cm² para el madurador Glifosato y otros oscila entre 15 y 30 gotas/cm². De acuerdo con el tipo de aeronave utilizada, el coeficiente de variación (%) debe ser menor que 30 por ciento.
- c. **El porcentaje de variación en el flujo del volumen de aplicación.** El volumen de agua en la aplicación oscila entre 18 y 30 litros de agua/ha. El volumen de agua definirá la cantidad de gotas que llegan al follaje del cultivo de caña de azúcar. Para medir la cantidad de gotas y calidad de la aplicación se utiliza el equipo de monitoreo en aplicaciones aéreas, el cual consiste principalmente en tarjetas hidro-sensibles, que se colocan en al menos el ancho de tres pases de la aeronave. Esta medición es sola una referencia de la calidad de aplicación.
- d. Por otro lado, para lograr una buena aplicación deben ocurrir ciertas condiciones ambientales favorables, estas son: temperatura < 30°C, humedad relativa > al 60%, velocidad del viento < a 10 km/hr. Se debe evitar aplicaciones con inversión térmica, ya que esa condición favorece la deriva del producto a otras áreas.

La inversión térmica ocurre sobre todo de diciembre a febrero. El fenómeno de inversión térmica se presenta cuando, por las noches despejadas, el suelo se enfría rápidamente. El suelo a la vez enfría el aire que está en contacto, por lo que este se vuelve más denso y pesado en comparación con el que está en la capa superior. Si este fenómeno coincide con la ausencia de viento no se presenta la convección térmica, disminuye la velocidad de mezclado vertical entre las dos capas de aire, y como consecuencia ocurre el arrastre del producto aplicado en áreas vecinas.

MONITOREO POST-APLICACIÓN Y DURANTE LA COSECHA

Normalmente después de la aplicación de madurador se realizan muestreos pre-cosecha, con el fin de conocer el efecto madurador en la acumulación de

sacarosa y de esta manera planificar la cosecha en su punto de máxima acumulación. Los muestreos precosecha se efectúan en al menos cinco puntos de un lote de 20 ha; en cada estación o punto de muestreo se obtienen cinco tallos molederos cortados continuos en al menos 1 m lineal, o una macolla completa. Cada tallo se corta en trozos de entre 40 y 50 cm de longitud. En el laboratorio se analizan los jugos para determinar brix, pol % caña y azúcares reductores y se calculan los valores de pureza del jugo en porcentaje, rendimiento potencial y comercial (kg de azúcar/tonelada métrica de caña).

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexander, A. 1973. Sugarcane physiology a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system. Amsterdam, Holanda. 752 p.
2. Almeida, J. C. V.; Sanomya, R.; Leite, C.F. y Cassinelli, N.F. 2003. Eficiência agronômica de sulfometuron-methyl como maturador na cultura da cana-de-açúcar. Revista STAB, v.21, pp. 36-37.
3. Azevedo, H. J. 1981. Fisiologia da cana-de-açúcar. Araras: Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúca.108 p.
4. Balbín, A. M. I.; Ortega, D. E.; Valdez V. R. 1996. Cambios fisiológicos de la caña de azúcar ante el déficit hídrico. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 135 p.
5. Barreto, L. 1991. Efecto de varios porcentajes y tipos de “trash” en rendimiento de azúcar. International Sugar Journal, V.93. pp. 191-194.
6. Batta, S. H.; Singh, R. 1986. Sucrose metabolism in sugar cane grown under varying climatic conditions: synthesis and storage of sucrose in relation to the activities of sucrose syntethase, sucrose-phosphate syntethase and invertase. Phytochemistry 25: 2,431-2,431.
7. Bezuidenhout, N.; O'Leary, J.; Singelsa, G.; Bajicb, V. 2003. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. Agricultural Systems. Volume 76, Issue 2, pp. 589-599.
8. Buenaventura, C.; Gómez, R.; Paz, V., Salazar, E.; Méndez, S.; Cucalón, E. 1992. Evaluación del efecto del Glifosato como madurador en cinco variedades de caña de azúcar de maduración tardía. CENGICANA. Documento Técnico No. 2.

9. Buenaventura, C. 2000. Evaluación de la sal monoamónica de Glifosato como madurador de la caña de azúcar, variedad Ragnar, en diferentes sitios y épocas de aplicación. Carta Informativa. Ecuador, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador.2 (4): 1-7.
10. Buenaventura, C. E. 1986. Control de la maduración de la caña de azúcar En: El Cultivo de la Caña de Azúcar. Tecnicaña. Cali, Colombia. pp. 299-307.
11. Cakmak, I.; Römheld, V. 1997. Boron deficiency-induced impairments of celular functions in plants. In: DELL, B.; ROWN, P.H.; BELL, R.W. (eds.). Boron in soil and plants: review. Symposium, Chiang Mai, reprinted Plant and Soil, v.193, n.1-2, pp.71-83.
12. Castro, O.; Montúfar, J. 2004. Respuesta de la caña de azúcar al riego precorte caso de la finca Churubusco. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2003-2004. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 192-198.
13. Castro, P. R. C. 1999. Maduradores químicos em cana-de açúcar. *Saccharum*, v. 1, p. 12-16.
14. Caputo, M. M.; Ferreira E.G.; Almeida, M.; Stefano, S. M.2008. Resposta de genótipos de cana-de-açúcar à aplicação de indutores de maturação. *Bragantia: Revista de Ciências agrônomicas*, año/vol. 67, número 001 Instituto Agrônômico de Campinas. pp. 15-23.
15. Chen, J. C. P. 1991. Manual de Azúcar de Caña. Editorial. Limusa. México. 1200 p.
16. CENICAÑA. 2011. Evaluación de productos maduradores. Cali. Informe Anual 2010. pp. 91-93
17. CENGICAÑA. 2010. Madurantes. En: XV Simposio Análisis de la Zafra. 2009-2010 CD-R.
18. Crusciol, C. A. C.; Leite, G. H. P.; Almeida, M.; Ferraz, G. 2010. Uso de maduradores com ou sem misturas. Tópicos em eco fisiologia da cana-da-sucar. Botucatu. 111 p.
19. De Stefano R. P. 1985. False pol in sugar cane juice-causes and detection. *Journal American. Society. SugarCane Technology*. 4: 80-85.

20. Deuber, R. 1998. Maduración da cana-de-açúcar na região sudeste do brasil. in: seminário de tecnologia agronômica, 4. Piracicaba. anais. Piracicaba: Copersucar. pp. 33-40.
21. Espinoza, J. G.; Corado, M. 2011. Evaluación de madurantes no herbicidas en caña de azúcar, Finca Santa Isabel. Ingenio Madre Tierra. Presentación de resultados Power Point. Comité de Malezas y Madurantes CENGICAÑA.
22. Espinoza, J. G.; Corado, M.; Martínez, M.; Echeverría, C.; Pineda, J. C. 2011a. Efecto de madurantes no herbicidas en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) variedad CP88-1165. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2010-2011. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 261-266.
23. Espinoza, G.; Acan, J.; Ufer, C.; Duarte, R.; Montepeque, R. 2011b. Evaluación de trazas de Glifosato en caña de azúcar. Presentación de resultados, en Power Point Comité de Malezas y Madurantes. CENGICAÑA.
24. Fernandes, A. C. 1985. Autorização da colheita da cana-de-açúcar. In: semana de fermentação alcoólica “Jaime Rocha de Almeida”,4. Piracicaba. Anais. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. p.12-21.
25. Hatch, M. D.; Sacher JA y Glasziou, K. T. 1963. Sugar accumulation cycle in sugarcane. I. Studies on enzymes of the cycle. *Plant Physiology*. 38: 338-343.
26. Hartzler, B. 2000. Roundup vs. Touchdown. (En línea). Iowa. Iowa State University. Consultado 14 jun. 2007. Formato HTML. Disponible en: <http://www.weeds.iastate.edu/mgmt/qtr97-1/touchdown.htm>.
27. IPNI. 2007. ¿Por qué el potasio ayuda a la movilización de azúcares en la planta? (en línea). USA. (Consultado 30 octubre, 2011). Formato HTML. Disponible en: [http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/\\$webindex/707D4E47C3BDFD4A86256CF000022C2B?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/mexnca.nsf/$webindex/707D4E47C3BDFD4A86256CF000022C2B?opendocument&navigator=home+page)
28. Jaworski, E. G. 1972. Mode of action of N-phosphonomethylglycine: inhibition of aromatic amino acid biosynthesis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, V. 20, p. 1195-1198.

29. Lavanholi, M. das G. D. P.; Casagrande, A. A.; Oliveira, L. A. F.; Fernandes, G. A.; Rosa R. F. 2002. Aplicação de ethephon e imazapyr em cana-de-açúcar em diferentes épocas e sua influência no florescimento, acidez do caldo e teores de açúcares nos colmos – variedade SP 70-1143. Revista STAB, V.20, pp.42-45.
30. Lazcano-Ferrat, I. 2000. El potasio. Esencial para un buen rendimiento en caña de azúcar. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INOFOS). Informaciones Agronómicas, 4 (6). México.
31. Leite, G. H. P.; Cruscio, C. A. C.; Almeida M.; Filho, W. G. V. 2008. Growth regulators and technological quality of sugarcane in the middle of the cropping season. Ciência Agro técnica, Lavras, V. 32, N. 6, pp. 1,843-1,850.
32. Leite, G. H. P. 2005. Maturação induzida, alterações fisiológicas, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), 141p. Dissertação (Mestrado Em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrônomicas– UNESP, Botucatu.
33. Leite G. H. P. e Cruscio C. A. C. 2008. Reguladores vegetais no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuaria Brasileira., Brasília, v.43, n.8, pp.995-1001.
34. Legendre, B. L. 1975. Ripening of sugarcane: Effects of sunlight, temperature, and rainfall. *Crop Science*. 15(3):349-352.
35. Meneses, A.; Melgar, M.; Posadas, W. 2011. Boletín Estadístico. Series Históricas de producción, exportación y consumo de azúcar en Guatemala. Guatemala, CENGICAÑA. Año 12, No. 1. 8 p.
36. Morgan, T.; Jackson, P.; McDonald, L.; Holtum, J. 2007. Chemical ripeners increase early season sugar content in a range of sugarcane varieties. *Australian Journal of Agricultural Research* 58. pp. 233–24.
37. Pérez, O. 2008. Manual de clasificación de suelos para la producción de caña de azúcar. Guatemala, CENGICAÑA. 215 p.
38. Posadas, M. 2009. Presentación de resultados de aplicación de madurantes 2008-2009. Comité de Malezas y Madurantes. CENGICAÑA. Presentación Power Point.

39. Salgado, G. S. 1995. Cómo incrementar los rendimientos de caña de azúcar en el estado de Tabasco. Campus Tabasco-ISPROTAB. H. Cárdenas, Tabasco, México. 20 p.
40. Subiros, F. 1995. El cultivo de la caña de azúcar. San José, Costa Rica, EUNED. 441 p.
41. Taiz L.; Zeiger E. 2006. Fisiología Vegetal. 3a. Ed. 581 p. Editorial Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, USA.
42. Toro, F. J.; Jara, W. 2011. Ventajas del promadur® como inductor ambientalmente seguro de la acumulación de sacarosa y derivados. (En línea). Consultado 30 Octubre. Disponible en <http://www.fertilife.org/docu/escrito-cana-azucar-congreso-ecuador.pdf>
43. Venkataramana, S. K.; Naidu, K. M. 1993. Invertase-sucrose relationship in young and mature stems of sugarcane. *Phytochemistry* 32: 821-822.
44. Viator, B. J.; Viator, C.; Jackson, W.; Waguespack, H.; Richard, Jr. E. P. 2004. Evaluation of Potassium-based Ripeners as an Alternative to Glyphosate and the Effects of 2,4-D on Herbicidal Cane Ripening. *Journal American Society Sugar Cane Technologists*, Vol. 24, pp. 98.
45. Villegas, F. 2003. Maduradores de caña de azúcar. Cali, Colombia. CENICAÑA. 66 p.
46. Yamada, T.; Castro, P. R. C. 2007. Efeitos do glifosato nas plantas: Implicações fisiológicas e agronômicas. IPNI (International Plant Nutrition Institute), Informações Agronômicas. nº 119.
47. Zablotowicz, R. M.; Reddy, K. N. 2004. Impact of glyphosate and *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis; with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. *Journal of Environmental Quality*, V. 33, pp. 825-831.

FLORACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y SU MANEJO

Gerardo Espinoza y José Luis Quemé*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las angiospermas se divide en dos etapas: a) vegetativa y b) reproductiva, la primera se refiere al desarrollo de raíces, tallos y hojas, y la segunda está relacionada con la formación de flores, frutos y semillas. El crecimiento reproductivo se divide en dos estados: a) floración y b) fructificación, los cuales son distintos morfológica y fisiológicamente. Además de los factores ambientales, el crecimiento vegetativo y el estado de fructificación están determinados por las condiciones nutritivas de la planta, mientras que la floración parece estar principalmente gobernada por hormonas. (Meyer *et al.*, 1970).

La floración en la caña de azúcar se da cuando, en ciertas condiciones, el punto de crecimiento suspende la formación de primordios foliares e inicia la producción de un primordio floral, de este modo se da el cambio vegetativo a reproductivo. Este cambio trae como consecuencia la suspensión de la formación de entrenudos, y una vez que los entrenudos jóvenes se han expandido el crecimiento se detiene. Las variedades con flor acumulan más fibra en los entrenudos superiores y se manifiesta en el desarrollo de la médula (Bakker, 1999). La médula corchosa se extiende de arriba hacia abajo y cuando se procesa el tallo hay una mayor producción de fibra y bajo rendimiento de azúcar (Larrahondo y Villegas, 2009).

El efecto de la floración en el rendimiento de la caña y azúcar depende principalmente de los siguientes factores: 1) Intensidad de la floración. 2) Edad del cultivo en que aparece la floración. En este caso, el efecto de la floración es mayor cuando se presenta en plantas jóvenes, no así cuando la floración se da en el periodo de maduración, en donde el efecto de la floración sobre el rendimiento de caña es mínimo y el contenido de azúcar puede aumentar. 3) Período de tiempo entre la floración y la cosecha. En las cosechas tardías existe un aumento en el contenido de corcho (disminuye el peso del tallo), la dominancia apical se pierde y se inicia la brotación de las yemas laterales

* Gerardo Espinoza es Ing. Agr., M.Sc. Especialista en Malezas y Madurantes, José Luis Quemé es Ing. Agr., Ph.D., Fitomejorador de CENGICANA www.cengicana.org

(lalas), esto último reduce el contenido de sacarosa en el tallo (Bakker, 1999; Larrahondo y Villegas, 2009).

En Guatemala, como en otros países productores de azúcar de caña, para contrarrestar el efecto negativo de la floración se manejan algunos de los factores que inciden en ella. En el presente capítulo se hace una breve descripción de algunos de los factores que afectan la floración y de técnicas de manejo empleadas para reducir su efecto negativo.

FACTORES QUE AFECTAN LA FLORACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

La floración de la caña de azúcar está influenciada por factores externos e internos, tales como: el fotoperíodo, temperatura, insolación o brillo solar, latitud, altitud, nutrientes y humedad del suelo, edad fisiológica, sensibilidad de la variedad para florecer, hormonas, fitocromos y otros (Araldi *et al.*, 2010; Alexander, 1973; Castro, 1998; James y Miller, 1972; Morales, 1996; Soto, 1999; Viveros, 1990).

Fotoperíodo

Es uno de los factores más predominantes que influyen en el proceso de la floración (Alexander, 1973). En relación con el fotoperíodo, la caña de azúcar se comporta como una planta de día corto (Araldi *et al.*, 2010; Arrivillaga, 1988). Lo anterior implica que la inducción de la floración se propicia cuando la longitud de la noche (Nictoperíodo) es preponderante y de una duración superior a un nivel crítico. Alexander (1973) menciona que la longitud del día de 12 h 28 min (Nictoperíodo de 11 h 32 min) es la más cercana para la inducción de la floración. Esto concuerda con lo reportado por Nuss y Berding (1999), quienes indican que la floración de la caña de azúcar es inducida mediante la disminución lenta de la longitud del día a partir de 12 h 30 min. Además mencionan que la floración es mucho mejor en áreas donde la longitud del día disminuye a una tasa de 30 a 60 segundos por día, a partir de 12 h 45 min. Quemé *et al.*, (2011) mencionan que de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala, relacionados con salidas y puestas del sol; las 12 h 30 min ocurren naturalmente en Guatemala entre el 23 y 25 de agosto, tal como se observa en la Figura 1, mientras que las 12 h 45 min ocurren en los primeros seis días de agosto.

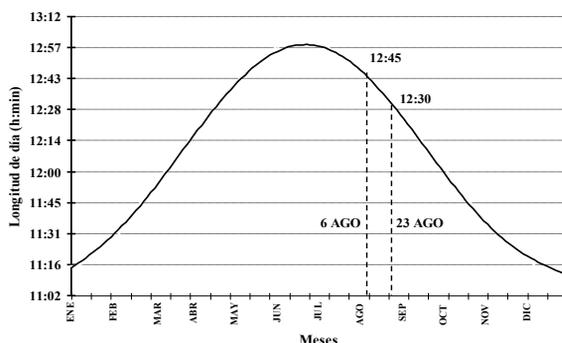


Figura 1. Curva de fotoperiodo a 14° 30' Latitud Norte en Guatemala

En un estudio realizado en el estrato medio de la zona cañera guatemalteca, en donde se consideró el fotoperiodo de 12 h 30 min y la longitud promedio de la inflorescencia inicial, se determinó que la recepción del estímulo para la inducción floral y la iniciación del primordio floral en la variedad CP72-2086 se pudo haber dado en el período comprendido del 16 al 31 de agosto (Quemé *et al.*, 2008).

Temperatura

La floración es afectada por la temperatura mínima, máxima y oscilación o amplitud térmica. Se ha determinado que las temperaturas nocturnas inductivas están entre 21°C y 24°C (James y Miller, 1972; Viveros, 1990). Según información de campos comerciales de caña de azúcar en Zimbabwe, la floración se previno o redujo cuando las temperaturas nocturnas durante el período crítico de iniciación de la floración disminuyeron por debajo de 18°C en cuatro o diez ocasiones. En cambio, en regiones tropicales se observó inhibición con altas temperaturas por arriba de 32°C, durante la iniciación de la floración (Nuss y Berding, 1999). Quemé *et al.* (2008) en un estudio llevado a cabo con la variedad CP72-2086 en el estrato medio de la zona cañera de Guatemala (Estación Experimental Camantulul de CENGICAÑA) determinaron que en el periodo de inducción floral (segunda quincena de agosto) hubo una frecuencia de siete días con temperaturas mínimas inferiores a 18°C, lo cual juntamente con el brillo solar habría influido en la disminución de la flor en el año 2006 (32%), mientras que frecuencias de temperaturas mínimas, entre 21-24°C, favorecieron el incremento de la floración en el año 2007 (73%).

Insolación o brillo solar

El brillo solar es otro factor climatológico que se relaciona con la floración de la caña de azúcar. También se le conoce como heliofanía y para su medición se utiliza el heliógrafo. La heliofanía es el número de horas de sol o período en el cual un lugar recibe radiación solar directa y que puede ser registrado por el heliógrafo. Cuando hay nubosidad, el instrumento recibe luz difusa, lo que interrumpe el registro del brillo solar (Castro, 1998; Guijarro, 2007; Wright, 2003). En un estudio realizado en la zona cañera de Guatemala se encontró que la mayor incidencia de la floración se dio en el estrato medio, mientras que en el estrato bajo fue menos intensa debido al incremento de la insolación (Castro, 2000). En diferentes estudios en el estrato medio de la zona cañera guatemalteca se ha observado una relación inversa entre el número de horas de brillo solar de agosto y el porcentaje de floración, esto quiere decir que a mayor número de horas de brillo solar la floración tiende a disminuir (Quemé *et al.*, 2008; Quemé *et al.*, 2011).

Latitud

La latitud tiene un fuerte efecto sobre la intensidad de la floración, por ejemplo, en ambientes tropicales, como el de Sudán (13° 05' N) y Malawi (12° 30' S), se reportan valores de floración entre 80 y 100 por ciento de las plantas. Sin embargo, en las regiones subtropicales como África del Sur (25° 22' a 30° 30' S), la floración se produce de forma esporádica y la incidencia es baja (Singels y Donaldson, 2004, citados por Araldi *et al.*, 2010). Guatemala está ubicada en la región tropical, aproximadamente a 14° 30' N, con un fotoperiodo que favorece la intensidad e incidencia de la floración (Figura 1).

Altitud

La zona cañera guatemalteca está dividida en cuatro estratos altitudinales: litoral (0-40 msnm), bajo (40-100 msnm), medio (100-300 msnm) y alto (>300 msnm). A mayor altitud la temperatura disminuye y esta situación puede reducir la floración; sin embargo, en la zona cañera de Guatemala la intensidad de la floración es mayor a medida que se aumenta la altitud, de donde la mayor intensidad e incidencia de la floración se obtiene en el estrato alto (Figura 2). Esta situación se debe principalmente a que en los estratos medio y alto hay menos brillo solar (mayor nubosidad) en el momento de la inducción y las temperaturas mínimas nocturnas en la mayoría de los años no son menores a los 18°C (Quemé *et al.*, 2003; Quemé *et al.*, 2008).

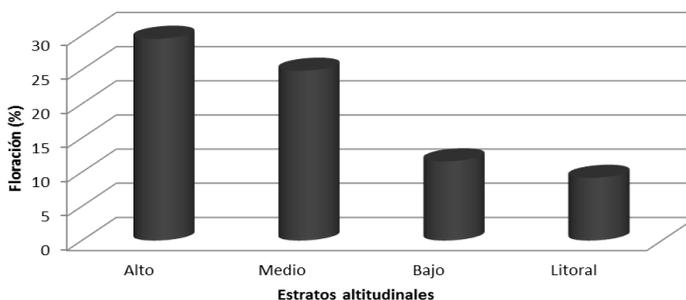


Figura 2. Comportamiento de la floración según estrato altitudinal en la Agroindustria Azucarera de Guatemala (CENGICAÑA, 2010)

Nutrientes y humedad del suelo

Las dosis altas de nitrógeno, especialmente en el período de inducción, disminuyen la floración, debido al aumento de la relación carbono/nitrógeno. Según Berding *et al.* (2004) y Gosnell (1973), las dosis dobles de nitrógeno reducen la emergencia de panículas, resultando en un efecto negativo sobre la floración. En Sudáfrica la floración fue atrasada en 25 días por el excesivo nitrógeno en el suelo (Nuss y Berding, 1999). Por otro lado, Brunkhorst (2003, 2001) indica que un régimen constante de la nutrición a través del proceso de iniciación y desarrollo de la panícula produce una mejor iniciación y desarrollo de la misma.

En cuanto a la humedad del suelo, cuando existe estrés hídrico la floración disminuye, sobre esta base, el manejo del agua con fines de prevenir la floración solo se puede realizar en ciertos ambientes, principalmente poco lluviosos (Humbert, 1974; Moore y Nuss, 1987 citados por Araldi *et al.*, 2010). Sin embargo, Moore (1987); Moore y Nuss (1987) indican que la irrigación puede favorecer las condiciones para la floración, aunque Gosnell (1973) señala que la respuesta a la floración varía con la cantidad de agua irrigada. Un trabajo realizado por Panje y Srinivasan (1960) demostró 14 días de atraso en la formación de la floración en clones de *Saccharum spontaneum*, cuando, en el periodo inductivo, la precipitación fue de 74 mm.

Madurez fisiológica

La madurez fisiológica se refiere a la condición de la planta alcanzada para florecer independientemente de su edad. Antes de que la planta de caña de azúcar alcance su madurez fisiológica debe pasar por una etapa de inmadurez fisiológica llamada “fase juvenil”. Como regla general, los tallos que tienen tres

o cuatro nudos visibles son lo suficientemente maduros como para florecer. Sin embargo se señala que las condiciones fisiológicas exactas bajo las cuales se pueda distinguir entre tallos de floración potencial y tallos juveniles aún no se han determinado (Alexander, 1973). En la madurez fisiológica la planta muestra una amplia capacidad para responder a los estímulos que inducen la floración como lo indican reportes en Colombia y Guatemala. Viveros *et al.*, 1991, determinaron que plantas entre tres y seis meses responden a tratamientos fotoinductivos en forma similar. En Guatemala, asumiendo que el periodo inductivo se da en agosto, se ha comprobado que la inducción de la floración se ha dado en plantas de tres a nueve meses de edad (Quemé *et al.*, 2011).

Sensibilidad de la variedad para florecer

Entre los factores que afectan la floración de la caña de azúcar y que permiten su manejo está considerado la sensibilidad del genotipo al estímulo floral. Bajo las condiciones climatológicas de Guatemala, la Agroindustria Azucarera cuenta con variedades específicas que, aunque las condiciones favorezcan la floración natural, pueden variar en su incidencia de floración. Algunos ejemplos de variedades con alto porcentaje de flor son CP73-1547, CP72-1312, CP88-1508, de floración intermedia: CP88-1165, CP72-2086 y de nula o escasa floración: PR75-2002 (Quemé *et al.*, 2011).

En la parte comercial se comprueba que el comportamiento de la intensidad de la floración es varietal. En el ingenio Palo Gordo para la zafra 2010-2011, se verificó que la variedad CP72-2086 mostró en promedio 46 por ciento de floración, mientras que la variedad CP88-1165 mostró 23 por ciento (Guzmán, 2011).

Fitocromos y hormonas

La respuesta al fotoperíodo se percibe en la hoja a través de los fitocromos, mientras que la respuesta de la floración ocurre en el ápice del tallo. El transporte del estímulo inductor desde la hoja hasta el ápice caulinar requiere de la presencia de hormonas. Desde hace varias décadas, investigadores han postulado la existencia del florígeno y se han dedicado a la tarea de aislar y caracterizar esta hormona, tratando de comprender el mecanismo de interacción con los fitocromos, sin tener éxito hasta ahora. Recientemente, en análisis genéticos se ha demostrado que el ARNm (señal florígena) es capaz de traslocarse vía floema y alterar el desarrollo del ápice del tallo. Tal experimento lleva a la hipótesis de que el llamado florígeno podría ser ARNm de un gen estimulador de la floración (Araldi *et al.*, 2010).

MANEJO DE LA FLORACIÓN

En Guatemala se ha tratado de disminuir el efecto negativo de la floración mediante la regulación de algunos factores mencionados anteriormente. El manejo varietal y el uso de compuestos químicos inhibidores de la floración son los principales factores susceptibles de ser controlados.

Variedades

La Agroindustria Azucarera de Guatemala ha clasificado sus variedades acorde a sus períodos de siembra y cosecha en tercios. El primer tercio comprende de noviembre y diciembre, el segundo tercio, enero y febrero, y el tercer tercio marzo y abril. Cada uno de los tercios anteriores aplica para cada uno de los cuatro estratos altitudinales de la zona cañera. La clasificación de las variedades (comerciales y semicomerciales) se ha realizado con base en los siguientes criterios: a) ubicar las variedades con alta incidencia de flor ($>50\%$) en el primer tercio, b) Variedades con incidencia de floración intermedia ($20-50\%$) para el segundo tercio y c) variedades con baja o nula incidencia de floración ($<20\%$) para el tercer tercio. Sobre la base de estos criterios la Agroindustria Azucarera Guatemalteca dispone de una matriz denominada Directorio Varietal, el cual se describe en el capítulo de fitomejoramiento.

Inhibidores de la floración

En Guatemala, la tecnología de control de la floración está enfocada específicamente en el uso del regulador de crecimiento Ethephon. Sin embargo, en países como Brasil y Australia, se han utilizado productos como Sulfumeturon metil y Trinexapac etil como inhibidores de floración. Sulfumeturon metil pertenece al grupo de las Sulfonilureas, el cual no bloquea los promotores del crecimiento, estimula fuertemente la producción de etileno por la acción estresante, no inhibe la elongación celular ni la síntesis proteica y ARN (Castro *et al.*, 1996). Trinexapac etil pertenece al grupo de las ciclohexadionas, es un nuevo regulador de crecimiento, el cual inhibe la formación de AG1, responsable del crecimiento de la planta, después de la aplicación aún existe formación de giberelinas biológicamente activas (Rixón *et al.*, 2007).

Modo de acción del Ethephon: El Ethephon es un regulador de crecimiento con propiedades sistémicas. Este penetra el tejido y se trasloca; se descompone a etileno que es el metabolito activo. El Ethephon se descompone en etileno, fosfato e ión cloro en solución acuosa sobre pH 4-5. Esta reacción domina el destino de los compuestos en sistemas biológicos. En cuanto a la degradación química, el Ethephon es estable en solución acuosa debajo de un pH 4, pero en

cuanto el pH se eleva el compuesto se descompone a etileno, fosfato e ión cloro (Figura 3, esquema 1). La reacción es catalizada por el ión hidroxilo y la tasa se incrementa con el pH. En cuanto al metabolismo en la planta, la absorción, movimiento y metabolismo del Ethephon han sido bien descritas para muchas especies de plantas, reflejando un amplio uso; sin embargo, se ha generado poca información acerca de las vías metabólicas en caña de azúcar. En la Figura 3, esquema 2, se observa un producto conjugado del Ethephon y un metabolito mayor: el ácido hidroxietilfosfónico.

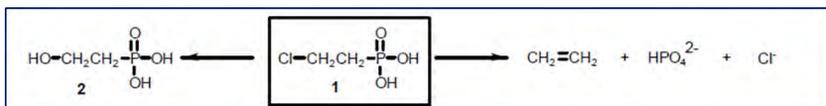


Figura 3. Esquema 1 y 2. Destino de Ethephon en suelo, plantas y animales. Metabolito 2 ha sido encontrado solo en plantas

En la parte práctica se debe tener cuidado al momento de realizar la mezcla con agua, el pH del agua debe estar entre 3.5 y 4 para evitar problemas de reacción de hidrólisis con ello se asegurará la eficacia del producto cuando entre en contacto con el pH de la hoja (pH 7) y este pueda liberar el gas etileno que es el que finalmente actúa produciendo el efecto fisiológico (PGR, 2010).

Efecto de Ethephon en la inhibición de la floración: El Ethephon (ácido 2-cloroetil fosfónico) actúa como un biorregulador que estimula positivamente el desarrollo tisular del tallo, en especial las células del parénquima del tallo, parámetro histológico que repercute de manera favorable en el aumento de la biomasa fresca. Además, como biorregulador del crecimiento, provoca un marcado efecto en el desarrollo del floema, (Marrero *et al.*, 2004). Los reguladores de crecimiento actúan sobre la caña de azúcar modificando o retardando algún aspecto del crecimiento (Alexander, 1973). El Ethephon es un regulador del crecimiento vegetal que actúa liberando etileno en el interior de las plantas. Su uso en el cultivo de la caña de azúcar es como inhibidor de la floración (Coletti *et al.*, 1986). El efecto temporal de la acción del etileno se traduce en un amarillamiento de las hojas 3-4 días posteriores a la aplicación y se mantiene alrededor de 7-10 días según la variedad, desapareciendo pronto. El entrenudo que en ese momento está en formación sufre una reducción de su tamaño, pero es más grueso, dando lugar a un entrenudo “Tipo Barril” que se observa al cabo de 3-4 semanas después de la aplicación, muy parecido al resultado de una fuerte sequía donde también se reduce el tamaño de los entrenudos. Además se observa una alteración (abultada) de las yemas y en la etapa final disminuyen las hojas con tendencia a caerse. Luego de que la planta se recupera del estrés que le produce la aplicación de Ethephon (a partir de los 15 días), continuará su crecimiento normal, y los entrenudos que se formen

también alcanzarán un tamaño normal (Figura 4). El Ethephon debe ser aplicado una a dos semanas antes de la inducción de la floración. La floración depende en gran parte de la edad de la caña, la variedad, la duración del día, las condiciones del medioambiente (disponibilidad de humedad y temperatura) antes y en la fecha de la inducción. Las condiciones son favorables para la inducción cuando el día se hace menor de 12 horas y 30 minutos, cuando la humedad del terreno es suficiente y el promedio de temperatura se mantiene sobre los 18 grados centígrados (Bocanegra, 1993).



Figura 4. Efecto de la aplicación de Ethephon en la variedad CP88-1165, plantía, Finca Santa Marta, Ingenio Madre Tierra, 2009

Método de aplicación: El método de aplicación mediante el uso de helicópteros y avionetas es similar al descrito en el capítulo de madurantes. El volumen de agua en la aplicación oscila entre 18-30 l/ha. La aplicación se realiza con GPS o en algunos casos se utiliza el estaquillado y las banderas como herramientas de señalización para la aplicación aérea.

Dosis de aplicación: Estudios previos en Guatemala han determinado que la dosis necesaria para el control de la floración es de 1.5 l/ha de Ethephon (Ethrel 480 SL), aunque esto puede variar según la variedad y biomasa (Xia, 2000). Algunos otros autores recomiendan evitar dosis excesivas ya que se pueden obtener resultados contraproducentes (Nájera, 2005). De acuerdo con Xia (2000), el uso de dosis entre 1.5 y 2.0 l/ha mostró un efecto negativo al manifestar emergencia de brotes laterales en el tallo (lalas). Desde el punto de vista económico la aplicación del inhibidor de floración (1.5 l/ha) es rentable cuando se obtiene una diferencia de rendimiento mayor a dos toneladas métricas de caña por hectárea.

Periodo inductivo de la floración: En Guatemala debido a la ubicación del cultivo en diferentes estratos altitudinales se complica la definición de este período, y aún mas el momento más adecuado para la aplicación del inhibidor de la floración, aunque algunos ingenios inician en la última semana de julio hasta el 15 de agosto.

Épocas de aplicación: Según estudios realizados por Nájera (2005), en el estrato bajo del ingenio Madre Tierra, quien evaluó la aplicación de Ethephon en seis épocas diferentes, se encontró menor floración cuando el producto se aplicó en agosto. Las épocas de aplicación comercial de inhibidores de la floración se inician en la última semana de julio, de acuerdo con las condiciones climáticas del año, algunos ingenios inician la aplicación en el estrato alto debido a los antecedentes de años anteriores, donde ocurre el mayor porcentaje de floración. La mayoría de ingenios inician en la primera hasta la última semana de agosto, de acuerdo con la disponibilidad de aeronaves. Es de considerar además que si existe algún periodo seco (canícula) no se debe aplicar, ya que se estimula la brotación de yemas inferiores para producir brotes laterales (lals).

Estudio de Ethephon más Dióxido de Silicio 55% (coadyuvante)

Tratando de encontrar opciones para mejorar la eficacia en el uso de Ethephon, se han obtenido efectos sinérgicos importantes al agregar Dióxido de Silicio (55%) a la mezcla del producto. En un estudio llevado a cabo en el 2010, en la finca Santa Marta del ingenio Madre Tierra, se obtuvieron datos de floración de 30 por ciento (sin aplicación), 23 por ciento (1.43 l/ha de Ethrel) y 16 por ciento (1.43 l/ha de Ethrel + 1.4 kg/ha de Dióxido de Silicio (55%)), lo cual confirma el sinergismo de ambos productos en el control de la floración.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexander, A. G. 1973. Sugarcane physiology. A comprehensive Study of the *Saccharum* Source – to – Sink System. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. pp. 523-572.
2. Araldi, R.; Lima, S. F. M.; Orika, O. E.; Domingues, R. J. 2010. Florescimiento em cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 40(3):694-702.
3. Arrivillaga, J. 1988. Floración de la caña de azúcar. *Revista ATAGUA* (Guatemala) 5:7-16.

4. Bakker, H. 1999. Sugar cane cultivation and management. Kluwer academic/Plenum Publishers. New York.
5. Bocanegra, C. J. 1993. Ethrel y Prep en el control de la floración en caña de azúcar. Brasil Rhone Poulenc. 27 p.
6. Berding, N.; Donne, V.; Swain, R. S.; Owens, W. G. 2004. Tropical, managed initiation of sugarcane flowering: optimization of nonphotoperiodic variables. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol, v.26, p.1-12. (CDROM).
7. Brunkhorst, M. J. 2001. A preliminary investigation into the effect of plant nutrient levels on sugarcane flowering. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc. 75, 143–150.
8. Brunkhorst, M. J. 2003. Investigation into the flowering of sugarcane variety N29 grown under different nutrient regimes. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc. 77, 306–312.
9. Castro P. R. C.; Oliveira, D. A.; Panini, E. L. 1996. Ação do sulfometuron- met i l como maturador da cana-de-açúcar. Em *Anais Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB 6*: 363-369.
10. Castro, O. 1998. El fotoperíodo y la intensidad de la luz solar en la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1997-1998. Guatemala, CENGICANÁ. pp. 98-101.
11. Castro, O. 2000. La relación entre horas luz y floración en la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 1999-2000. Guatemala, CENGICANÁ. pp. 97-100.
12. CENGICANÁ. 2010. Análisis del comportamiento de la floración a nivel comercial en la Industria Azucarera de Guatemala. Comité Técnico Asesor. (CTA). Presentación Power Point.
13. Coleti, J. T.; Lorenzetti J. M.; Garla J. H.; Campponez, A. 1986. The inhibition of flowering by Ethephon and its influence on sugarcane quality in Brazil. Proc. XIX Congress ISSCT : 258-262.
14. Gosnell, J.M., 1973. Some factors affecting flowering in sugarcane. Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc. 47, 144–147.
15. Guijarro, J. A. 2007. Cambios en la medida de las horas de insolación: análisis de su impacto en dos observatorios de las Islas Baleares (España). Revista Climatológica Vol. 7 (2007): 27-32.

16. Guzmán, M. 2011. Análisis de la floración, zafra 2010-2011. Ingenio Palo Gordo. Departamento de Agronomía. Presentación Power Point.
17. James, N. I.; J. D. Miller. 1972. Photoperiod control in the USDA sugarcane crossing program. Proceeding of 14th. Congress, ISSCT. Breeding and Genetics. pp. 341-347.
18. Larrahondo, E.; Villegas, F. 2009. Control y características de maduración. Consultado el: 14 julio 2009. Disponible en:
http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p297-313.pdf
19. Marrero, P.; Peralta, H.; Pérez, S.; Borroto, J.; Blanco, M. A. 2004. Efecto de aplicaciones exógenas del ethrel-480 sobre la anatomía del tallo, en cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrida). Caña de Azúcar Vol. 22(2):5-18.
20. Meyer, B. S.; Anderson, D. B.; Bohning, R. H. 1970. Introducción a la fisiología vegetal. 2^a ed. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Argentina.
21. Morales Batista, F. 1996. Fisiología de la reproducción de la caña de azúcar. 16p. En: Curso Regional, Obtención y Selección de Variedades de Caña de Azúcar. Noviembre de 1996, Cuba.
22. Moore, P. H. 1987. Physiology and control of flowering. In: Copersucar International Sugarcane Breeding Workshop, Copersucar Technology Centre, Piracicaba, SP, Brazil, May–June, 1987, pp.101–127.
23. Moore, P. H.; Nuss, K. J. 1987. Flowering and flower synchronization. In: Heinz, D. J (Ed.), Sugarcane Improvement through Breeding. Developments in Crop Science II. Elsevier, New York, pp. 273–311.
24. Nájera E. B. G. 2005. Experiencias en la aplicación del ácido 2-cloroetilo fosforico como inhibidor de la floración en caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Tesis Ingeniero Agrónomo Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 42 p
25. Nuss, K. J.; Berding, N. 1999. Planned recombination in sugarcane breeding: artificial initiation of flowering in sugarcane in sub-tropical and tropical conditions. Proc Int Soc Sug Cane Technol 2: 202-206.
26. Panje, R. R.; Srinivasan, K. 1960. Studies in *Saccharum spontaneum*. A note on the flowering sequence of *Saccharum spontaneum* clones. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 10, 1959, Hawaii. Anais... Amsterdam: Elsevier, 1960. pp. 819-824.

27. PGR. 2010. Ethephon. Consultado el 25 noviembre, 2010. Disponible en: <http://www.rsc.org/pdf/general/17etheph.pdf>. pp. 784-787,
28. Quemé, J. L.; Orozco, H.; Castro, O.; Buc, R.; Ralda, G.; López A.; Acán, J.; Solares, E.; Natareno, E.; Coronado M. 2011. Comportamiento de la floración de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) y sus efectos en otras variables relacionadas con la productividad de azúcar. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2010-2011. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 94-102.
29. Quemé, J. L.; Orozco, H.; López, A.; Azañón V.; Marroquín, J. 2008. Efecto del brillo solar y la temperatura en la floración de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) con fines de establecer programas de cruzamientos en Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2007-2008. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 67-72.
30. Quemé, J. L.; Orozco, H.; Linares, E.; Polo, P. 2003. Comportamiento de la floración de 306 variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en dos cortes evaluadas en dos estratos altitudinales de la zona cañera de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2002-2003. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 60-66.
31. Rixon, C. M.; Di Bella, L. P.; Kingston, G.; Dorahy, K.; Davies, B. y Wood, A.W. 20 MODDUS® A SUGAR ENHANCER. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 29.
32. Soto, G. J. 1999. Floración en caña de azúcar (*Saccharum* spp.) y su relación con rendimientos. Revista Agricultura (Guatemala) 17:21-25.
33. Viveros, V.; Cassalet, C.; López, F. 1991. Efecto de la edad de la planta y diferentes tratamientos fotoinductivos en la floración de la caña de azúcar (*Saccharum* sp.). Acta Agronómica. pp. 37-45
34. Viveros Valens, C. A. 1990. Efecto de la edad de la planta y de varios tratamientos fotoinductivos en la inducción de la floración de la caña de azúcar. CENICAÑA, Colombia. 63p.
35. Wright, J. 2003. Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la heliofanía relativa en Costa Rica. Top. Meteor. Oceanog. 10(1) 20-30.
36. Xia, U. M.U. 2000. Evaluación de tres dosis y seis épocas de aplicación de Ethrel, utilizado como inhibidor en la floración de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el estrato alto del ingenio El Baúl, S.A. Tesis Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 71 p.

XII. LA COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

LA COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

Adlai Meneses*

INTRODUCCIÓN

En Guatemala la cosecha de la caña de azúcar representa cerca del 33 por ciento de los costos de producción del cultivo; por lo que cualquier variación en esta labor afectará significativamente la rentabilidad del cultivo en comparación con otras labores.

En la zafra 2010-2011 en la costa sur de Guatemala se cosecharon 231,000 hectáreas de caña de azúcar, donde se produjeron 19,219,653 toneladas. Actualmente operan 12 ingenios azucareros que administran el 82 por ciento de las tierras cultivadas, con una capacidad de molienda de 135,000 toneladas de caña por día.

Períodos de cosecha (zafra)

La caña de azúcar en Guatemala se cosecha en la época seca (verano), de noviembre a abril, aunque en algunos casos dependiendo de los volúmenes de producción puede extenderse hasta mediados de mayo. En el Cuadro 1 se presenta la duración del período de verano para cada uno de los cuatro estratos altitudinales definidos en la región, donde se observa que este período es variable desde cinco meses en el estrato alto hasta siete meses en las cercanías al mar (litoral).

Cuadro 1. Épocas de verano, asociadas a la altura sobre el nivel del mar

Estrato	Época seca (verano)
Alto (>300 msnm)	15 noviembre - 15 abril
Medio (100-300 msnm)	10 noviembre - 20 abril
Bajo (40 - 100 msnm)	31 octubre - 15 mayo
Litoral (0 - 40 msnm)	25 octubre - 25 mayo

Fuente: Castro, O. 2001.

* Ing. Agr., M.Sc. Coordinador del Programa de Transferencia de Tecnología y Capacitación de CENGICANA. www.cengicana.org

La cosecha o zafra está dividida en tercios, debido a las diferencias en productividad de azúcar en el transcurso de la zafra. El primer tercio comprende los dos primeros meses (noviembre y diciembre), el segundo tercio es en enero y febrero, y el último tercio comprende los meses de marzo y abril (ocasionalmente puede llegar a mediados de mayo).

El primer tercio (noviembre y diciembre) se caracteriza por ser el de mayor productividad en toneladas de azúcar por hectárea “TAH”, dado principalmente por un rendimiento superior de las toneladas de caña de azúcar por hectárea “TCH” de un 9 por ciento en relación con el promedio (período 2007/2008 a 2010/2011) y un buen contenido de azúcar, tal como se puede observar en la Figura 1.

El segundo tercio (enero y febrero) en el periodo 2007/2008 a 2010/2011, se caracteriza por ser el de mayor concentración de azúcar, aunque su productividad en TAH es 4 por ciento inferior al promedio de ese período, y con un rendimiento de TCH 12 por ciento menor al primer tercio; su productividad en TAH es intermedio (Figura 1).

El tercer tercio (marzo y abril) se caracteriza por ser el de menor productividad en TAH; con un 28 por ciento menos TAH en relación con el promedio y un 44 por ciento respecto al primer tercio, para el período 2007/2008 a 2010/2011, esto dado por su rendimiento en TCH y contenidos de azúcar bajos (Figura 1).

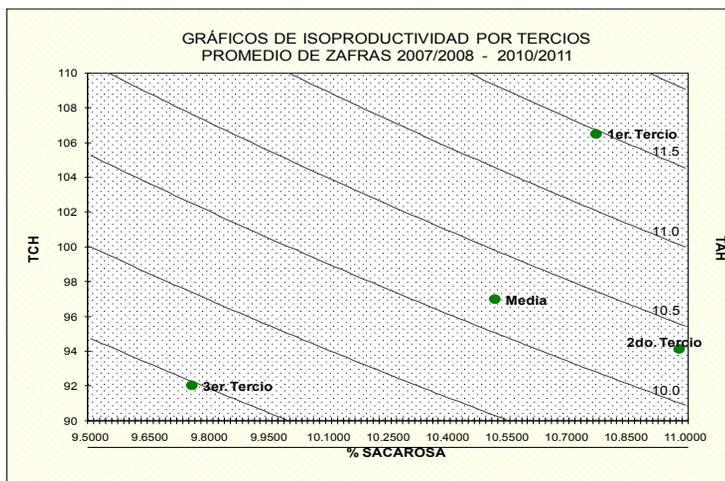


Figura 1. Productividad en toneladas de azúcar por hectárea por tercio. Períodos 2007/2008 a 2010/2011

En general, el porcentaje de caña molida en cada tercio varia; en promedio para las últimas cinco zafras ha sido de 29 por ciento para el primer tercio; 39 por ciento en el segundo y 32 por ciento para el tercer tercio.

Durante la zafra, generalmente se cosecha el 100 por ciento de los campos cultivados con caña de azúcar a una edad de 11.9 meses, con variaciones según el estrato altitudinal tal como se muestra en la Figura 2, de 11.74 a 11.99 meses de edad. La edad de cosecha es un poco mayor en el estrato alto.

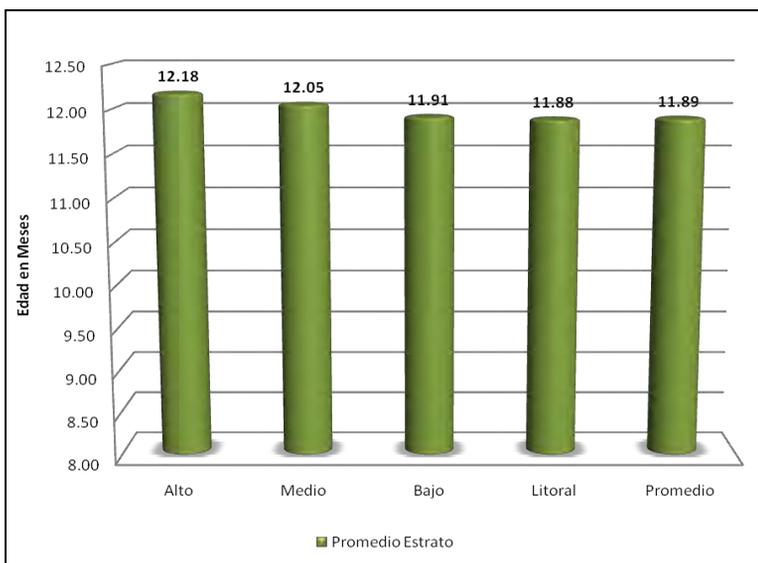


Figura 2. Edad en meses de cosecha por estratos. Períodos 2008/2009 a 2010/2011

SISTEMAS DE COSECHA

El sistema de cosecha de caña de azúcar, en Guatemala, se transformó a partir de 1981, cuando se introduce el sistema de corte de caña con Machete australiano y el alce mecánico, en sustitución del sistema Maletado (cortar la caña, trocearla, cargarla, acomodarla y amarrarla) que tenía eficiencia entre 1 a 1.5 toneladas de caña/hombre día “tchd”. Con el nuevo sistema se simplificó la labor del cortador a cortar, acomodar la chorra y despuntar, la labor de carga y acomodamiento de la caña fue realizada con la alzadora mecánica. Ya en la zafra 1981/1982 la eficiencia del cortador fue de 2.4 tchd; en la zafra 1983/1984, de 4.2, y en la zafra 1989/1990, de 5.35 tchd. Los beneficios de este

nuevo sistema fueron poder proveer a las fábricas con suficiente materia prima (caña de azúcar) durante las 24 horas e incrementar el ingreso de los cortadores (Cabarrús y Madrid, 1983 y Méndez, 1990). A la fecha éste es el sistema que sigue prevaleciendo.

En los ingenios existe una organización similar para la realización de la cosecha y cuentan con la Gerencia o Departamento de Corte, Alce y Transportes (CAT), un organigrama típico de éste se presenta en la Figura 3.

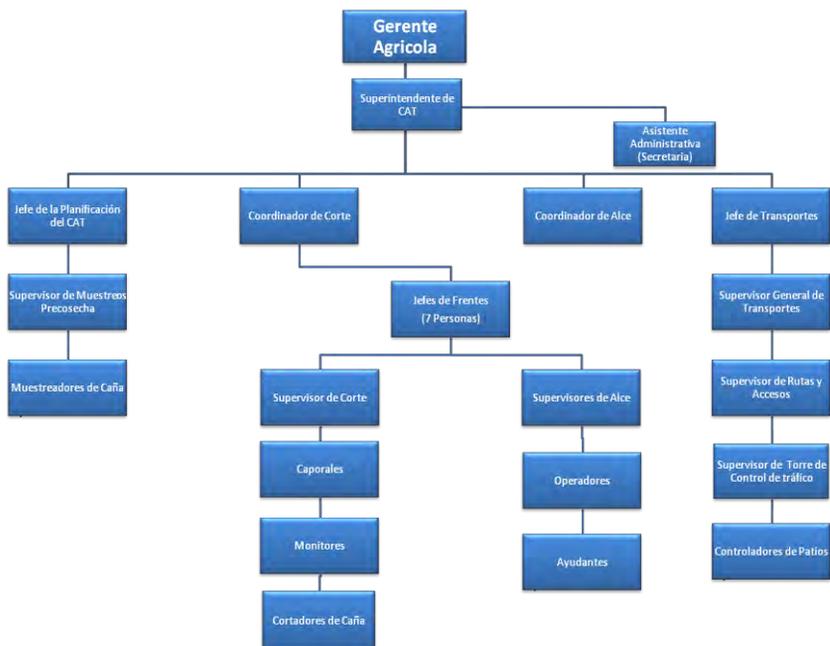


Figura 3. Organigrama típico de la Superintendencia o Gerencia de CAT en un ingenio azucarero de Guatemala

En la zafra 2010/2011 se cosechó el 88 por ciento (16.9 millones de t de caña) en forma manual y el 12 por ciento en forma mecanizada. La cosecha de caña quemada fue del 87.77 por ciento, principalmente de la caña que se cortó en formar manual; de caña verde fue el 12.23 por ciento, en su mayoría con cosecha mecanizada.

Los rendimientos de corte manual para la cosecha verde y quemada, en el período 2004/2005 a 2010-2011, se presentan en la Figura 4. La relación entre el rendimiento de corte con caña quemada, y con verde, va de 1.61:1 en la zafra

2004/2005 a 2.47:1 en la zafra 2009/2010, con valores intermedios en las demás zafras.

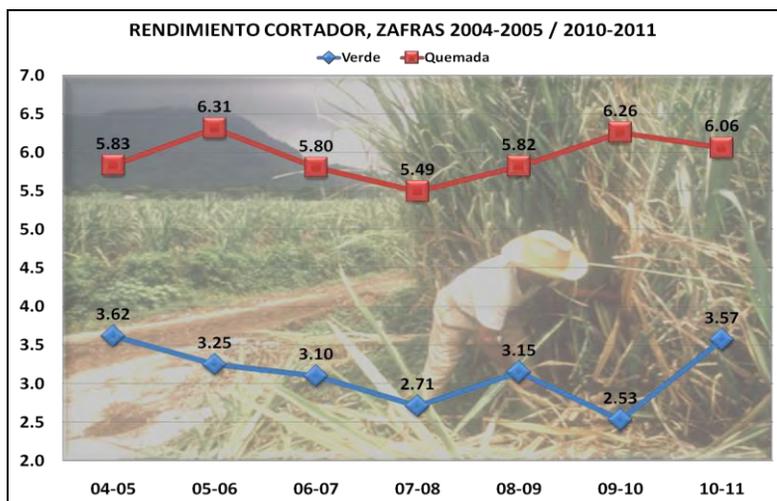


Figura 4. Rendimiento de cortador para cosecha de caña quemada y verde. Período 2004/2005 a 2010/2011

Cosecha manual

En la zafra 2010/2011, el 89 por ciento de la caña se cosechó en forma manual, porcentaje que ha sido similar en los últimos años. Los cortadores provienen de dos grupos; los acampamentados (no locales) que vienen de los departamentos de Quiché, Baja Verapaz y Chiquimula. Estos son atendidos en complejos habitacionales, donde se les proporciona hospedaje, alimentación y otros servicios. El segundo grupo son los voluntarios (locales) que provienen de las poblaciones cercanas a los ingenios, a éstos se les brinda el transporte y bebidas para la hidratación. La proporción entre estos dos grupos varía desde un 50 a 70 por ciento para los acampamentados y el resto de los voluntarios, dependiendo del ingenio.

En las últimas siete zafras el promedio de rendimiento del cortador para caña quemada ha variado de 5.49 a 6.31 tchd y para la verde, de 2.53 a 3.62 toneladas de hombre día (Figura 4).

En el corte manual se utilizan dos modalidades; Chorra continua (Figura 5), la cual se usó en el 85 por ciento de la caña quemada cosechada, en la zafra 2010/2011.



Figura 5. Chorra continua

Según Pappa, 2003, el corte manual con chorra continua presenta como ventajas, mayor eficiencia para el cortador, en tchd; mayor eficiencia en el alce, en toneladas alzadas por hora; mayor eficiencia del transporte, en toneladas transportadas por cabezal; y menor costo por tonelada cortada, alzada y transportada al ingenio.

La segunda modalidad es con la chorra discontinua (Figura 6), con la cual se cosechó el 15 por ciento de la caña quemada en la zafra 2010/2011. La chorra discontinua consiste en minichorras de 1.2 a 1.5 m de largo, separadas entre sí.



Figura 6. Chorra discontinua (minichorras)

Papa, 2003 menciona como ventajas de este sistema de cosecha, menor trash, principalmente en su componente mineral (tierra y piedra); mayor recuperación de azúcar, producto de la disminución del trash; menor desgaste y deterioro de la maquinaria en fábrica, como consecuencia de menor trash mineral y piedras; menor tiempo perdido en fábrica, por no ingresar piedras a la fábrica. Peralta (comunicación verbal), indica como otras ventajas que no se daña la cepa de caña, por no usar el apilador; mayor número de cortes, al tener menor daño de cepas y menor gasto en la resiembra, al prolongarse el ciclo de resiembras (más socas).

Los porcentajes de trash para los dos tipos de cosecha se presentan en la Figura. 7, donde se observa que los valores son similares, posiblemente al analizar los componentes, se logre identificar alguna diferencia.

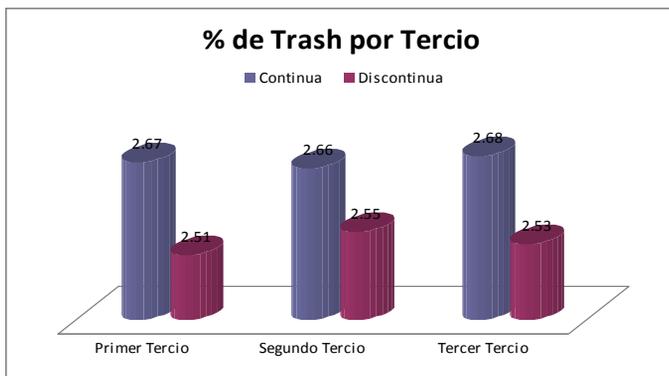


Figura 7. Contenido de trash por tercio con los sistemas de corte manual con chorra continua y discontinua en un mismo ingenio, zafra 2010/2011

Cosecha mecanizada

Este tipo de cosecha en la zafra 2010/2011 se realizó en 30,080 ha, lo que representó un 14 por ciento de la caña cosechada. La mayoría de esta caña fue cosechada en verde (90 %). En la mayoría de los ingenios, la cosecha mecanizada se usa como un apoyo cuando hay falta de cortadores para el corte manual. El porcentaje de cosecha mecanizada por ingenio varía desde el 5 al 33 por ciento. Las eficiencias obtenidas por cosechadora en la zafra 2010/2011 son de 35.36 toneladas de caña/hora cosechadas y de 478 toneladas de caña cosechadas/día.

En la Figura 8 se presenta el área en porcentaje de cosecha mecanizada en el periodo 2000/2001 al 2011/2012.



Figura 8. Área en porcentaje cosechada con cosechadoras mecanizadas. Período 2000/2001 a 2011/2012

PLANIFICACIÓN DE LA COSECHA

En general la planificación de la cosecha en los ingenios considera los siguientes pasos.

- Determinar el período óptimo de la cosecha, que está definido por la edad, maduración de la variedad, ubicación y tipo de suelo.

- Programar la cosecha en bloques de similar manejo. Se hace para optimizar la producción de azúcar.
- Programa de madurantes: Que define la semana de cosecha de los lotes aplicados, tratando que la cosecha se realice entre 7 y 8 semanas después de haber aplicado el madurante (en el caso de Glifosato).
- Calcular la cantidad de caña para molienda diaria: Se hace con base en la capacidad de molienda diaria del ingenio.
- Concentración de azúcar en precorte: Se determina en función del programa de muestreos precosecha que realizan los ingenios.
- Tiempo de entrega de la caña entre la quema y el ingenio. Busca entregar la mayor cantidad de caña antes de 24 horas, para que en la fábrica se disponga de caña fresca.
- Calidad de caña: Se evalúa en función del porcentaje y tipo de trash, tiempo de entrega entre quema y molienda.
- Pérdida de azúcar entre quema y molienda: Definida principalmente por la calidad de caña que campo entrega en báscula.

La planificación de la cosecha debe enfocarse a recuperar la máxima cantidad de azúcar del campo a la báscula, y que la caña que se pone en la báscula sea de una calidad adecuada para facilitar la extracción de la mayor cantidad de azúcar en la fábrica (Romero *et al.*, 2009). En la zafra 2010/2011, los porcentajes de azúcar en precosecha de los diferentes ingenios oscilaron entre 15 y 16.5 por ciento (300 a 330 libras de azúcar por tonelada corta); mientras que en báscula (core sampler) estos porcentajes oscilaron entre 13.30 y 13.80 por ciento (266 a 276 libras de azúcar por tonelada corta) y en promedio para la Agroindustria Azucarera de Guatemala el porcentaje industrial al final de la zafra fue de 10.65 por ciento (213 libras de azúcar por tonelada corta). En la Figura 9 se presentan estos tres valores para un ingenio en la zafra 2010/2011. Se observa en la Figura 9, que solo el 70 por ciento del azúcar formado en el campo, se recupera al final del proceso industrial, lo que representa una valiosa oportunidad de mejora.

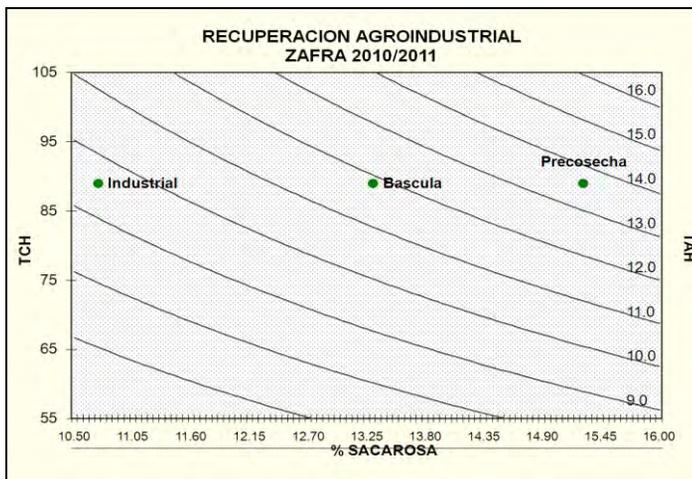


Figura 9. Azúcar en precosecha, báscula e industrial del proceso de recuperación de sacarosa

AGRADECIMIENTO:

A los ingenieros Emilio Catalán y Danilo Peralta, Gerentes de Cosecha de los ingenios Magdalena y Madre Tierra, respectivamente, por la revisión y aportes al artículo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Pappa, J. 2003. Cosecha. En: Diplomado de Ingeniería Cañera, Módulo cosecha. Presentación en Power Point.
2. Giraldo, F. 1995. Cosecha, alce y transporte. En: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Colombia, CENICAÑA. pp. 357-362.
3. Méndez, G. 1990. Corte de la caña de azúcar. ATAGUA (Gua) 4:(9) pp. 24-26.

4. Gil, A.; Álvarez, C. 2010. Pol % Caña, ingenio La Unión, S. A. En: Análisis de resultados Zafra 2009/2010, del área de Fábrica. Presentación en Power Point.
5. Cabarrús, P.; Madrid, G. 1983. Diseño y evaluación de un sistema de corte y alce manual de caña de azúcar. ATAGUA, Boletín No. 8. pp. 1-17.
6. Meneses, A. 2011. Cosecha. En: Memoria XVI Simposio de análisis de la zafra 2010/2011 Área de Campo. Guatemala, CENGICAÑA. Disco compacto.
7. Meneses, A. 2011. Productividad. En Memoria XVI Simposio de análisis de la zafra 2010/2011, Área de Campo. Guatemala, CENGICAÑA. Disco compacto.
8. Castro, O.; Monterroso, H. 2011. La Planificación del uso de la tecnología del riego con base a procesos, zona cañera de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2010-2011. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 215-221.
9. Romero, E.; Scandaliaris, J.; Digonzelli, P.; Tonatto, J.; de Ullivarri, J.; Giardina, J.; Alonso, L.; Casen, S.; Leggio, F. 2009. Cosecha de la caña de azúcar. En: Manual del Cañero. Argentina, EEAOC. pp. 131-143.

XIII. EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE AZÚCAR

EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE AZÚCAR

José Luis Alfaro, Enrique Velásquez, Luis Monterroso y Rodolfo Espinosa *

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala, evolucionó de manera considerable en las últimas décadas, y su rumbo fue marcado por indicadores de predominancia agrícola. En el camino se unieron algunos requerimientos de los mercados y, finalmente, la búsqueda de satisfacer al sector energético y al de los biocombustibles. Desde una perspectiva industrial, es importante mencionar que algunos resultados buscados en el campo, propiciaron en las fábricas de azúcar efectos a resaltar y explican muchos de los resultados finales. Se pudieron observar cambios en las áreas industriales que orientaron la operación vivida en los últimos 30 años. Los principales procesos en donde se dieron dichos cambios fueron: preparación y molienda, energía y recuperación de sacarosa.

En el presente capítulo se abordan los fundamentos teóricos y descriptivos del proceso y subprocesos que intervienen en la fabricación del azúcar; se abarca la producción de las calidades de azúcar que se comercializan en el mercado local y en el mercado de exportación: azúcar crudo, azúcar blanco sulfitado y azúcar refinado. Aparecen también datos estadísticos de la producción y de las ventas del azúcar de la Agroindustria Guatemalteca.

Se presenta una pequeña cronología de los principales impactos de la materia prima en el proceso industrial durante un período de casi 40 años. Posteriormente, una cronología de los cambios orientados al ahorro energético que se realizaron en las fábricas de azúcar para soportar el aumento consistente de molienda y participación en el sector eléctrico guatemalteco.

También se abordan aspectos de la preparación y molienda, como las primeras etapas del proceso de fabricación de azúcar, en las cuales se transforma la caña cosechada en pequeños trozos, de tal forma que las fibras queden expuestas para que la extracción del jugo sea lo más eficiente posible. Estos procesos han evolucionado tecnológicamente, de ahí que se ha reducido el tiempo perdido,

* José Luis Alfaro es Ing. en Electrónica, Jefe del Departamento Eléctrico y Automatización del ingenio La Unión; Enrique Velásquez es Ing. Mecánico, Jefe de Maquinaria del ingenio La Unión www.launion.com.gt; Luis Monterroso es Lic. en Química, Especialista en Estandarización y Normalización de CENGICANA.; Rodolfo Espinosa es Ing. Químico, Ph.D., Coordinador del Programa de Investigación Industrial de CENGICANA. www.cengicana.org

aumentado la capacidad de molienda y mejorado la extracción de sacarosa. Respecto a la preparación y molienda de la caña de azúcar, se hace también una breve cronología de los principales cambios que marcaron el desarrollo de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca.

DATOS ESTADÍSTICOS DE LA PRODUCCIÓN Y LA COMERCIALIZACIÓN DEL AZÚCAR

En la Figura 1 se observa que de la zafra 1984-1985 a la zafra 1996-1997 un incremento de 175 por ciento, de 12 millones de qq (0.55 millones de t), a 33 millones de qq (1.5 millones de t), en un periodo de 12 años. Hasta la zafra 1995-1996 todos los ingenios en Guatemala poseían un único tándem de molinos, el ingenio con mayor capacidad de molienda diaria para ese entonces se encontraba alrededor de las 12,000 t/día. De la zafra 1996 – 1997 a la zafra 2008 – 2009 la producción de azúcar aumentó en un 45 por ciento, de 33 millones de qq (1.5 millones de t) a 48 millones de qq (2.2 millones de t).

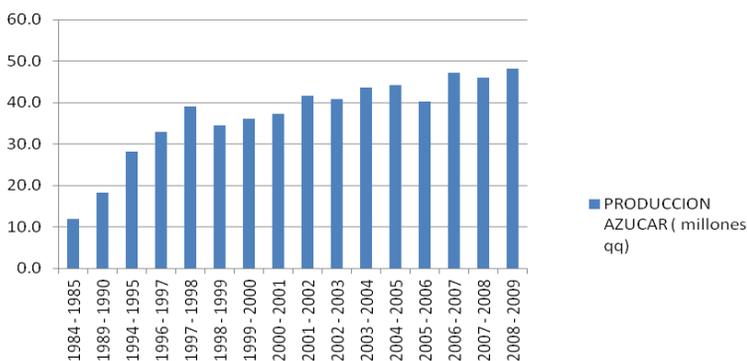


Figura 1. Producción de azúcar por zafra en Guatemala

Fuente: Informe anual de ASAZGUA.

En la Figura 2 en la que aparecen las ventas locales de azúcar y ventas de azúcar para exportaciones, de la Agroindustria Guatemalteca para el período comprendido entre la zafra 1992 – 1993 a la zafra 2008 – 2009, se observa un incremento en las ventas desde un millón de toneladas métricas hasta una cifra superior a los dos millones toneladas métricas (el 100 % de incremento en un

período de 15 años). En el período del total de ventas, en promedio, el 30 por ciento corresponde al mercado local y el 70 por ciento, a las exportaciones.

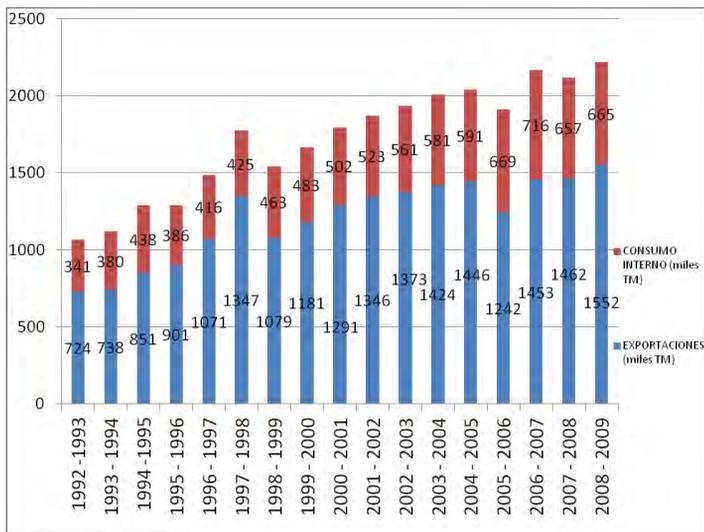


Figura 2. Ventas de azúcar mercado interno y exportaciones de la Agroindustria en Guatemala

Fuente: Informe anual de ASAZGUA.

El incremento en la producción y en las ventas de azúcar es consecuencia del aumento del área cultivada y del aumento en la capacidad instalada en las fábricas. En la zafra 1996-1997 un ingenio inicio por primera vez operaciones con doble tándem de molinos en Guatemala, incrementándose su molienda de caña hasta alrededor de las 18,000 t por día. Para el año 2011, en Guatemala cuatro ingenios operaban con doble tándem de molinos y un ingenio funcionaba con triple tándem de molinos, este último superaba las 30,000 t de caña molida por día, comparable con las dimensiones de ingenios en Brasil y otros países altamente productores de azúcar.

COMPOSICIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Es importante conocer, de forma general, los componentes principales de la caña de azúcar y para algunos de ellos sus características, propiedades y las interacciones las cuales van a tener un efecto significativo durante el desarrollo del proceso y en la calidad de los productos terminados.

En el Cuadro 1 se presentan los rangos del contenido porcentual, para los principales componentes de la caña de azúcar.

Cuadro 1. Promedio de la composición química (%) de los tallos y los jugos de la caña de azúcar

Constituyente químico en los tallos	Porcentaje*
Agua	73 – 76
Sólidos	24 – 27
- Sólidos solubles (brix)	10 – 16
- Fibra (seca)	11 – 16
En sólidos solubles del jugo	
Azúcares	75 – 92
- Sacarosa	70 – 88
- Glucosa	2 – 4
- Fructosa	2 – 4
Sales	
- Inorgánicas	3.0 -3.4
- Orgánicas	1.5 -4.5
Ácidos orgánicos	1.0 - 3.0
Otros no azúcares orgánicos	
- Proteína	0.5 - 0.6
- Almidones	0.001 - 0.050
- Gomas	0.3 - 0.6
- Grasas, ceras, etcétera	0.15 - 0.50
- Compuestos fenólicos	0.10 - 0.80

*En los tallos, el porcentaje se refiere a la planta de caña y en el jugo a los sólidos solubles.

Fuente: Chen, C. P. (1991),

Química de la sacarosa (inversión, pol, pureza y azúcares reductores)

La sacarosa como principal componente de interés en la caña de azúcar, es un disacárido que resulta de la unión química entre dos monosacáridos: glucosa y fructosa (ambos hexosas o azúcares con seis átomos de carbono). En la Figura 3 se muestran las estructuras químicas desarrolladas de los monosacáridos precursores involucrados en la reacción química y el disacárido formado. Esta reacción constituye una biosíntesis que realiza el metabolismo de la caña de azúcar durante su proceso de crecimiento y maduración.

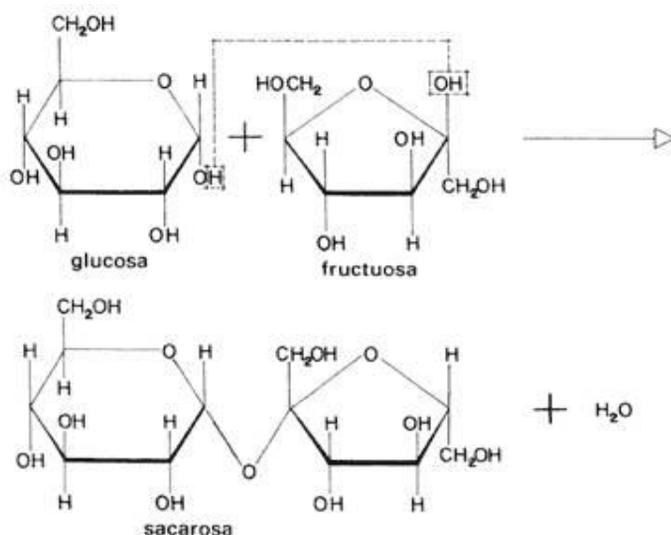


Figura 3. Estructuras desarrolladas y la reacción química entre la glucosa y la fructosa para la formación de sacarosa

Fuente:

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/072/htm/sec_7.htm

Los azúcares tienen actividad óptica, sus soluciones acuosas desvían (hacen rotar) la luz polarizada monocromática debido a la asimetría en varios de sus átomos de carbono (carbonos quirales). La sacarosa tiene actividad óptica acentuadamente dextrógira (desvía o rota la luz polarizada a la derecha). Cuando se separan las unidades de glucosa y fructosa por hidrólisis ácida o hidrólisis enzimática, la mezcla resultante es acentuadamente levógira (desvía o rota la luz polarizada a la izquierda). De tal manera que al hidrolizarse la sacarosa, la actividad óptica de la solución tiende a invertir su rotación, de dextrógira al iniciar la hidrólisis a levógira al finalizar la hidrólisis. Es por este hecho que en el argot azucarero, a la separación de la sacarosa en fructosa y glucosa, se le conoce como inversión de la sacarosa; y a los monosacáridos separados se les conoce como azúcares invertidos, aunque hablando desde un sentido estrictamente químico no es lo más apropiado.

Aprovechando la actividad óptica de la sacarosa, se mide su concentración porcentual aproximada por la técnica analítica conocida como polarimetría. A la concentración de sacarosa en materiales azucarados (jugos, mieles, masas cocidas, bagazo, etc.) determinada por polarimetría se le denomina polarización o "pol". La otra propiedad importante para materiales azucarados es la concentración porcentual de sólidos solubles, esta concentración se toma con cierta aproximación de la medición de los grados brix y se denomina

simplemente como “brix”. El brix puede determinarse haciendo uso de hidrómetros brix (brix hidrométrico) o haciendo uso de refractómetros (brix refractométrico). De la relación porcentual entre pol y brix ($\text{pol} \cdot 100 / \text{brix}$) resulta otra propiedad importante de los materiales azucarados, a la cual se le denomina pureza aparente, pureza polarimétrica o simplemente pureza. A lo largo del desarrollo del presente capítulo, se hará referencia a los términos brix, pol y pureza entendidos en la forma como se exponen en esta sección.

La glucosa y la fructosa se clasifican también como azúcares reductores, esto se atribuye a que su grupo carbonilo está disponible (ya sea que en su estructura abierta y/o que en su estructura ciclada el grupo carbonilo está libre o formando un hemiacetal), esta disponibilidad se refiere a que puede reaccionar y reducir al catión cúprico (Cu^{2+}) hasta cobre en estado de oxidación +I formando óxido cuproso (Cu_2O); en cambio en la sacarosa los grupos carbonilo están bloqueados (los grupos carbonilos están en forma de acetal) y no están disponibles para reaccionar con el ion cúprico (Cu^{2+}). A la reacción entre azúcares reductores y el ion cúprico se le llama ración de Fehling (ver Figura 4). En los materiales azucarados existen muy bajas concentraciones de otros azúcares reductores (que también reaccionan con el reactivo de Fehling) pero su contenido es poco significativo en comparación al contenido de glucosa y fructosa. Para determinar con cierta aproximación el contenido de glucosa y fructosa en materiales azucarados, se aplica por volumetría el método de Fehling. En adelante y de acuerdo al argot del gremio azucarero, al mencionar azúcares reductores o AR, se estará haciendo referencia a la glucosa y a la fructosa.

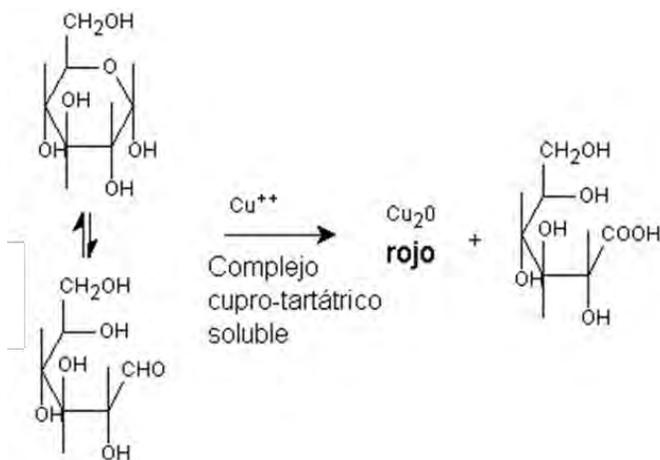


Figura 4. Reacción de Fehling

Los azúcares reductores “AR” no son cristalizables, por lo tanto de los sólidos ingresando a fábrica en el jugo, si la pureza es baja (relación pol/brix) esto es un indicador preliminar de mayor presencia de AR en el material, lo que significa mayor volumen de mieles por manejar, mayor recirculación y consecuente mayor dificultad para hacer efectiva la recuperación de la sacarosa.

Pigmentos y precursores de color

Los pigmentos presentes en la caña de azúcar son atribuibles a fenoles y poli fenoles (flavonoides entre ellos). Como precursores de color también actúan las proteínas cuyos grupos amino primarios (RNH₂) reaccionan con la glucosa (glicación no enzimática), desarrollándose una serie de reacciones complejas (reacción de *Millard*), las cuales generan con el paso del tiempo una coloración con apariencia parda en el cristal y en las masas cocidas de tercera.

Azúcares polimerizados

Los azúcares polimerizados son cadenas más o menos largas, generadas por la unión de varias unidades de monosacáridos. El almidón es un polímero conformado por cadenas rectas a partir de la unión en posición 1-4 de unidades consecutivas de glucosa, es sintetizado por la planta y su contenido va a depender de varios aspectos agronómicos del cultivo; el almidón puede aparecer en el producto terminado y da problemas en aplicaciones industriales, especialmente en las fábricas de bebidas, porque le dan apariencia indeseable a sus productos

Las dextranas son polímeros que afectan negativamente el proceso, están conformados por cadenas rectas de glucosa unidas en posiciones 1-6 que se ramifican por eventuales uniones 1-3. En concentraciones considerables le confieren viscosidad al material, causando problemas en la cristalización, centrifugación y calidad en el producto terminado. Las dextranas no son sintetizadas por la planta, son generadas por acción microbiana después del corte durante todo el proceso agroindustrial. La generación de dextranas se puede prevenir con prácticas que abarcan: menor tiempo entre quema e ingreso de la caña al ingenio, adecuado manejo de la caña en patio, asepsia en los molinos y en puntos críticos del proceso.

RECEPCIÓN Y MANEJO DE LA CAÑA EN PATIO

El proceso industrial inicia con la recepción de la caña, para lo cual intervienen dos subprocesos:

a) Pesaje: en el cual se determina el peso bruto de la unidad de transporte (peso del camión y de las jaulas que contienen la caña) y se le resta el peso de la tara (camión y jaulas vacías).

b) Muestreo y análisis: de acuerdo con el tamaño de los pantes (pante o lote: área de referencia en la cual se subdividen las fincas cañeras, la cual tiene extensión variable que generalmente varía entre 10 y 20 hectáreas), en el programa de básculas se fijan la frecuencia y las unidades que tienen que pasar a muestreo al laboratorio de caña. Las unidades seleccionadas son muestreadas por equipos denominados *Core Sampler* (Figura 7), estos equipos están provistos por una sonda giratoria, la cual posee una punta en forma de corona, dicha sonda puede estar ubicada respecto a la unidad de transporte, en disposición horizontal-transversal o en disposición oblicua-longitudinal. En el laboratorio de caña se hacen los análisis pertinentes a la muestra tomada, con lo cual se determinará la calidad de la caña que está ingresando al ingenio, proveniente de las fincas proveedoras.

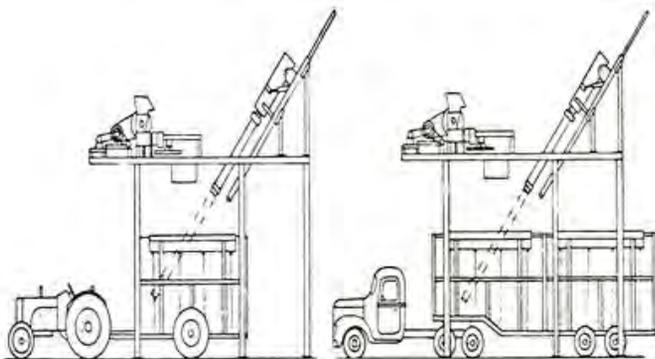


Figura 5. Diagrama de *Core Sampler* con sonda oblicua - longitudinal

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Con los datos de peso y calidad de la caña, así como los datos de rendimiento industrial (libras de azúcar producida / toneladas caña molida) se emite el reporte cañero, en función del cual se paga a los proveedores de caña, para ello se contemplan los premios y/o castigos que apliquen a cada finca.

Posteriormente al pesaje y muestreo de la caña en las unidades de transporte, se inicia el manejo de caña en el patio. El mejoramiento de la logística de cosecha, alce y transporte, así como el mejoramiento en el proceso industrial (menos tiempo perdido y mayor continuidad en el proceso de molienda y

fabricación de azúcar), han hecho evolucionar el manejo de caña en patio, lo que ha contribuido también en un menor deterioro de la caña (menor inversión de la sacarosa), esto debido a que el tiempo entre quema y molienda de la caña ha disminuido significativamente.

Con la implementación de mesas diseñadas para descargar la caña directamente desde las unidades de transporte a dichas mesas, la operación de acumulación de caña tirada en el patio, así como la alimentación a nivel del piso con cargadores frontales, se redujo de manera drástica. En el manejo eficiente del patio de caña, las unidades modernas de transporte jalan dos jaulas cargadas de caña a granel. Las jaulas están provistas de un *manifold* con cadenas sobre las cuales se acomoda la caña en el proceso de cosecha y alce; este *manifold* es levantado por un virador lateral, el cual descarga la caña sobre el juego mesas alimentadoras (Figura 6). Las mesas alimentadoras cuentan con un rodo nivelador para homogeneizar la altura del colchón de caña, la caña se transfiere de las mesas a conductores que a la vez transportan la caña al sistema de preparación (pre cuchillas y picadoras). En la Figura 5 se observa un patio de caña típico de un ingenio azucarero, en el cual aparece una grúa radial, caña tirada en el piso y una mesa alimentadora. En algunos ingenios, aún combinan las operaciones de manejo de caña en patio, la descarga directa a mesas y, en una mínima proporción, la descarga al piso.

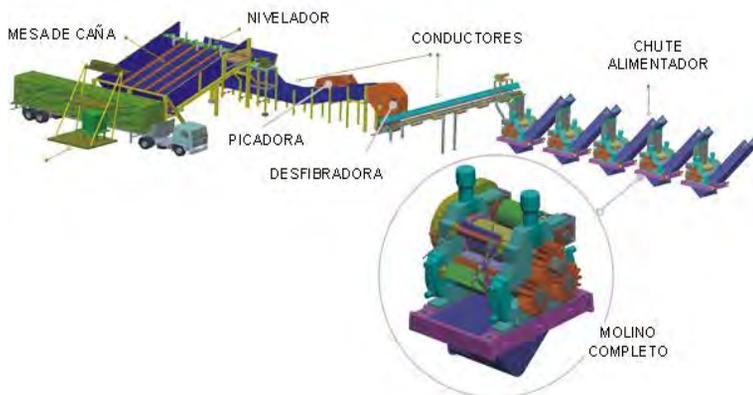


Figura 6. Diagrama de la descarga de caña a mesas alimentadoras, preparación por el sistema de picadora y desfibradora y la extracción por un tándem de cinco molinos provistos de cuarta maza

Fuente: <http://www.fundicionesuniverso.com/azucar.php>



Figura 7. Vista de un patio de caña con operaciones de descarga a mesas y con operación de descarga al piso, al centro una grúa radial

Fuente: <http://actualidaddelperu.blogspot.com/2007/04/per-vender-acciones-en-empresas.html>

Como el proceso de descarga se volvió más eficiente (aumentó la cantidad de unidades de transporte descargadas y liberadas por unidad de tiempo), las colas de unidades para ser descargadas y la cantidad de unidades de transporte utilizadas para mover determinada cantidad de caña a determinada distancia cañales-ingenio disminuyeron significativamente.

Las mesas de caña están provistas con un cabezal, mediante el cual se aplica una cortina de agua caliente sobre la caña, el agua se añade para lavar la caña, eliminar principalmente basura, tierra y arena, que primariamente inciden en el desgaste por abrasión en los equipos. La eliminación de este material es también determinante para la eficiencia en el proceso de clarificación de los jugos y para la eficiencia del proceso de agotamiento de las mieles. Estas impurezas podrían llegar a afectar también el producto terminado, pueden incrementar la aparición de actividad microbiana y la subsecuente generación de viscosidad (formación de dextranas), problemas en la purga en centrífugas, problemas de color y problemas de presencia de partículas extrañas en el azúcar producida.

A pesar de los beneficios de la aplicación de agua para limpiar la caña, el contacto del agua de lavado en las superficies expuestas de la caña produce pérdidas de sacarosa. El procedimiento de limpieza por lavado con agua tiene un significativo impacto ambiental, por generar un caudal de agua portadora de materia sólida en suspensión, lo cual requiere de un sistema de eliminación de

dichos sólidos, con un costo significativo. Por tal razón la tendencia en los últimos años es eliminar el lavado de la caña con agua y se han instalado otros medios y sistemas para limpiar de la caña en seco (vibradores, cortinas de aire, transportadores, disposición de la basura para retornarla a los campos, etcétera).

PREPARACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Descripción general del proceso de preparación

Posterior a la descarga de la caña sigue el proceso de preparación, en éste se transforma la caña en un material más homogéneo y con mayor densidad, con el fin de favorecer la alimentación continua y uniforme de los molinos, mejorar la acción de la imbibición, facilitar la extracción el jugo y reducir las pérdidas de sacarosa en el bagazo. En este proceso se produce un desfibrado, el cual presenta una mayor área expuesta para la adecuada extracción del jugo de las fibras de la caña.

La preparación de la caña se lleva a cabo por la combinación de dos procesos: a) La reducción de la longitud de la caña en trozos pequeños por la acción de cuchillas giratorias (prepicadoras o precuchillas). b) La desintegración del tejido de la caña por la acción de desfibradoras, éstas están provistas de machetes (o martillos) oscilantes sin filo, los cuales golpean los trozos reducidos de caña. Para evaluar el proceso de preparación de la caña, se pueden realizar análisis y mediciones para determinar ya sea el índice de preparación o el porcentaje de celdas abiertas (*open cells*).

Para lograr una adecuada preparación de la caña, se puede disponer de varios arreglos de prepicadoras y picadoras, generalmente se dispone primero de una prepicadora y luego de dos o tres picadoras. Conforme la caña se transporta a través de los elementos de preparación, aumenta la velocidad rotacional de los elementos (rpm), aumenta el número de machetes o cuchillas y disminuye la altura entre el eje y el conductor.

Preparación de la caña de azúcar

En los años noventa se dieron cambios significativos en la preparación de caña. Uno de los más importantes fue la sustitución de las picadoras de machetes fijos por las de tipo oscilante (Swing back), lo que permitió llegar a mejorar los Índices de Preparación a valores cercanos al 81 por ciento. En algunos casos se colocaron al final de las mesas alimentadoras que descargan al conductor principal de caña, picadoras de machetes fijos de

pocos brazos o troceadoras, las cuales permitieron realizar un trabajo previo de preparación, al homogeneizar la caña que cae sobre el conductor principal mejorando su densidad por la disminución de los espacios de aire. Estos equipos propiciaron uniformidad de molienda y menores cargas pulsantes en las picadoras principales.

Durante esa década, se dieron los primeros proyectos de electrificación en la preparación de caña. Los ingenios que se integraron a la cogeneración de energía vieron una oportunidad de mejora en el proceso y debido a los consumos de vapor altos en las turbinas de las picadoras, se sustituyeron por accionamientos con motores eléctricos de mediana tensión o turbinas más eficientes. De esta manera se propició la disminución de las demandas de vapor oscilantes de las turbinas de las picadoras. Estas demandas, en picos altos de vapor, provocaron que las calderas no logaran cubrir las demandas y su consecuencia fueron paros frecuentes en la molienda por baja presión de vapor.

La introducción de alzadoras de caña en el campo y de cosechadoras permitió el alce y el transporte de caña nocturno y con esto la implementación del concepto "Cero caña en patio", lo que buscó evitar el almacenamiento prolongado de caña en el patio con las consecuentes pérdidas elevadas de azúcar por la inversión de sacarosa. Esto originó el inicio del uso de grandes sistemas hidráulicos (malacates) para la descarga de jaulas a granel en las mesas de caña, lo que hizo cambiar el tipo de caña a procesar. Se pasó de ser caña en maleta a caña a granel. Estas operaciones produjeron un nuevo problema a vencer, la basura o trash mineral en las fábricas de azúcar. Se empieza a observar el surgimiento de grandes circuitos de agua específicamente utilizados para el lavado de caña en las mesas y pasan a ser cada vez más importantes dentro de las operaciones en las fábricas. Se instalaron grandes estaciones de bombeo de agua para su aplicación, los consumos energéticos para esta operación se incrementaron y las pérdidas de azúcar eran cuestionadas.

El crecimiento de los ingenios hizo aumentar considerablemente la cantidad de caña a procesar en la mayoría de las fábricas, por lo que fue necesaria la implementación en algunos casos de otra línea en la preparación de caña. Para estas ampliaciones se toman en cuenta las mejoras realizadas en las décadas anteriores. Una de las principales implementaciones en la primera década del presente siglo fue la introducción de la desfibradora horizontal de tipo *Copersucar*, la cual consiste básicamente de un rodo alimentador, desfibrador con martillos oscilantes, el cual hace pasar la caña por una placa ranurada (yunque) disminuyendo el área de salida y así desfibra la caña, con este tipo de desfibrador se han obtenido índices de preparación hasta de 91

por ciento. En este arreglo se instala una picadora oscilante antes del desfibrador con el fin de nivelar la caña. La descarga de caña preparada de este sistema cae a una faja transportadora cuya velocidad permite que se lleve un colchón bajo de caña y facilita colocar un imán para remover metales mezclados con la caña desfibrada. Existen desfibradoras con altas potencias dedicadas a sustituir los arreglos de picadoras en secuencia. Estos equipos requieren altas potencias que llegan hasta 6,000 HP y 850 rpm.

En la década actual, algunos ingenios iniciaron la limpieza en seco, sistema que elimina por completo el uso de agua para lavar la caña. Este consta de un pateador al final de la primera mesa, cuya función es sacudir la caña y hacerla caer para pasar luego sobre una cama de rodillos con discos separados de tal manera que los mismos se entrelazan formando un tamiz. Con este sistema se llega a recolectar una cantidad de *trash* (basura mineral y vegetal) entre 1.6 por ciento y 3 por ciento de la caña molida por día.

MOLIENDA DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Descripción general del proceso de molienda

La caña preparada se alimenta al tándem de molinos, en el cual se verifica la extracción del jugo por la acción mecánica de los molinos y por la acción físicoquímica del proceso de imbibición compuesta.

Los tándem de molinos de los ingenios están dispuestos en arreglos de cuatro mazas: maza cañera, maza superior, maza bagacera y cuarta maza; la inclusión de la cuarta maza en el arreglo de los molinos (Figura 8) integró al sistema el alimentador vertical llamado *donelly*. Estos alimentadores permiten el *bypass* de cualquier molino que necesite reparación. Con la alimentación vertical se forma un colchón de caña desfibrada (en el primer molino) o caña molida (del segundo al último molino) en la caja que lo dirige a la apertura entre la maza superior y la cuarta maza, la medición de la altura de este colchón (conocida como altura o nivel del chute) sirve para controlar la alimentación al molino y la flotación de la maza superior (**flotación**: altura a la que se eleva la maza superior en contraposición a la presión de 3000-3500 psi-g que ejercen los cabezotes hidráulicos), la flotación deberá estar entre 5/8" y 3/4", el control de la alimentación, del nivel del chute y de la flotación de la maza superior se logra variando la velocidad rotacional de dicha maza.

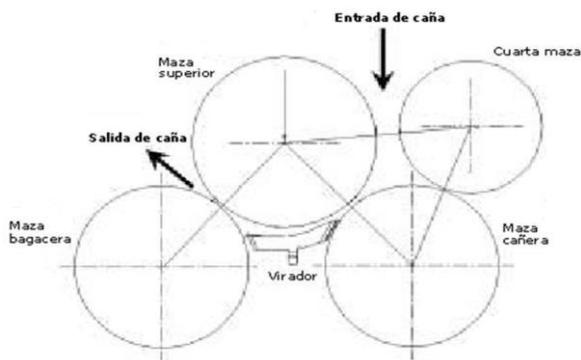


Figura 8. Esquema de la disposición de mazas en un molino con alimentación vertical

Fuente: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702005000300006&script=sci_arttext

En los ingenios que son cogeneradores de energía eléctrica, se han sustituido las turbinas de vapor por motores eléctricos y/o hidráulicos, por ser más eficiente la transformación de la energía del vapor de alta presión en corriente eléctrica en el turbogenerador, para transmitirla por conductores hasta los motores eléctricos; en comparación a la transferencia del vapor desde la caldera hasta la turbina de vapor en el molino.

El proceso de imbibición compuesta (el más utilizado en Guatemala), consiste en aplicar agua caliente $70^{\circ}\text{C} - 75^{\circ}\text{C}$ al bagazo que alimenta al último molino; el jugo extraído en el último molino se aplica al bagazo que alimenta el penúltimo molino y se sigue haciendo una retroaplicación del jugo extraído al bagazo del molino anterior, hasta llegar al segundo molino. El diagrama de la imbibición compuesta se ilustra en la Figura 9.

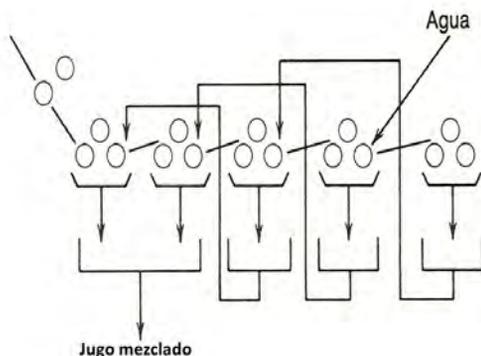


Figura 9. Diagrama de la imbibición compuesta

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Al desfibrado de caña preparada que alimenta el primer molino no se le aplica imbibición, y el jugo que se extrae del primer molino (jugo primario) unido al jugo que se obtiene en la extracción del segundo molino (también llamado jugo secundario donde se unen las retroextracciones provenientes desde el último molino) se denomina jugo mezclado, éste constituye la alimentación de la fábrica (a la cual se le llama también casa de calderas o casa de cocimientos).

Un proceso importante desarrollado en el tándem de molinos es la eliminación en el jugo mezclado de las partículas más gruesas de bagacillo y en general de los sólidos en suspensión de mayor tamaño, para lo cual se usan varios equipos. Uno de ellos es el separador de bagacillo (Fives-Lille) conocido también como “*cush-cush*”, “*pachaquil*” o colador de bagacillo, éste consiste en depósitos rectangulares provistos de una superficie filtrante de malla, sobre la cual pasan cepillos que raspan y mantienen los agujeros filtrantes destapados y conducen estas partículas para retornarlas al sistema de extracción. También pueden operarse coladores de diseño DSM inclinados a 45° o coladores rotativos, con la aplicación de vapor para la limpieza del agujero filtrante.

El bagazo obtenido del último molino, que debe de tener el menor contenido posible de sacarosa (pol menor al 2%) y el menor contenido posible de humedad (humedad menor al 50%), se transporta para alimentar los hornos de las calderas y para almacenarse en cantidad suficiente a la dimensión del ingenio. La cantidad de bagazo almacenado en la bagacera deberá cubrir la demanda de las calderas para paradas no programadas, paradas de mantenimiento programado, liquidaciones de la fábrica (finales o parciales) y arranques.

Proceso de la molienda de la caña de azúcar

La década de los noventa significó para la Industria Azucarera Guatemalteca el despertar a una serie de eventos que marcaron el desarrollo de la molienda. Una de las más relevantes actualizaciones tecnológicas fue la implementación de la cuarta maza en los molinos de caña. Por décadas, la industria se había desarrollado alrededor de molinos de tres mazas. Este cambio permitió soportar un incremento de molienda, mejorar la extracción de jugo del tándem de molinos y aún más, reducir el tiempo perdido por fallas en molinos por la sustitución de los conductores intermedios e introducción del *chute Donelly*. Esta mejora permitió realizar un *baipás* del molino con problemas y continuar la molienda. Con esta implementación se empezaron a eliminar las ranuras utilizadas con anterioridad de tipo *chevron* y *messaerts*. Se introdujo el rayado de 3” en los primeros molinos, así como la maza perforada Lotus que brindó un aumento considerable en la extracción del jugo del primer molino, al eliminar la reabsorción y aumento de la capacidad. En la Figura 10 se muestra el comportamiento del tiempo perdido en molinos promedio en todos los

ingenios consultados CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros). Se puede observar la entrada en operación de las segundas líneas de molinos y la consolidación de tecnologías que se sustituyeron, por lo que las curvas de aprendizaje marcaron las oscilaciones mostradas.

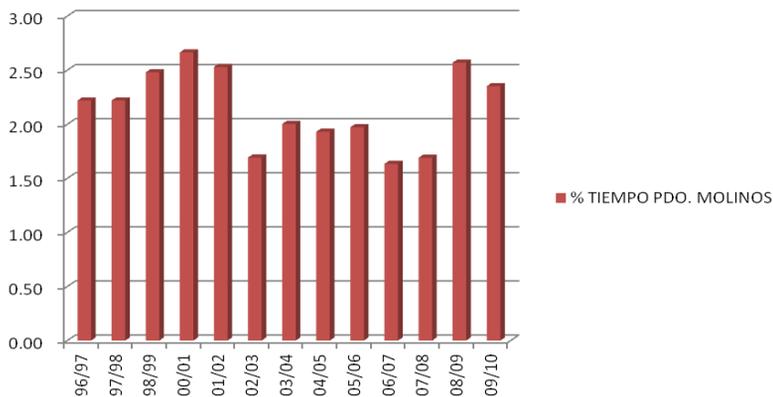


Figura 10. Comportamiento promedio del % tiempo perdido en molinos en los ingenios asesorados por CIASA

Fuente: Reportes anuales CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros, S. A.)

Como resultado de las mejoras en la preparación y molinos, los ingenios pudieron incrementar sus ritmos de molienda a niveles cada vez mayores. En algunos casos se encontraron con las limitaciones de potencia mecánica en los reductores de baja velocidad. Esto propició el inicio de la utilización de motores hidrostáticos de alto torque en mazas cañeras con el objeto de descargar el reductor y permitir el incremento de molienda. Se obtuvieron varias ventajas: independencia de velocidades entre la maza cañera y el resto, un incremento de eficiencia energética en esta operación y el rompimiento del mito que era la utilización de la turbina para mover el molino. El accionamiento hidráulico fue la primera opción a considerar al momento de evaluar la eliminación total de la turbina de vapor en muchos ingenios. Sin embargo, luego de muchas evaluaciones, los motores con velocidad variable con tecnología de corriente directa (DC) y corriente alterna (AC), lograron mayores eficiencias y, finalmente, marcaron un antes y un después en la industria tanto nacional como internacional.

Por el aumento en el volumen de caña para ser procesada, en algunos ingenios fue necesario partir el colador de bagacillo en dos partes y el manejo de la maceración con bombas centrífugas, luego esto cambió radicalmente al instalar bombas intupibles para el manejo de la maceración, dejando las instalaciones

con un colador. Debido a esta mejora, se logró aumentar la cantidad de agua de imbibición a valores cercanos al 35 por ciento peso en caña, y se bajó el pol % bagazo a valores de 1.6. En algunos casos se empezó a cambiar este sistema por colador rotativo el cual brinda varias ventajas, tanto de capacidad, operativas y sanitarias.

El agua de imbibición fue aplicada con mucha estabilidad, su control de manera automática y existieron las prioridades en el suministro de agua. Se aplicó con temperatura y caudal controlados. Las razones de molienda diaria en esta década fueron marcadas por ritmos de 8,500 a 15,000 toneladas de caña por día máxima.

Para la década actual, en algunas instalaciones se incursionó en la colocación de molinos de seis mazas para aumentar su capacidad de molienda. En otros casos por la instalación de un segundo o tercer línea (*tándem*) de molinos, ya con la electrificación en molinos o turbinas eficientes y transmisiones hidrostáticas, el monitoreo y control ya es parte integral del sistema de control distribuido, en el que se logra visualizar la operación y monitoreo de los ítems energéticos como una nueva herramienta para la mejora continua de los procesos.

En la Figura 11 se observa la mejora en la recuperación de sacarosa en los molinos, reflejado en el índice de Pol % en bagazo. Este muestra cómo la Agroindustria Azucarera Guatemalteca ha logrado hasta la fecha una mejora consistente en el tiempo.

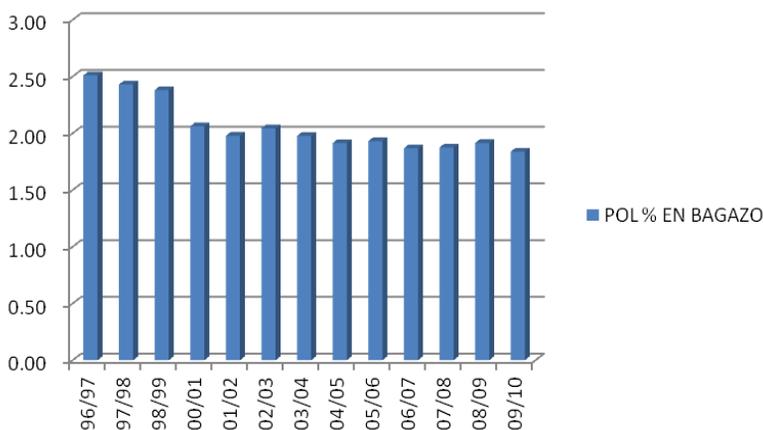


Figura 11. Comportamiento promedio del Pol% en bagazo de los ingenios asesorados por CIASA

Fuente: Reportes anuales CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros)

Empieza a reducirse el interés por los sistemas de potencia asistidos con motores hidráulicos y todos los nuevos proyectos se están electrificando con motores eléctricos AC y sistemas de variación de velocidad en Media Tensión. El uso de las turbinas de vapor ya no es considerado en los nuevos proyectos a la fecha.

Se inicia la utilización de acoplamientos flexibles o convertidores de torque para sustituir el *coupling* de barra o “entre dos”, cuya tecnología ayuda a absorber adecuadamente el desalineamiento, sus beneficios logrados son: mínimo mantenimiento, protección a los reductores y menores pérdidas de energía.

Existe un avanzado control regulatorio que puede influenciar directamente en el ritmo de molienda y cuenta con la capacidad de adaptar los procesos posteriores y anteriores para minimizar pérdidas. Se conoce con mayor detalle niveles de *chutes* de *donellys*, ritmos de molienda, caudal y temperaturas del agua de imbibición y el consumo energético de toda su operación.

Las razones de molienda diaria en esta década fueron marcadas por ritmos alrededor de 15,000 a 30,000 toneladas de caña por día máxima.

GENERACIÓN DE VAPOR Y DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El bagazo (subproducto del proceso) se utiliza como combustible, con el bagazo se alimentan los hogares de los hornos en calderas acuotubulares, para la generación de vapor sobrecalentado de alta presión. Este vapor se utiliza para mover turbinas de vapor en molinos y en turbogeneradores de electricidad. Dependiendo del diseño de las turbinas y turbogeneradores, el vapor de alta presión generado puede ser de entre 200 psig hasta 1500 psig.

Luego de que el vapor de alta presión cede su energía a las turbinas (de molinos y/o turbogeneradores), el vapor de salida o vapor de escape, que tiene una presión de 20-25 psig, es utilizado para los procesos involucrados en la fabricación de azúcar. En la Figura 12 se muestra un diagrama en el cual se ilustra el ciclo de vapor a contrapresión, aplicable a un ingenio azucarero.

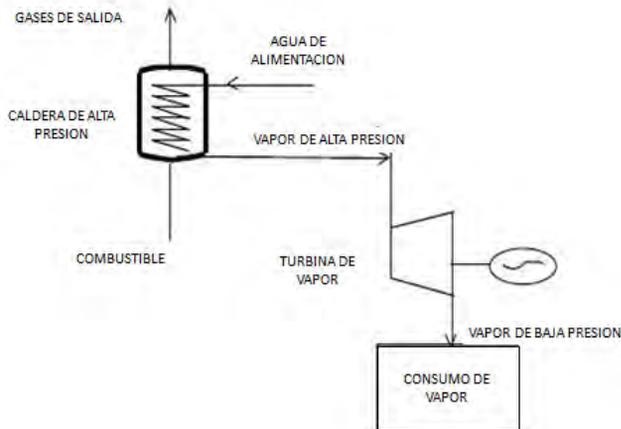


Figura 12. Diagrama del ciclo de generación de vapor a contrapresión

El consumo y producción de vapor de alta presión está en función de cantidad de caña procesada por día, de la cantidad y calidad de azúcar producida, de la demanda de potencia eléctrica, de la cogeneración de energía eléctrica y de la eficiencia de la operación del ingenio. Hugot después de hacer un análisis de ciertas variables implicadas, da un valor genérico de capacidad de calderas requerida, dicha capacidad está alrededor de 637 kg de vapor a producir por tonelada de caña procesada.

Eficiencia energética

Varietades de caña y su impacto industrial: En los inicios de la década de los noventa, la variedad de caña predominante fue la CP57603, con promedios de porcentaje de fibra en caña de 11 por ciento. Esta variedad cambió el panorama, ofreció mejores cantidades de combustible y se lograron niveles de rendimiento del 10 por ciento, similares a los de la década anterior: (200 lb/ton azúcar/caña molida). El balance energético de la fábrica se convirtió en la estrategia operativa diaria a seguir y los ingenios plantearon distintas combinaciones de equipos y procedimientos para obtener el tan ansiado balance. La gran mayoría de ingenios obtuvo ese beneficio con refuerzo tecnológico, excelentes operaciones y pericia técnica de una nueva generación de tecnólogos. Lo anterior apuntaló el despegue de la carrera por alcanzar mayores molineras de caña y mayores producciones de azúcar. *Elementos a resaltar: balance energético, inicio de crecimiento*

en molineras, identificados periodos con excedentes de bagazo, inicio de la tecnificación y apertura del mercado eléctrico.

Para inicios del nuevo milenio, la variedad de caña predominante en la industria fue la CP72-2086. En algunas empresas a finales del siglo pasado, ésta llegó a dominar la matriz de variedades en gran proporción del total de sus áreas cultivadas. Los rendimientos logrados fueron de niveles altamente competitivos con valores promedio de 11–11.5 por ciento (230 lb/ton azúcar /caña molida). Se contó con más y mejor cantidad de información disponible para conocer el comportamiento de su fibra en el transcurso de las zafas. El porcentaje de fibra en caña logrado desde inicios de temporada con 10 por ciento, a mediados de temporada un 12 por ciento, para llegar a alcanzar niveles de 13.5 por ciento a finales de la zafa. En esta década, los excedentes de bagazo comenzaron a ser más predecibles por los técnicos de la operación y se llegó a conocer mejor el comportamiento de los distintos tercios de la zafa. En la Figura 13 se puede observar la tendencia mostrada en el tiempo del porcentaje de fibra industrial en caña, como promedio de todos los ingenios consultados por CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros). Se visualiza las oscilaciones y el impacto en las fábricas de azúcar en base a las descripciones anteriores.

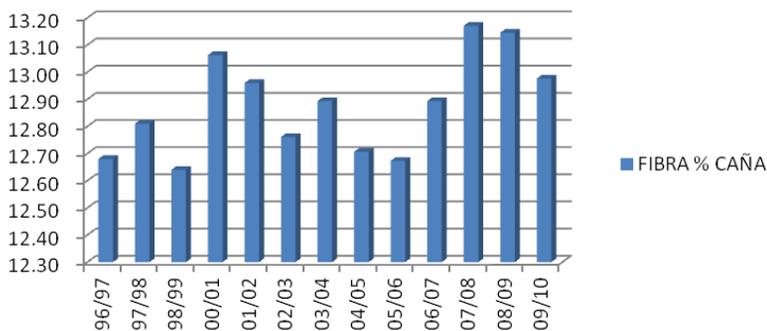


Figura 13. Comportamiento promedio de la fibra industrial % caña de todos los ingenios asesorados

Fuente: Reportes anuales CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros, S.A.)

Evolución energética en las fábricas de azúcar y generación: Como se presentó anteriormente, la materia prima es decisiva para lograr una operación satisfactoria en planta. La recuperación de sacarosa y el balance energético están marcados desde el primer momento en el que se recibe la caña en el patio.

En las fábricas de azúcar el uso de la energía (térmica o eléctrica) es vital para obtener buenos resultados. El vapor es necesario para el cocimiento del jugo de caña, ya que se debe evaporar al menos un 85 por ciento del agua que contiene al salir del molino. Cada uno de los ingenios opera manteniendo un balance energético que le permite moler y procesar una cantidad de sólidos ingresando al proceso, evaporar agua y contar con combustible disponible para utilizarse en el proceso de fabricación.

El uso del vapor en la industria marcó, a lo largo de los últimos 30 años, una línea evolutiva de desarrollo tecnológico. Asimismo, se define como un elemento imprescindible para el procesamiento de la caña de azúcar y por tal razón, la industria tuvo que rediseñar sus instalaciones y realizar mejoras sustanciales que permitieran su competitividad y eficiencia. Las calderas, generadores de energía y electrificación, marcaron la evolución de toda la industria, desde el punto de vista energético. En el transcurso de la historia, se observa cómo se incrementaron presiones y temperaturas de vapor paulatinamente. Esto llevó a la industria de quemar el combustible casi artesanalmente en calderas de herradura de tres a cuatro domos, con presiones extremadamente bajas (100 a 200 psig) junto a muchas turbinas ineficientes. Hasta hoy en día, el uso reciente de calderas con mayores eficiencias y altas presiones (1500 psig o más) con producciones de vapor y generadores de grandes capacidades.

Los sistemas de potencia y generación de energía eléctrica empleados en la década de los noventa estaban configurados por muchas turbinas pequeñas, con capacidades desde 350kW hasta algunos de 850kW, con consumos específicos de 35 a 45 lb/kW. Conforme el crecimiento paulatino se fue dando, se operaron sincronizadamente para soportar la carga eléctrica de las fábricas. Las máquinas eran usadas en buenas condiciones para su operación, sin embargo muchos de sus equipos auxiliares de funcionamiento, protección y mandos, eran sumamente antiguos, algunos de ellos construidos antes de mediados del siglo XX o anterior (1935- 1950). El consumo específico de estas máquinas era demasiado alto, pero eran extremadamente versátiles en su operación. Muchas de las interconexiones de los ingenios hacia la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA) se dieron en las líneas de 13.8kV, principalmente para ayudar en sus arranques y mantener las operaciones durante la época de no zafra.

En la fábrica, los consumos de vapor se dieron principalmente por arreglos de evaporadores en triple y cuádruple efecto. La utilización de vapor directo para muchos usos dentro de la fábrica, fue una práctica normal. El vapor de escape era la principal fuente de energía para todas las operaciones unitarias

de la fábrica. Los consumos de vapor por tonelada de caña superaron los 1,500 a 1,800 lb/TC.

Desde el punto de vista energético, se inició en la primera década del presente siglo, una nueva era para el país junto a la industria azucarera y el sector eléctrico. Se abre el mercado eléctrico en 1994 con algunos contratos privados entre los ingenios y la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA). Para finalmente romper un monopolio existente en la generación eléctrica con una nueva ley de electricidad (Decreto No. 93-96) que permitió el ingreso de generadores privados a la red nacional. De esta manera, un nuevo horizonte hizo que los ingenios adecuaran sus fábricas para cambiar las filosofías de operación existentes, la más importante de ese momento en adelante: *trabajar toda la zafra enlazados a la red nacional interconectada de energía eléctrica.*

En esta etapa, los ingenios buscaron la eficiencia energética dentro de las fábricas de azúcar, los objetivos primordiales fueron: asegurar el excedente de bagazo durante toda la zafra y vender energía por medio del concepto de Cogeneración. Esta nueva definición ligó la venta de energía a la producción de azúcar. Las principales mejoras realizadas en muchos de los ingenios fueron: a) el cambio de turbinas de vapor a motores eléctricos en el accionamiento de picadoras de caña, bombeos y ventiladores de gran tamaño, b) sustitución de turbinas de baja eficiencia y simple etapa por motores eléctricos, c) arreglos de evaporadores de triple y cuádruple efecto a quintuple efecto y el empleo de pre calentadores de jugo alcalizado y de jugo claro, d) utilización de vapores de presiones menores en el cocimiento de las masas y otros muy particulares de cada fábrica.

Todas las mejoras, junto a estos arreglos de ahorro energético dentro de las fábricas de azúcar, permitieron alcanzar excedentes de bagazo sostenibles. Estos excedentes tendieron de manera consistente, a ser cada vez mayores y constantes durante toda la zafra. El manejo del bagazo pasó una vez más a ser complejo, no obstante, se empezó a valorar su disponibilidad como potencial energía para la venta. Como resultado de este aparente problema, se produjo el “despertar” de un mercado secundario de bagazo, donde los ingenios que habían mejorado su eficiencia en consumo de vapor y no tenían capacidad de quemarlo para cogeneración, empezaron a vender sus excedentes y a transportarlos en jaulas hacia otros ingenios que sí podían hacerlo. El bagazo a partir de este período, se identifica en la historia por haber obtenido un valor económico por tonelada. El poder calorífico del bagazo fue, al final, el referente de su precio en un mercado emergente.

Algunos ingenios visualizaron el incentivo creado en el país para promover la generación de energías más baratas, procedieron a instalar calderas modificadas o rediseñadas. La mayoría de estos equipos fueron preparados para trabajar a mayores presiones en instalaciones preexistentes readecuadas o instalaciones nuevas. Esto representó el rompimiento de un mito creado por la idiosincrasia de tecnólogos azucareros: *no se puede operar a más de 200 psig en los ingenios*. El aprendizaje fue complejo, las experiencias fueron de todo tipo y, a la vez, el gremio las acumuló para compartirlas y avanzar en conjunto. La mayor parte de este crecimiento se soportó con equipos generadores usados con capacidades mayores y eficiencias mejores a las de la década anterior. Algunas capacidades típicas que se encontraron en estos proyectos fueron las siguientes: calderas de 400 psig (635°F) o de 600 psig (750°F) y producciones de vapor de alrededor de 125,000 a 150,000 lb/hr. Los generadores adquiridos oscilaban en capacidades de 1.5MW hasta 7.5MW. Los consumos específicos de estas máquinas generadoras se encontraron en rangos típicos de 20 a 30 lb/kWh.

Al final de esta década, empieza a surgir el concepto de planta térmica dentro de los ingenios. Estas instalaciones debieron propiciar la combinación de operaciones de generación y cogeneración. Tuvieron la particularidad de romper otro paradigma: *la operación en época de no zafra con el objeto de vender energía*. Se comenzó a instalar y operar plantas térmicas de generación tipo *condensing*, todas ellas oscilando entre 20 y 35 MW. Se remarca la quema combinada de combustibles, bagazo-petróleo (Bunker C o Fuel Oil No.6) en sus calderas. Las eficiencias de las plantas térmicas debieron mejorarse, ya que el nuevo negocio eléctrico demandó un estricto control de costos operativos. La utilización de petróleo y su impacto financiero hicieron girar la atención de las administraciones para insertar una estructura de gestión desconocida hasta esa fecha. En la Figura 14 se muestra el comportamiento del consumo de petróleo en las distintas zafras, valorable el esfuerzo gremial por la sustitución de combustible fósil por bagazo. Casi la totalidad de este grupo de plantas entró a operar con contratos negociados directamente entre la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA) y cada uno de los ingenios. Estas plantas térmicas surgen con capacidades típicas de caldera entre 250,000 y 325,000 lb/hr, utilizando generadores tipo *condensing* de 20 a 35 MW con consumos específicos en rangos típicos de 9.6 a 10.5 lb/kWh. Todos estos conjuntos interconectados a la red eléctrica nacional por medio de líneas de 69kV y paralelo a lo

anterior, el crecimiento con máquinas de escape para cogeneración con capacidades disponibles de 10 a 20MW con consumos específicos de 16.5 a 18.0 lb/kWh.

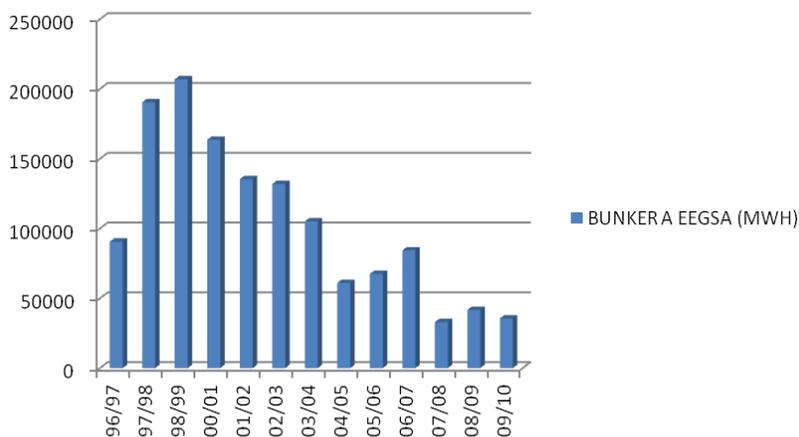


Figura 14. Comportamiento del consumo de búnker (Fuel Oil No.6) de todos los ingenios asesorados

Fuente: Reportes anuales CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros, S.A.)

Como resultado del proceso continuo para incrementar la eficiencia de las operaciones, paulatinamente se incrementó la carga eléctrica dentro de las fábricas. Esto se debió, principalmente, al continuo reemplazo de turbinas de vapor con bajas eficiencias, utilizadas como motores primarios de equipos rotativos en los ingenios. Una de las aplicaciones más remarcadas fue: la electrificación del accionamiento de molinos de caña con velocidad variable por medio del uso de tecnologías de Corriente Directa o Corriente Alterna.

Las operaciones unitarias dentro de las fábricas sufrieron distintos arreglos y mejoras en este período. Entre los principales se pueden enumerar los siguientes: arreglos de quintuple efectos en evaporadores, calentamiento primario con vapor vegetal del segundo efecto (vapor dúplex de 4 psi-g) y calentamiento rectificador con vapor vegetal del primer efecto (10 psi-g). Se instalaron tachos continuos en masas de primera y se implementó el cocimiento en tachos *batch* con vapor vegetal del primer efecto (10 psi-g). La evolución

tecnológica de la instrumentación industrial neumática hasta la tecnología digital dieron continuidad al proceso, optimizar y disponer de mayor información en planta. Los proyectos de largo alcance de automatización de procesos, permitieron obtener respuestas más inmediatas y lograr que las fábricas de azúcar operaran con mayor capacidad de molienda cada zafra. El resultado de esta combinación fue conseguir la disminución del consumo de vapor en fábrica hasta 900 - 850 lb/ton caña o menores.

Década del 2001 a la fecha: Hoy en día, la fabricación de azúcar junto a la cogeneración, conforman una estrategia operativa perfectamente integrada. Las plantas de generación e ingenios suman una capacidad instalada y experiencia suficiente para seguir ampliando las operaciones eléctricas. En este decenio, muchos de los contratos eléctricos están próximos a vencer o ya han vencido. Las nuevas ampliaciones de generación fueron insertadas en bloques de energía al mercado de oportunidades que tiene un dinamismo interesante y retador para el sector eléctrico.

En estos años, las fábricas de azúcar y plantas de generación absorbieron el crecimiento de los ingenios, principalmente en la caña molida y la producción de azúcar. Los altos volúmenes de bagazo se quemaron en las plantas térmicas con excelentes niveles de eficiencia. Las plantas térmicas se adaptaron a las exigencias del mercado, al aumentar capacidades y eficiencias de máquina. Se sustituyeron calderas antiguas por nuevas diseñadas específicamente para bagazo y con mayores presiones de operación. Se adquirieron generadores nuevos de última generación que incrementaron la producción de kWh por cada tonelada de bagazo quemado en las calderas. Los equipos típicos de este decenio son: calderas con producciones de 350,000 a 450,000 lb/hr a presiones de 1500 psig a 950°F, generadores eléctricos tipo *condensing* y de escape o duales de 35 a 60 MW, enlazados a la red nacional de energía eléctrica con líneas de 230kV.

El mejoramiento continuo de la reducción de los consumos de vapor, en las fábricas de azúcar, se desarrolló con la aplicación de nueva tecnología integrada al proceso o configuraciones de base ingenieril insertas para lograrlo. Entre los principales podemos mencionar: tachos continuos para todas las masas, utilización de vapores de primer y segundo efecto en operación de tachos y calentamientos, precalentamientos de jugo y mieles líquido-líquido, etcétera. Todo esto sumado a la integración de operaciones o negocios adicionales al ingenio, como son plantas refineras de azúcar y bioetanol. La Figura 15 muestra el potencial instalado de molienda y procesamiento en las fábricas de todos los ingenios de Guatemala.

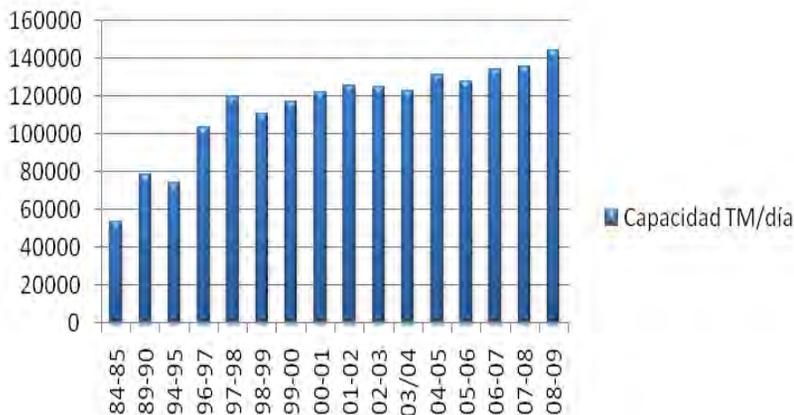


Figura 15. Capacidad instalada por año de toda la industria azucarera de Guatemala

Fuente: Informe anual de ASAZGUA

En la Figura 16 se muestra uno de los indicadores más utilizados en el sector cogenerador (KW/TC total generado con bagazo) para conocer la energía vendida por cada tonelada de caña molida. Se puede observar el consistente crecimiento de ventas de energía y el aumento del aprovechamiento energético de cada tonelada de bagazo empleado en la fábrica.

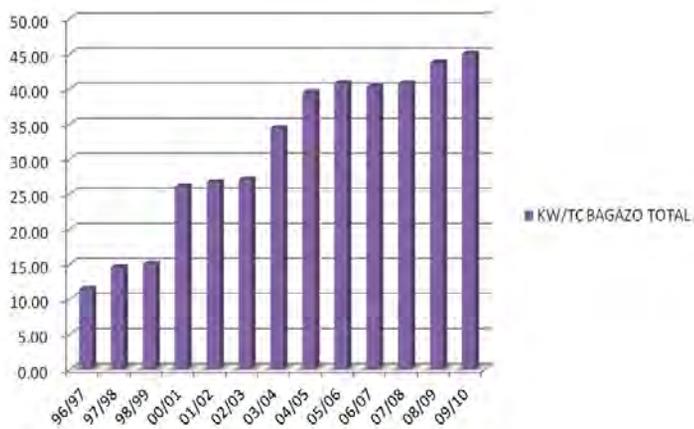


Figura 16. Comportamiento promedio del indicador kW/TC de todos los ingenios asesorados por CIASA

Fuente: Reportes anuales CIASA (Consultores de Ingenios Azucareros, S.A.)

Las grandes conclusiones del tema energético se pueden resumir así:

El crecimiento de la producción de azúcar en Guatemala y los bajos precios en el mercado mundial propiciaron una crisis económica-financiera, que orientaron la búsqueda de un mejor uso de la energía en la producción de azúcar y con ello lograr excedentes de bagazo disponibles para la generación eléctrica.

La oportunidad se presentó con la apertura del mercado eléctrico que permitió a la empresa privada la generación y venta de energía eléctrica.

La Agroindustria Azucarera Guatemalteca se desarrolló con el 13.59 por ciento de sacarosa en caña y un porcentaje de bagazo en caña del orden de 27.73 por ciento. La eficiencia energética siempre será una oportunidad de negocio para la industria.

CLARIFICACIÓN DEL JUGO

El jugo mezclado obtenido del tándem de molinos tiene aún una carga considerable de tierra, arena, bagacillo y otras formas de basura (*trash*) propias de la caña. El proceso de clarificación de jugo consiste en la remoción de impurezas contenidas en el jugo mezclado, para obtener el jugo clarificado con las características para producir la calidad de la azúcar requerida.

Dosificación de ácido fosfórico y sulfitación

Si la calidad de azúcar a producir es blanco sulfitado, es recomendable dosificarle al jugo mezclado ácido fosfórico. Los fosfatos solubles son componentes propios de la caña de azúcar, intervienen en el acondicionamiento de los lodos por la formación de precipitados al reaccionar con el calcio de la cal (óxido de calcio CaO). Se estima que es necesaria una concentración de fosfato alrededor de 300 ppm en el jugo, pero hay variedades de caña con concentraciones de fosfato menores, los jugos de estas cañas se conocen como jugos refractarios por la dificultad que presentan para clarificarlos.

El jugo mezclado se bombea a la torre de sulfitación, en la cual el jugo se pone en contacto en contracorriente con anhídrido sulfuroso (SO₂), gas generado por la combustión de azufre elemental. Los hornos y las tuberías por las que se conduce el anhídrido sulfuroso, son enfriados por chaquetas en las cuales circula agua fría, para evitar la formación de anhídrido sulfúrico (SO₃) y subsecuente generación de ácido sulfúrico (H₂SO₄). En la Figura 17 se muestra un diagrama de un arreglo típico de una torre de sulfitación para jugo, provista de un horno para combustión del azufre y el eyector a vapor para producir el tiro negativo en el sistema por efecto venturi.

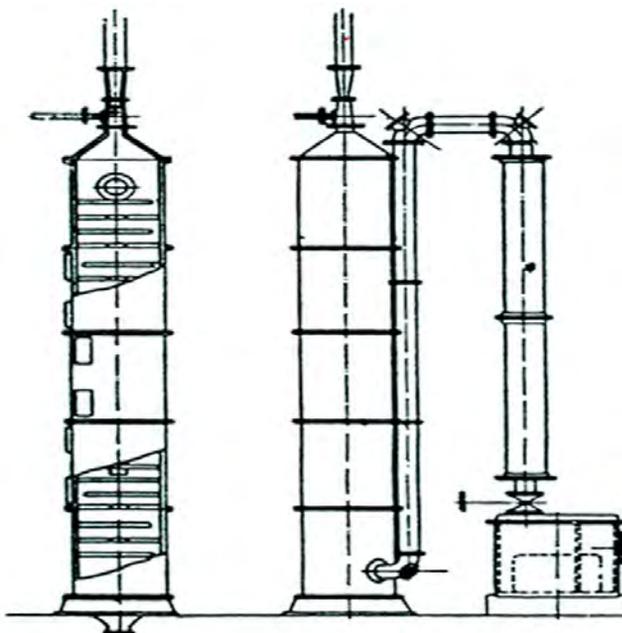


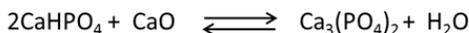
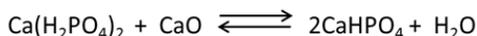
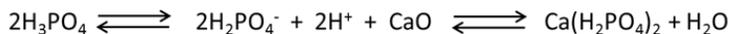
Figura 17. Diagrama torre de sulfitación con horno para combustión de azufre
 Fuente: Hugot, E. 1963. Manual para ingenieros azucareros.

El anhídrido sulfuroso forma ácido sulfuroso (H_2SO_3) por hidrólisis con el jugo. El ácido sulfuroso se disocia en protones (H^+) y el anión sulfito (SO_3^{2-}). El sulfito es una especie química clasificada como agente reductor de mediana potencia; reduce químicamente los pigmentos o colorantes, desactivando los sistemas conjugados, que absorben en forma parcial la radiación electromagnética en la región del espectro visible. También elimina precursores de color. La sulfitación del jugo es imprescindible para obtener menor color en el azúcar blanco final. El criterio que más se maneja es quemar tanto azufre como sea necesario para lograr una caída de 0.5 unidades de pH entre el jugo mezclado proveniente de los molinos y el jugo sulfitado saliendo de la torre de sulfitación. Los consumos de azufre se encuentran alrededor de 0.5-0.8 lb/t (libras por tonelada métrica de caña molida).

Como efectos positivos adicionales de la sulfitación, se ha comprobado que el jugo decanta más rápidamente; que disminuye la viscosidad en la meladura, en las mieles y en las masas cocidas, lo que produce una cocción más rápida de las mismas; se mejora el desarrollo del cristal y el agotamiento de las mieles; se mejora también la purga de la miel en las centrifugas.

El proceso de clarificación

Alcalización: El proceso medular para la clarificación del jugo consiste en la formación de un sólido sedimentable de composición compleja, cuya reacción química base es entre el anión fosfato PO_4^{3-} (contenido en la caña y adicionado en la dosificación de ácido fosfórico) y el catión calcio Ca^{2+} (aportado por la dosificación de cal). Las reacciones químicas involucradas en el proceso se presentan a continuación:



La alcalización del jugo se hace a la salida de la torre de sulfitación. Se puede utilizar lechada de cal (cal como óxido de calcio dispersado en agua hasta obtener una suspensión de aproximadamente 15 grados baumé de densidad), el problema de la lechada de cal es la incrustación y obstrucción frecuente de tuberías y equipos de bombeo. La utilización de sacarato de calcio (mezcla de cal con jugo claro o con meladura), produce una verdadera solución de la cal y evita los problemas de obstrucción de tuberías y equipos, aunque existe alguna pérdida de sacarosa por la recirculación de materiales, los beneficios en calidad de la alcalización y en mantenimiento del equipo son considerables.

El pH del jugo alcalizado se fija entre 6.7-7.2, pero la variable respuesta a controlar es el pH del jugo clarificado. Si el jugo clarificado tiene un pH menor a 6.4, la inversión de sacarosa (hidrólisis ácida con la generación de azúcares reductores) es significativa, lo que afecta la recuperación y la recirculación de mieles (aunque se favorezca la disminución del color en el azúcar envasado). Si el pH del jugo clarificado es mayor a 7.0, la subsecuente generación de color por la caramelización durante el calentamiento en evaporadores y tachos es significativa. La alcalización del jugo mezclado para obtener un pH en el jugo claro en el rango de 6.5-6.9 es lo recomendable. Se debe considerar la calidad del azúcar a producir, si se elabora azúcar blanca este rango de pH es más rígido, si se produce azúcar cruda el pH en el jugo claro puede alcanzar hasta 7.2.

Calentamiento: Colateralmente a la formación de especies fosfatadas insolubles de calcio, el jugo alcalizado debe calentarse a una temperatura levemente por arriba del punto de ebullición del agua (218-220 °F). Al calentarse el jugo a esta temperatura, se le confiere al sistema el calor necesario

para que se verifiquen las reacciones involucradas, también a esta temperatura las proteínas presentes en el jugo se desnaturalizan, dejan de ser solubles y ya no se mantienen en suspensión en el medio. Las proteínas desnaturalizadas pasan a formar parte del sólido insoluble sedimentable. La temperatura por arriba del punto de ebullición del agua es importante también, para un adecuado “flasheo” del jugo en el tanque flash. El *flasheo* (ebullición instantánea del agua) ocurre por la descompresión súbita del jugo al pasar de las tuberías a un tanque con comunicación a la atmósfera (tanque flash); la eliminación de vapor de agua por flasheo previene que se formen burbujas de gases emergentes, que afectan negativamente la sedimentación de las impurezas.

Para las distintas etapas de calentamiento se pueden usar calentadores de concha (carcasa) y tubos o intercambiadores de calor de placas que son más eficientes y más pequeños, en las Figuras 18 y 19 aparecen ilustrados un calentador de concha y tubos y un calentador de placas, respectivamente. En los ingenios suelen encontrarse arreglos de ambos tipos de calentadores para lograr el objetivo de temperatura final en el jugo alcalizado.

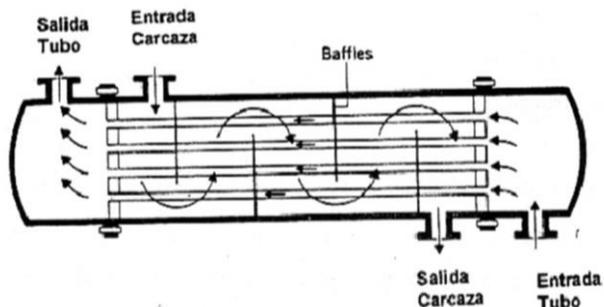


Figura 18. Intercambiador de calor de concha (carcasa) y tubos

Fuente: <http://avibert.blogspot.com/2010/06/patrones-de-flujo-en-intercambiadores.html>



Figura 19. Intercambiador de calor de placas

Fuente: <http://www.wcr-regasketing.com/es/heat-exchangers.htm>

Un aditivo necesario para completar el proceso de clarificación, es la dosificación de floculante o polímero floculador, polímero sintético de cadena larga. Hay de varios tipos, los más usados son las poliacrilamidas aniónicas parcialmente hidrolizadas. El floculante se prepara disolviéndolo en agua y dándole un tiempo de maduración (reposo) antes de dosificarlo, lo que permite que se extiendan las cadenas del polímero. La dosificación del floculante se hace directamente a cada clarificador,

Operación de los clarificadores (decantación del jugo claro y desalajo de la cachaza): El jugo alcalizado caliente se bombea al tanque flash y entra tangencialmente por la pared de dicho tanque, en el tanque flash además de liberar el vapor de agua, el jugo pierde velocidad (lo que va a favorecer la sedimentación de las impurezas insolubles). Del tanque flash el jugo se alimenta por gravedad a los clarificadores. Los clarificadores son equipos para sedimentar los sólidos insolubles y separarlos de la fase líquida, los más usados en Guatemala son los clarificadores tipo Dorr – Oliver. Éstos poseen cuatro compartimientos independientes de fondos cónicos y cada uno con un cabezal para la decantación del jugo clarificado y juegos de bombas de diafragma para extraer los lodos sedimentados. En la Figura 20 se muestra el corte de un clarificador tipo *Dorr - Oliver*. Hay ingenios que ya tienen en operación clarificadores australianos tipo SRI de un único compartimiento, los cuales por diseño, pueden manejar mayor caudal de jugo alcalizado para el proceso de clarificación y con menor tiempo de retención comparado con un clarificador tipo Dorr - Oliver.

Durante el tiempo de retención en el clarificador, los precipitados de especies fosfatadas de calcio en formación se asocian con los sólidos en suspensión que trae el jugo (tierra, bagacillo, basura, etcétera) y con las proteínas desnaturalizadas; esta asociación primaria forma partículas sólidas llamadas floc primario (proceso de floculación primaria). Las partículas de floc primario se asocian en conglomerados más grandes y compactos denominados coágulos (proceso de coagulación). Paralelamente a la coagulación, las cadenas de floculante extendidas empiezan a asociarse con varias partículas de floc primario, generando agregados esponjosos (floculación secundaria) que a la vez se unen a los coágulos formados y en conjunto forman un lodo altamente denso y con alta velocidad de sedimentación, a este lodo se le denomina cachaza.

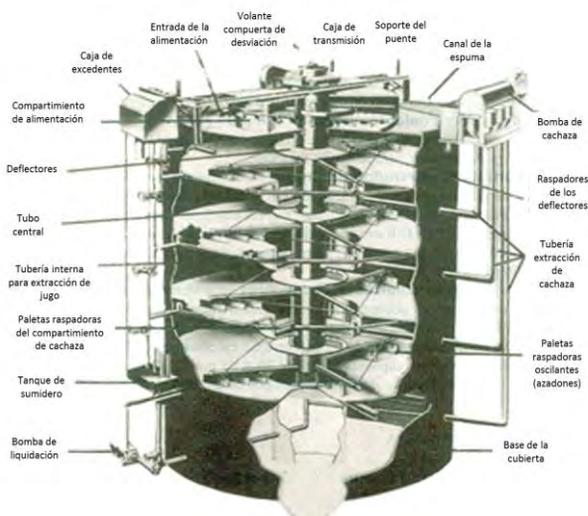


Figura 20. Diagrama de un clarificador tipo *Dorr Oliver*

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

El jugo claro decantado se descarga por gravedad y a través de un cabezal se conduce hasta un set de coladores rotativos. Estos coladores están dotados de telas con tamaño de agujero lo suficientemente pequeño, para eliminar las partículas de bagacillo más finas, las cuales no se eliminan en los coladores de jugo mezclado, ni en el proceso de clarificación. El jugo colado se recolecta en el tanque de jugo claro y desde éste se bombea para alimentar la batería de evaporadores. La calidad del jugo clarificado se evalúa organolépticamente en el cabezal de rebalse en cada compartimiento de todos los clarificadores en operación. El jugo claro debe contener la menor cantidad posible de partículas suspendidas, su color debe ser amarillo y con brillo.

La cachaza sedimentada en el fondo de los compartimientos de los clarificadores es succionada por medio de bombas de diafragma, es descargada desde cada uno de los clarificadores a un tanque, el cual en los ingenios se conoce como tanque cachazón o simplemente cachazón. En este punto la cachaza está lista para iniciar el proceso de manejo y agotamiento de su contenido de sacarosa, para su disposición final como subproducto.

Operación de los filtros rotativos (agotamiento y disposición de la cachaza):

La cachaza desalojada de los clarificadores aún tiene una cantidad considerable de jugo, por lo cual éste debe eliminarse hasta que la cachaza como subproducto, contenga la menor cantidad posible de sacarosa. Dependiendo del sistema y equipos disponibles, ésta puede tener un pol menor a dos por ciento (2%).

Los equipos que se usan para eliminar la sacarosa de la cachaza son los filtros rotativos continuos al vacío. La cachaza sin agotar, la cual tiene consistencia de “slurry”, es bombeada desde el cachazón para alimentar las canoas de cada filtro. La canoa es un depósito o bandeja ubicadas por debajo del tambor del filtro, en ésta se extiende la cachaza sin agotar para que la pared del filtro haga contacto y adhiera a su superficie una capa de cachaza, tiene un sistema de agitación oscilante al cual se le denomina zaranda .

A la cachaza se le adiciona bagacillo, cal y floculante (generalmente en el cachazón) para darle una consistencia que le permita ser cargada (adherida) a la superficie del tambor, que le permita engrosar la capa de cachaza adherida y que le confiera filtrabilidad a la misma. A la torta de cachaza adherida al tambor se le aplica agua caliente por medio de boquillas que forman un chorro cónico, el agua lava la sacarosa de la torta. Los cabezales con vacío succionan el jugo y lo transfieren a los tanques de alto y bajo vacío, al jugo obtenido se le denomina jugo filtrado y se bombea al tanque de jugo alcalizado para reintegrarlo al proceso.

Los filtros descargan la torta final de cachaza agotada, la cual es conducida a una tolva elevada y desde ésta se carga a camiones de volteo, para disponer de la cachaza final como fertilizante en los campos de cultivo. En la Figura 21 se muestra el diagrama de un filtro rotativo al vacío típico.

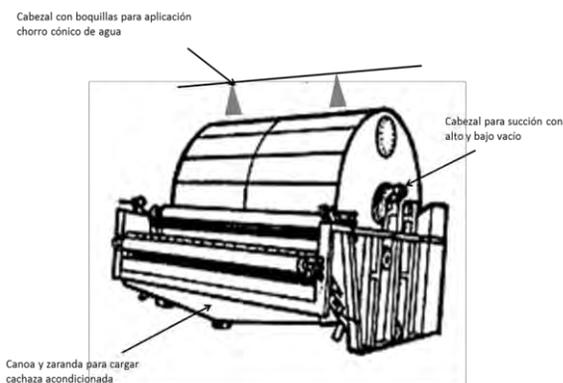


Figura 21. Diagrama de un filtro rotativo para lodos al vacío
Fuente: http://www.proequip.com.mx/todos_completos.html

EVAPORACIÓN DEL JUGO

En el proceso de evaporación el jugo claro se concentra de 15°-18° Brix hasta formar el material denominado meladura de 65°-67° Brix. Para lograr esta concentración, el agua contenida en el jugo se evapora haciéndola hervir

(calentarla hasta el punto de ebullición) en equipos denominados evaporadores (también llamados vasos de evaporación o simplemente vasos), los evaporadores más usados en los ingenios de Guatemala son los evaporadores de calandria de tubos y de película ascendente tipo Roberts. En algunos ingenios se utilizan evaporadores dotados de calandria de placas y de película descendente los cuales son bastante eficientes, pero han presentado el inconveniente de requerir limpieza frecuente con químicos, para mantener su eficiencia y evitar que se obstruya el paso por las placas.

Los evaporadores se disponen en un arreglo para formar un sistema de evaporación de múltiple efecto, basado en el principio de *Rillieux* (enunciado alrededor de 1830 en Luisiana, por el americano de origen francés *Norman Rillieux*). Este principio establece que, el vapor generado por la evaporación del agua, proveniente del jugo calentado en un evaporador o juego de evaporadores, es capaz de calentar y evaporar el agua, del jugo ya concentrado transferido a otro evaporador o juego de evaporadores; para lo cual la presión interna del siguiente evaporador o juego de evaporadores debe ser menor a la presión interna del evaporador o juego de evaporadores precedente, de tal manera que el punto de ebullición del jugo descienda entre ambos sistemas de evaporación. A cada juego de evaporadores que conforman un sistema con determinadas condiciones de presión, temperatura y punto de ebullición se le denomina “efecto de evaporación”.

Si el arreglo de la evaporación es de un cuádruple efecto, el vapor vegetal del tercer efecto calienta la calandria del vaso melador (como melador se conoce al vaso del último efecto donde se obtiene la meladura no clarificada de 64°- 67° Brix), en este arreglo el vaso melador constituye el cuarto efecto. Si el arreglo de la batería de evaporación es de quintuple efecto (Figura 22), entonces el vapor vegetal generado del cuarto efecto, con una presión manométrica de -7.0 psi (14.3” Hg de vacío y 181°F) calienta la calandria del vaso del quinto efecto (vaso melador).

La operación del vaso melador, ya sea que el sistema trabaje en cuádruple o quintuple efecto, es una ebullición a presión reducida, con una presión manométrica de -10.8 psi (22” Hg de vacío y 150°F de temperatura). Para lograr la operación al vacío, se emplea un condensador barométrico, en el cual el caudal de agua fría condensa y arrastra el vapor generado durante ebullición. Los condensadores “*multi jet*” dotados con una caja de toberas, dispuestas y direccionadas para producir un diferencial de presión negativo por efecto “*Venturi*”, requieren de un considerable caudal de agua fría de inyección, con una presión manométrica de alimentación de al menos 10 psi; con estos condensadores se extraen también los gases incondensables del cuerpo del melador, pero tienen el inconveniente de un alto consumo de agua fría. Por los problemas de abastecimiento de agua fría para los ingenios y para disminuir el impacto al medio ambiente, actualmente se utilizan sistemas con condensadores

barométricos dotados de cajas que producen cortinas de agua (condensadores en contracorriente) y adicionalmente se opera una bomba de vacío para extraer los gases incondensables del sistema (Figura 23).

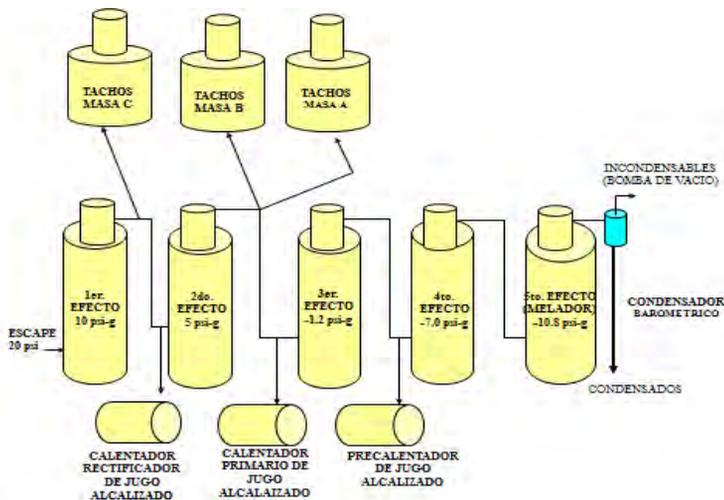


Figura 22. Diagrama de vapor para el arreglo de la evaporación en quintuple efecto con extracciones

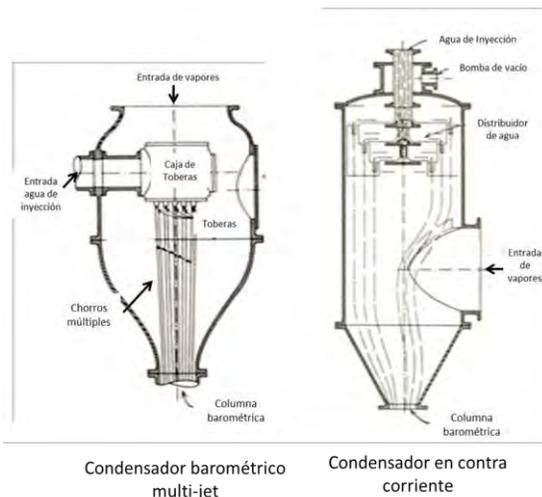


Figura 23. Esquemas de condensadores barométricos tipo multi-jet y tipo contra corriente

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Se observa en la Figura 22, que los vapores vegetales para calentamiento de jugo para el desarrollo de masas cocidas y cualquier otro proceso en la fábrica, son extracciones realizadas de las líneas de los vapores vegetales, de los distintos efectos de la batería de evaporación.

CLARIFICACIÓN DE LA MELADURA

Las impurezas presentes en el jugo claro (color y sólidos suspendidos) se concentran e incrementan durante la evaporación, por lo que si se está produciendo azúcar blanca sulfitada, estas impurezas deben removerse tanto como sea posible, para lo cual interviene el proceso de clarificación de la meladura no clarificada.

La clarificación de la meladura puede realizarse por la combinación de varios sub procesos. En general hay que hacer primero un tratamiento fisicoquímico para acondicionar las impurezas y hacer posible su separación posterior. El tratamiento fisicoquímico consiste en formar conglomerados de partículas sólidas y remover sustancias colorantes. Para formar los conglomerados de partículas sólidas se dosifica ácido fosfórico, floculante y cal (como lechada o como sacarato de calcio). Para remover sustancias colorantes se puede dosificar agua sulfitada o productos químicos comerciales para esta función (decolorantes). Posteriormente a la dosificación de los químicos y la homogenización, se calienta la meladura de 145°-150° F (temperatura a la que sale del vaso melador) hasta 175°-180° F. En la Figura 24 aparece un diagrama genérico del proceso para la clarificación de la meladura.

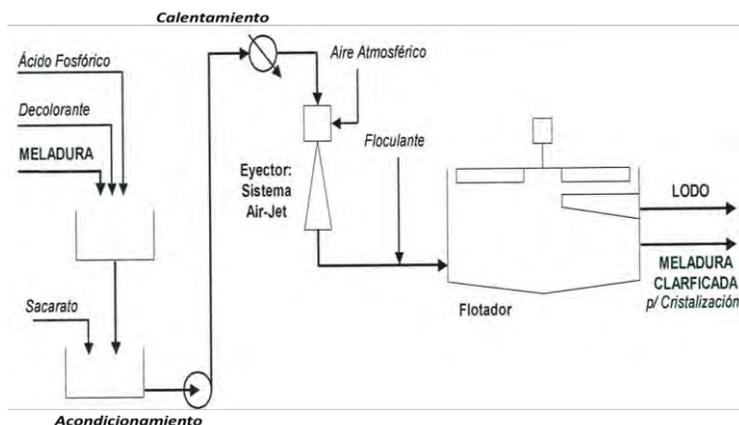


Figura 24. Diagrama proceso para clarificación de meladura

Fuente: www.engenovo.com.br/es/artigostecnicos/fxc.pdf

A la meladura se le inyectan pequeñas burbujas de aire que al ascender arrastran los floculos de impurezas (lodos), formándose una espuma que flota en la superficie de la meladura contenida en los clarificadores.

Los clarificadores de meladura tipo Jacob son rectangulares y los clarificadores de meladura tipo Talo son circulares. Ambos están dotados de un sistema de paletas que remueven la espuma de la superficie y la descargan a un canal y este canal retorna por gravedad la espuma al tanque de jugo alcalizado. Los clarificadores tipo Talo son de diseño más reciente y por consiguiente son más eficientes que los clarificadores tipo Jacob. La meladura clarificada se decanta por un cabezal a un tanque y es bombeada a los tanques respectivos en el área de tachos.

DESARROLLO DEL CRISTAL Y AGOTAMIENTO DE LAS MIELES

A partir de la meladura clarificada, se verifican dos procesos interrelacionados y paralelos, por un lado el desarrollo o crecimiento del cristal de sacarosa y por otro el agotamiento de las mieles (agotamiento de una miel significa la disminución de su pureza aparente). Los cristales de sacarosa crecen (se desarrollan) porque las moléculas de sacarosa contenidas en la miel y que se encuentra en solución, logran integrarse a la estructura o red del cristal, de tal manera que en la medida que los cristales de sacarosa crecen, disminuye la pureza de la miel (agotamiento).

A continuación se definen algunos términos, para ser utilizados y entendidos a lo largo del desarrollo de esta sección.

Masa cocida: Material en el que se encuentran mezclados la miel agotada a una pureza determinada y los cristales desarrollados a un tamaño establecido, al finalizar su proceso de cocción y alcanzar su densidad final (punto, apriete o Brix de la masa cocida). La cocción de la masa se realiza por la eliminación de agua mediante el proceso de ebullición a presión reducida (al vacío) en un equipo llamado tacho.

Templa: Masa cocida que fue llevada a su punto final de cocimiento y fue descargada de un tacho discontinuo o de *batch*. Es propio hablar de “templa” al referirse al material contenido en el tacho o que se encuentra en proceso de descarga. Pero en el momento que se une al total de masa cocida que se encuentra en un mezclador, a la espera de ser purgada en una centrifuga, no es propio referirse a este material genérico como templa, lo propio y acostumbrado es llamar a este material como masa cocida o masa.

Punto de saturación de una solución de sacarosa: Se refiere a la concentración máxima de sacarosa que puede ser mantenida en solución por el agua, en determinadas condiciones de temperatura y de presión. En este punto están en equilibrio (son iguales) la velocidad de disolución de las moléculas de sacarosa (moléculas de sacarosa que se disuelven por unidad de tiempo) y la velocidad de cristalización de moléculas de sacarosa (moléculas de sacarosa que pasan a formar parte de la red del cristal por unidad de tiempo). Si se sobrepasa la concentración máxima de sacarosa en las condiciones dadas, se llega a un punto de sobresaturación, condición en la cual el equilibrio es inestable. Para restablecerse el equilibrio en una solución sobre saturada, pueden suceder dos cosas: o aumenta la cantidad de moléculas que pasan a integrar la red del cristal y por consiguiente aumenta el tamaño del cristal; o surge espontáneamente un nuevo cristal o núcleo de cristalización. El coeficiente de sobresaturación SS es igual a uno (1.0) cuando el sistema se encuentra en el punto de saturación, si es mayor a uno el sistema se encuentra sobresaturado y si es menor a uno el sistema se encuentra insaturado.

Semilla: “*Slurry*” o suspensión formada por la molienda y dispersión de granos de azúcar en alcohol iso-propílico. Hay equipos específicos para preparar la semilla, que garantizan un 95 por ciento de la población de cristales con 10 μ m de tamaño máximo. Los mejores equipos son los que logran obtener una semilla con menor variabilidad en la población de cristales.

Tacho al vacío: Equipo diseñado para desarrollar el tamaño del cristal de sacarosa, por la eliminación de agua mediante la ebullición del material que contiene a presión reducida. Al hervir las mieles se concentran y se produce la migración de las moléculas de sacarosa en solución a la red del cristal en crecimiento (cristalización de la sacarosa). Los tachos más utilizados en los ingenios de Guatemala, son tachos de calandria fija. Al igual que el vaso melador, el vacío se forma por la operación combinada de un condensador barométrico (de contracorriente) y una bomba de vacío. Los tachos se operan a una presión manométrica de -12.8 psi (26 “Hg de vacío), 1.9 psi absolutas (125 °F de temperatura). La mayoría de los tachos están provistos de un agitador mecánico, pero pueden estar provistos de distribuidores para la alimentación de meladura, diseñados para favorecer la agitación natural (por gradientes de densidad). En la Figura 25 se muestra el esquema de un tacho típico de calandria fija.

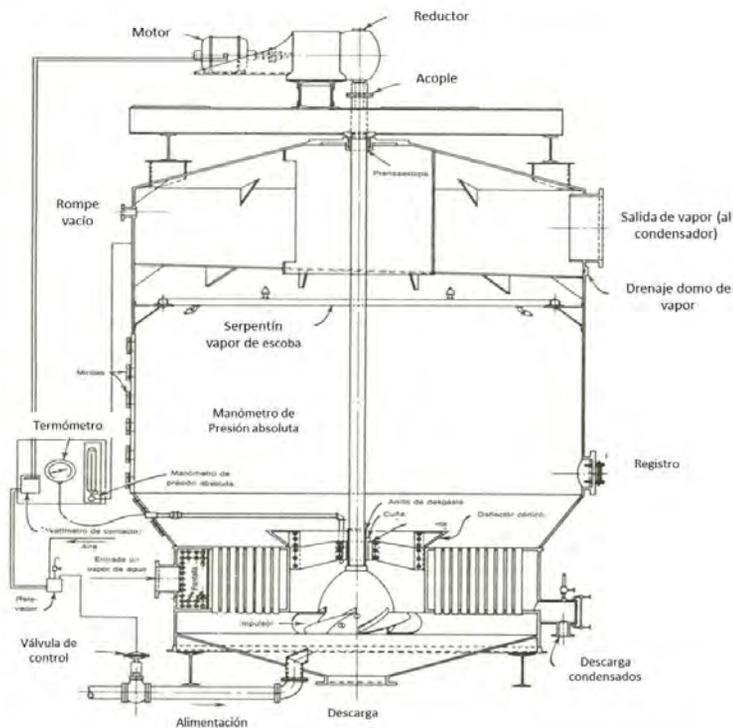


Figura 25. Diagrama de un tacho con calandria de tubos y agitador mecánico

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Purga: Separación de los cristales y la miel de una masa cocida, durante la operación de una centrífuga.

Centrífuga: Equipo diseñado para separar los cristales de sacarosa y la miel, mezclados en la masa cocida, dicho equipo está provisto de una canasta horadada, en cuyas paredes se encuentran fijadas telas filtrantes, con cierto tamaño de apertura de agujero y determinada área abierta. La masa cocida se alimenta a la canasta y la fuerza centrífuga hace salir la miel por los agujeros de las telas y de la canasta, los cristales de sacarosa son retenidos en las telas, posteriormente son descargados y conducidos por sistemas de transporte para su disposición y acondicionamiento. Hay dos tipos de centrífugas:

Centrífugas continuas: Conocidas así por su alimentación y operación continua, constan de una canasta cónica invertida, la alimentación es en el

fondo (vértice del cono), el azúcar asciende por las paredes hasta el borde superior y la miel se recolecta en la pared interna de la cubierta o carcasa. En la Figura 26 se muestra el diagrama de una centrífuga continua típica.

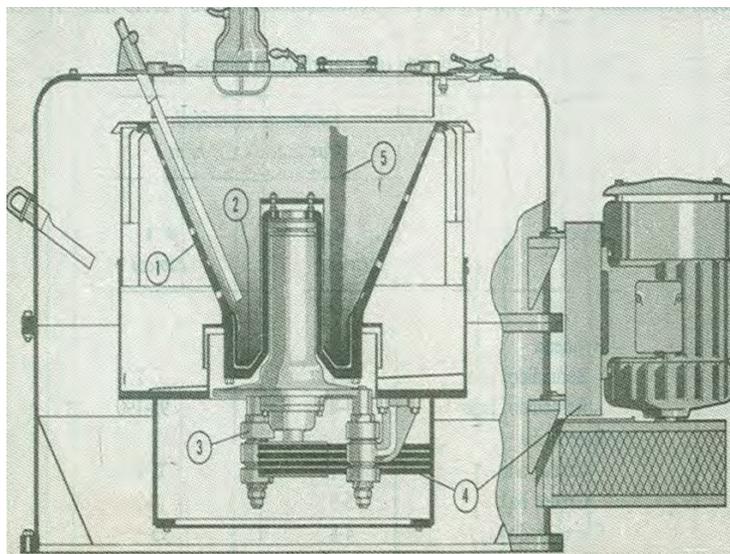


Figura 26. Diagrama de una centrífuga continua y sus partes principales: 1) Canasta en acero inoxidable. 2) Recipiente (taza) para carga. 3) Soporte con amortiguador de hule. 4) Motor. 5) Alimentación lateral de masa cocida

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Centrífugas de “batch” o automáticas: Conocidas así por su operación discontinua cargando lotes o “*batches*” de masa cocida. Están dotadas de canastas cilíndricas horadadas, las cuales están dotadas con un juego de telas y contra telas con determinada apretura de agujero y determinado porcentaje de área abierta. La miel atraviesa los agujeros de telas, contra telas y canasta, siendo recolectada en el compartimiento de la carcasa. Un ciclo completo de purga se hace con movimientos automáticos, estos se pueden controlar mediante contadores de tiempo o “*timers*”, interruptores o “*switches*” de contacto y cableado eléctrico para ejecutar todos los mandos. Recientemente se han incorporado a los equipos controladores electrónicos programables PLC y el uso de interruptores de proximidad o “*proximity switches*” (Figura 27).

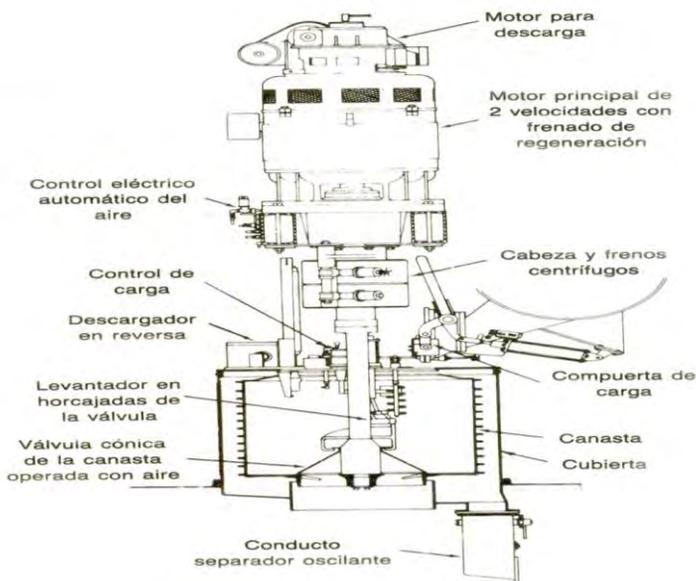


Figura 27. Diagrama de una centrífuga automática y sus partes principales

Fuente: Chen, J. C. P. 1991. Manual del azúcar de caña.

Magma: Material con consistencia de *slurry*, se obtiene al acondicionar el azúcar proveniente de la purga de la masa B o de la masa C, el azúcar se acondiciona para poder ser manejado y alimentado a los tachos como núcleos para el desarrollo de los cristales o para poder ser disuelto y bombeado a los tanques de meladura.

Cristalización

El proceso de cristalización consiste en iniciar el desarrollo de los cristales de sacarosa. El método más usado es por semillamiento, en este procedimiento la solución azucarada de pureza definida se concentra en el tacho operado a un vacío de alrededor de 24 “ Hg, llevando la concentración de la misma hasta alcanzar un coeficiente de sobresaturación (SS) de entre 1.00 y 1.25. A la región comprendida en este rango de sobresaturación se le conoce como zona metaestable, correspondiente a unos 80°-81° Brix, su característica principal es que en esta zona los cristales crecen de tamaño, pero no aparecen espontáneamente nuevos núcleos de cristalización o cristales nuevos. En este punto se agrega una cantidad determinada de semilla y se mantiene el régimen de evaporación agregando agua caliente, lo que permite apartar la viscosidad alrededor de los cristales

y permite que se definan las caras del cristal (aclaramiento o seba). Cuando el grano está adecuadamente definido, se fija el vacío del tacho a 26 “Hg y se inicia la alimentación con solución de material azucarado, es decir, meladura o miel.

Es importante no concentrar la solución azucarada hasta llegar a la zona “lábil” de sobresaturación (región con un SS mayor a 1.40), en esta región aparecen espontáneamente cristales de sacarosa, estos cristales llamados también falso grano, son más pequeños que la semilla introducida al sistema, estos cristales causan la conglomeración de varios cristales y producen una población de cristales con demasiada variación en su tamaño.

Sistema de tres masas y doble magma para desarrollo del cristal y agotamiento de las mieles: El sistema base y más utilizado para los procesos del desarrollo del cristal y del agotamiento de las mieles, es el de tres masas y doble magma. En la Figura 28 se encuentra el diagrama simplificado para ilustrar el sistema de las tres masas (masa A, masa B y masa C) y doble magma (magma B y magma C).

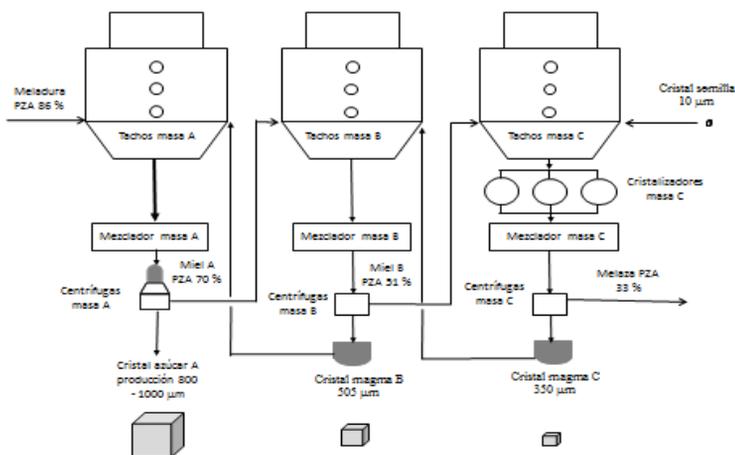


Figura 28. Diagrama del sistema de tres masas y doble magma

Primero se enfoca el desarrollo del cristal. Se cristaliza para el desarrollo de masa tercera partiendo con la semilla cuyos cristales (núcleos de cristalización inicial) tienen un tamaño de 10 µm. El cristalizado se alimenta en el tacho con miel A y miel B hasta obtener la masa C. La masa C se descarga de los tachos a un sistema de “cristalizadores”, depósitos en

los cuales continua el proceso de cristalización por enfriamiento. De los cristalizadores la masa C se conduce a un mezclador y se purga en centrifugas continuas, obteniéndose azúcar C con un tamaño de grano de 350 μm y miel final o melaza con una pureza aparente de 33 por ciento. Con el azúcar C se prepara magma C y dicha magma se carga en tachos para el desarrollo de la masa B.

El magma C con el cual se cargan los tachos contiene los núcleos de cristalización, los tachos se alimentan con miel A hasta desarrollar la masa B, la cual se descarga para ser purgada en centrifugas continuas, obteniéndose azúcar B con un tamaño de grano de 505 μm y miel B con una pureza aparente de 51 por ciento. Con el azúcar B se prepara magma B y dicha magma se carga en tachos para el desarrollo de la masa A.

El magma B con el que se cargan los tachos contiene los núcleos de cristalización; los tachos se alimentan con meladura con una pureza aparente de 86-88 por ciento hasta desarrollar la masa A, la cual se descarga para ser purgada en centrífugas automáticas (batch), obteniéndose azúcar A (producto terminado) con un tamaño de grano de entre 800-1000 μm y miel A con una pureza aparente de 70 por ciento. El tamaño del cristal del azúcar A puede variar en función de la calidad deseada del azúcar a producir: crudo normal, crudo granulado “free flowing”, blanco estándar, etc.

En la Figura 29 se sintetiza el esquema de los procesos paralelos interrelacionados, en los cuales se observa que en un sentido se agota la pureza del material azucarado y en el sentido opuesto se desarrolla el tamaño del cristal.

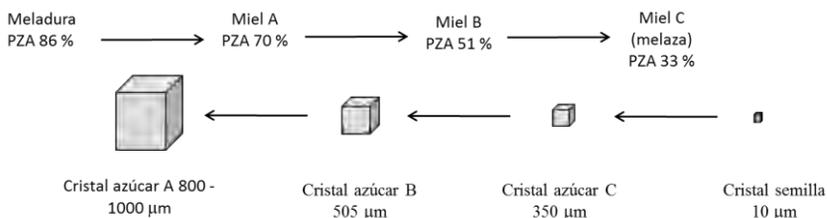


Figura 29. Esquema ilustrativo del desarrollo del cristal y el agotamiento de las mieles en un sistema de tres masas y doble magma.
NOTA: PZA = pureza aparente

PRODUCCIÓN DE AZÚCAR REFINADO

En las refinерías que iniciaron su operación en Guatemala en los años noventa, por estar integradas a un ingenio de azúcar de caña, el proceso aplicado utiliza como insumo azúcar blanco sulfitado.

El proceso para refinar azúcar blanco sulfitado, consiste en disolver azúcar de 230-250 unidades ICUMSA de color producida en la fábrica; el jarabe obtenido se le denomina licor disuelto. El licor disuelto se trata con carbón activado y calor para decolorarlo (remoción de pigmentos por adsorción de los mismos a la superficie de las partículas de carbón activado), simultáneamente se le adiciona tierra de diatomeas como ayuda filtrante. La mezcla obtenida se le denomina licor tratado, el cual se filtra a través de un sistema de filtros primarios. El licor obtenido se pasa por un segundo juego de filtros secundarios (llamados también rectificadores o pulidores). El licor filtrado final es de alrededor de 150 unidades ICUMSA de color y libre de partículas sólidas suspendidas (Figura 30).

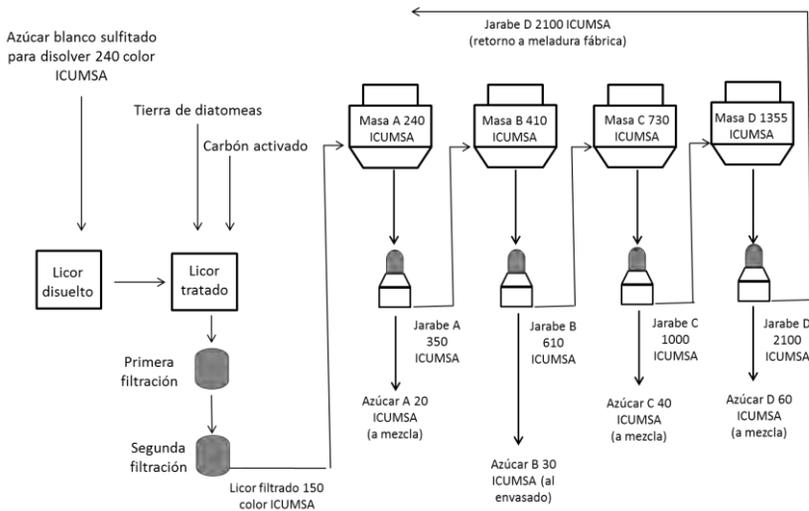


Figura 30. Diagrama de sistema de cuatro etapas para refinar azúcar a partir de azúcar blanco sulfitado

En el Cuadro 2 se presentan los valores de color esperados para los distintos materiales de proceso y los azúcares en un sistema de cuatro etapas para refinamiento de azúcar blanco sulfitado.

Cuadro 2. Color de materiales en proceso y azúcar para un sistema de cuatro masas en la producción de azúcar refinado a partir de azúcar blanco sulfitado

Material	Color ICUMSA
Azúcar para disolver	240
Licor filtrado	150
Masa A	240
Jarabe A	350
Masa B	410
Jarabe B	610
Masa C	730
Jarabe C	1000
Masa D	1355
Jarabe D	2100
Azúcar A	20
Azúcar B	30
Azúcar C	40
Azúcar D	60
Azúcar envasada	25 - 35

Con el sistema de cuatro templeas para la refinación de azúcar, para cerrar un ciclo se necesita un total de 15 templeas (8 templeas A, 4 templeas B, 2 templeas C y 1 templea D).

Otras variantes de procesos y sistemas para refinar azúcar en Guatemala, consideran partir de azúcar de 500 unidades ICUMSA de color, para lo cual al azúcar disuelto hay que hacerle un tratamiento previo de afinación o clarificación del licor disuelto, para remover exceso de impurezas sólidas y color, antes de la decoloración con carbón activado y posterior filtración. Además se están aplicando variantes de templeas mixtas, sistema que considera cristalizar con licor final (licor decolorado y filtrado) y desarrollar la templea con mezclas de jarabes (obtenidos de la purga de masas predecesoras), este proceso de templeas mixtas se hace para evitar la mezcla de azúcar (sólido) ya que es más eficiente mezclar y homogeneizar líquidos (con menos grados de libertad) en comparación a mezclar y homogeneizar sólidos (con más grados de libertad).

ACONDICIONAMIENTO Y MANEJO DE AZÚCAR

El azúcar obtenido de las centrifugas automáticas, a pesar de haber sido sometido a un tiempo de secado en el ciclo de la centrifuga, tiene una humedad muy alta para poder ser manejado adecuadamente a granel, durante su transporte y/o almacenaje y evitar que se deteriore antes de llegar al cliente final (las refinerías de azúcar en el caso del azúcar crudo) o para ser envasado y preservado de sus características de calidad hasta ser consumido o utilizado por el cliente final (en el caso de azúcares blancos y refinados).

El azúcar húmedo se somete a dos procesos en secuencia: primero al secado y seguidamente al enfriamiento.

Para ambos procesos el azúcar atraviesa un cilindro rotativo inclinado (de aproximadamente 6 pies de diámetro x 25 pies de largo), el cual está provisto por una serie de peines que subdividen y provocan una cortina de azúcar trasversal al flujo de aire, dicha cortina de azúcar se desplaza longitudinalmente por el ángulo de inclinación del cilindro (Figura 31). El azúcar se mueve desde el extremo de la alimentación hasta el extremo de la descarga (el nivel de la alimentación está a mayor altura respecto al nivel de la descarga).

Por la cortina de azúcar circula aire en contracorriente, el tiro de aire es producido por un ventilador que está en el extremo de alimentación del cilindro rotativo. A la entrada del cilindro de la secadora se encuentra una serie de tubos de bronce, dotados de aletas del mismo material formando un panel, dentro del cual se inyecta vapor de 100 psig, estos tubos calientan el aire a una temperatura de unos 290°-293° F. El azúcar de las centrifugas puede contener una humedad de 1-2 por ciento. Las condiciones de temperatura del aire de secado se fijan en función de los requerimientos de humedad del azúcar producido. El azúcar crudo debe tener una humedad de entre 0.11 a 0.35 por ciento y el refino una humedad menor a 0.04 por ciento.

El aire que circula por la enfriadora puede ser el aire del ambiente. La temperatura del azúcar en un rango de 110°-115° F es adecuada para azúcar crudo o blanco sulfitado, pero para azúcar refino deben conseguirse temperaturas de envasado menores, lo cual combinado con un adecuado tamaño y homogeneidad en la distribución del tamaño en los cristales y en condiciones adecuadas de almacenaje, previenen el aterronamiento de dicho producto durante su almacenaje.

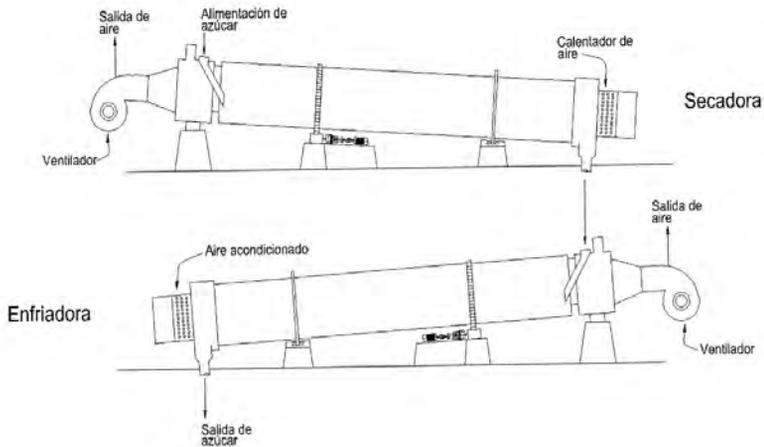


Figura 31. Diagrama de operación para sistema de secado y enfriamiento de azúcar en línea

En Guatemala el azúcar crudo es manejado exclusivamente a granel. Expogranel es la central de embarque de azúcar crudo, ubicada en Puerto Quetzal y su operación es considerada como una de las más eficientes del mundo; en la Figura 32 aparecen vistas de esta central de embarque, en la 32a se muestra la descarga de una unidad de transporte en rampas hidráulicas y en la 32b se muestra una vista de la bodega principal. El azúcar blanco sulfitado y el azúcar refinado se pueden manejar en sacos de polipropileno de 50 kg (Figura 33a), en jumbos de peso exacto (a requerimiento del cliente) o jumbos a granel (Figura 33b). El manejo de azúcar refino a granel es una práctica cuyo proyecto de infraestructura y logística ya se encuentra en ejecución y se tiene proyectado su inicio de operaciones para la zafra 2011-2012.



a) Descarga de unidad transporte azúcar crudo a granel.



b) Bodega principal de azúcar crudo a granel.

Figura 32. Vistas de la central de embarque de azúcar crudo EXPOGRANEL



a) Vista de una bodega de azúcar en sacos 50 Kg.



b) Vista de una bodega de azúcar en jumbos.

Figura 33. Bodegas de azúcar blanco y/o refino en sacos y en jumbos

EL FUTURO: LAS BIO-REFINERÍAS

Desde el inicio de la producción de azúcar en cualquiera de sus formas o presentaciones (guarapo, miel concentrada o meladura, panela , moscabado, melcocha, azúcar crudo, azúcar de mesa, etcétera) hasta los inicios del siglo XX, el objetivo principal y casi único de los trapiches e ingenios era la producción del edulcorante conocido como sacarosa.

La energía necesaria era provista por tracción animal o humana y por leña extraída de bosques aledaños.

El subproducto principal de éstos procesos era la melaza, que en algunas ocasiones y según las circunstancias era considerada un “desecho” y una molestia y se utilizaba para compactar el polvo de las carreteras de tierra. Posteriormente, se le encontró uso y valor como suplemento nutricional en alimento para ganado y principalmente como sustrato (fuente de carbono) para la incipiente industria de bebidas alcohólicas (etanol potable).

Al irse mejorando el proceso de molienda, también se le encontró uso a otra molestia que se acumulaba: el bagazo de la caña, que comenzó a utilizarse como combustible para la generación de calor y energía de movimiento.

De manera que la etapa siguiente del desarrollo de la industria azucarera ya tenía además del producto principal, el azúcar, dos subproductos con un valor considerable: la melaza y el bagazo.

La globalización del mercado de azúcar también introdujo la diversificación del producto principal y la tecnología necesaria para producir azúcar refinado, miel invertida (High Test Molasses – HTM) entre otros productos.

Con el advenimiento de la crisis energética a principios de la segunda mitad del siglo XX, surgió la oportunidad de agregarle valor a dos derivados de los subproductos principales: la generación de electricidad en turbinas movidas por el vapor generado en las calderas, tanto para uso del ingenio como para la red nacional y la producción de etanol combustible en destilerías anexas a los ingenios, las que a su vez presentaban el problema de dos sub-productos consiguientes: la vinaza y el dióxido de carbono (CO₂). En la mayoría de los casos el CO₂ es liberado al ambiente y ocasionalmente aprovechado industrialmente en bebidas carbonatadas o comprimido para la elaboración de hielo seco, muy utilizado para la preservación de alimentos.

Recientemente la vinaza dejó de ser considerada como un “desperdicio” y pasó a ser un subproducto valioso del cual se puede recuperar calor, proteína, nutrientes para fertilización, sustrato para la producción de metano, etc.

Actualmente, entonces, en Guatemala, un ingenio azucarero integrado puede estar produciendo varios productos y subproductos valiosos para la economía del país:

Azúcares: Crudo
 Moreno
 Blanco
 Cristal
 Refino

Bagazo: Fibra ligno-celulósica
 Vapor : Calor
 Movimiento / trabajo
 Electricidad

Mieles: Meladura hidrolizada (invertida o HTM)

 Melaza: Suplemento para alimentación de ganado
 Etanol : Potable
 Industrial
 Combustible

 Vinaza: Fertilizante
 Metano
 Proteína unicelular

 CO₂

El siguiente paso, en el cual ya se han logrado avances en países más industrializados es el desarrollo de Complejos industriales llamados “BIO-REFINERÍAS”, que aprovechen cada fracción de la caña de azúcar en una gran diversidad de productos y subproductos según su factibilidad técnica y económica en determinados momentos del mercado.

El concepto se desarrolló a nivel industrial en los años setenta del siglo pasado, en las plantas procesadoras de granos (maíz) para la producción de etanol, que originalmente cocinaban el grano entero de maíz para producir el mosto fermentable del cual se destilaba el etanol y el residuo se destinaba como tal a la alimentación de ganado. El proceso innovado separa la fibra, el aceite, la proteína, y la celulosa para procesarlos separadamente y crear una gran gama de productos y deja solamente el almidón para fermentar, lo que no solo facilita la fermentación sino que el residuo enriquecido con la proteína de la levadura es más fácil de dosificar en las dietas de animales.

Igualmente, el procesamiento integrado de la caña puede dar lugar a un grande y creciente número de productos, subproductos y derivados de éstos, limitados únicamente por la economía de escala y la demanda de los mismos, que van desde la biomasa residual en el campo, hasta productos de reacciones específicas en los cuales los derivados del procesamiento de la caña pueden ser reactivos y materias primas importantes, pasando por supuesto por los productos que ya tienen valor comercial enumerados anteriormente.

Ya en los años sesenta, Paturau (Byproducts of the Sugar Cane Industry) mencionaba una cantidad considerable de productos químicos especiales que podrían obtenerse directamente del uso de la sacarosa y la melaza como reactivos, y del uso del bagazo como fuente de fibra y celulosa para la elaboración de diversos productos aglomerados (Figura 34).

El esquema de interacciones entre productores primarios de energía y materia prima y de usuarios de productos y subproductos que impulsan la idea global de las Bio-refinerías basadas en el cultivo de la caña de azúcar se ilustra en la Figura 35.



Figura 34. Productos de la sacarosa de potencial importante
 Fuente: Paturau, J.M. "By-products of the cane sugar industry". Elsevier

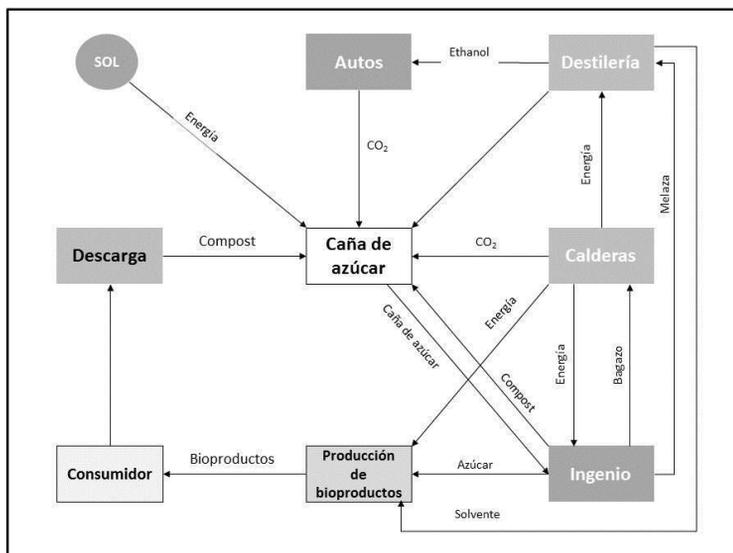


Figura 35. Interacciones de productores primarios de energía y materia prima
 Fuente: Murillo *et al.* "Chemistry base don renewable rawmaterials: Perspectives for a Sugar cane-based Bio-refinery"

Dado el paso acelerado y cambiante de la economía mundial y de la demanda de productos cada vez más específicos, es de esperarse que en las próximas décadas se vayan desarrollando procesos que utilicen cada vez más el azúcar y el etanol como reactivos. De ahí el surgimiento reciente de ramas de la química aplicada como “Sucroquímica “ y “Alcohoquímica”, que documentan la factibilidad técnica de muchas reacciones químicas, que son posibles puesto que existe la tecnología necesaria para llevarlas a cabo y algunas de ellas ya se producen industrialmente, pero es necesario advertir que para otras, su factibilidad económica depende de la demanda del producto y de su economía de escala, tal es el caso del etanol a partir de celulosa que es técnicamente factible desde hace 30 años pero algunos autores estiman que pasarán otros 30 años antes de que sea económicamente factible.

La Figura 36 ilustra de forma resumida algunas de las derivaciones de la compleja tecnología que puede llegar a resumirse en una Bio-refinería, que como se dijo anteriormente, es más un concepto que una instalación física, ya que muchas de las operaciones podrían realizarse fuera del ingenio azucarero.

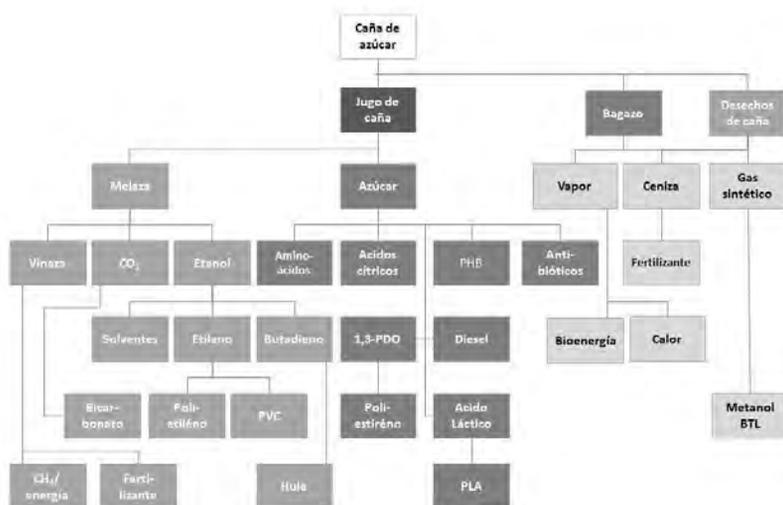


Figura 36. Subproductos de la caña de azúcar en una bio-refinería

Fuente: Murillo *et al.* Chemistry base don renewable rawmaterials: Perspectives for a Sugar cane-based Bio-refinery

AGRADECIMIENTO

A los ingenieros Carlos René Cifuentes, Dietrich Haeckel, Raúl Rivera, Roberto Balsells y a la empresa Consultores de Ingenios Azucareros, S. A. (CIASA) por sus aportaciones y revisiones al presente capítulo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Azucareros de Guatemala (ASAZGUA). 2011. Agroindustria Azucarera de Guatemala. Informe anual. Zafra 2008-2009. Guatemala, ASAZGUA. 56 p.
2. Chen, J. C. 1991. Manual del azúcar de caña. Trad. Carlos García, Constantino Álvarez. México, Limusa. 1,201 p.
3. Fuentes León, M. A. 2004. Evaluación del uso de aire acondicionado en el secado de azúcar refino (en línea). Tesis Ing. Quim. Guatemala, USAC. Consultado el 12 agosto 2011. 47 p. Disponible en http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_5646.pdf.
4. Guthrie, J. P. 1975. Carbonyl addition reactions: factors affecting the hydrate-hemiacetal and hemiacetal-acetal equilibrium constants (en línea). Can. J. Chem. 53 (6):898-906. Consultado 30 julio 2011. Disponible en <http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/v75-125>.
5. Hugot, E. 1963. Manual para ingenieros azucareros. Trad. Carlos Ruiz Coutiño. México, Cía. Editorial Continental. 803 p.
6. Larrahondo, J. E. *et al.* 1995. Calidad de la caña de azúcar (en línea). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. CENICAÑA. Cali, Valle del Cauca, Colombia. Consultado 15 julio 2011. Disponible en http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seridados/libro_el_cultivo_cana/libro_p337-354.pdf.
7. Manohar, P. J. 1997. INDUSTRIAL UTILIZATION OF SUGAR CANE AN ITS CO-PRODUCTS. ISPC Publishers. New Delhi.
8. Murillo, F.; Araujo, C.; Bonfá, A.; Porto, W. 2011. Chemistry based on renewable rawmaterials: Perspectives for a sugar cane based biorrefinery. 8 p.
9. Paturau, J. M. 1989. By – products of the cane sugar industry. 3a. ed. New York, Elsevier. 436 p. Sugar series No. 11.
10. RENOVETEC. 2010. Tipos de plantas de cogeneración (en línea). Madrid, RENOVETEC. Consultado 22 agosto. 2011. Disponible en <http://www.cogeneracion.renovetec.com/cogeneraciontiposplantas.html>.
11. Tecnicaña. 2001. ALCOQUIMICA 2011. Memorias seminario internacional. Colombia.
12. Vaz, CM. Stamile Soarez, SM. Silva, JO da. Clarificación de meladura por flotación (en línea). Río de Janeiro, Engenho Novo Cia. Ltda. Consultado 26 julio 2011. Disponible en www.engenovo.com.br/es/artigostecnicos/fxc.pdf.

XIV. DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA

COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Mario Muñoz*

INTRODUCCIÓN

En los ingenios azucareros de Guatemala, la cogeneración ha tenido un desarrollo y una evolución sostenida; este impulso se ha dado por la generación secundaria de un subproducto, que pasó de ser un desecho a ser biomasa en cantidades abundantes, con un poder calorífico aprovechable que lo convirtieron en un buen combustible: el bagazo.

Con la quema del bagazo como combustible en las calderas, se logró generar y mantener la producción de vapor que ha sido la fuerza motriz y el que contiene la energía más utilizada en todos los procesos de fabricación del azúcar. Como resultado de la necesidad de incrementar la producción de dicho vapor, los ingenios cogeneradores han ido desarrollando su tecnología de modo que pasaron de turbinas de una etapa a las de multietapas; las primeras son usadas solo como transmisoras de potencia para máquinas tales como los molinos, en cambio las segundas están acopladas a generadores de electricidad. Con este cambio, los ingenios se convirtieron en cogeneradores, ya que producen energía de movimiento y en forma de calor por medio de vapor para generar energía eléctrica, y luego aprovechan la energía del vapor remanente para los procesos de fabricación del azúcar, todo esto a partir de un único combustible.

Aprovechando las mejoras en las leyes del país, la cogeneración ha crecido aún más; las nuevas leyes promovieron y liberaron la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica. Esto incentivó a los ingenios a invertir para aumentar la cantidad de caña para moler, a optimizar el consumo de vapor en las fábricas y a elevar su disponibilidad eléctrica con turbogeneradores más eficientes y de mayor capacidad.

Los procesos de la cogeneración en los ingenios azucareros que se ilustran en este capítulo son conceptualmente iguales o muy similares. Sin embargo, en cada ingenio cogenerador hay arreglos diferentes y también es variada la manera en que cada industria maneja sus operaciones, desde el manejo y tratamiento del bagazo, pasando por la generación de vapor y la electricidad hasta el aprovechamiento del vapor de escape en la fábrica de azúcar. Los

* Ing. Mecánico Industrial, Profesional en Eficiencia Energética de CENGICANA. www.cengicana.org

balances energéticos de cada proceso y de cada cogenerador también son distintos.

En la actualidad los recursos empiezan a limitar a la cogeneración, sin embargo en el mercado eléctrico del país, la demanda de energía eléctrica más limpia supera por mucho a la oferta, por lo tanto los ingenios enfrentan dos retos: primero, invertir y crecer en el mercado de la generación de energía con otros combustibles, tales como el carbón mineral, y segundo, optimizar y mejorar sus procesos de cogeneración a través de la eficiencia energética interna y la eficiencia en la utilización del bagazo como combustible. En este apartado, se presenta un paso breve y resumido por la historia del desarrollo de los cogeneradores, los índices de eficiencia, los beneficios y los procesos involucrados en esta forma de gestión de energía.

ANTECEDENTES

En Guatemala, desde hace un poco más de 70 años, algunas industrias como los ingenios azucareros, han venido generando su propia energía con el fin de satisfacer las necesidades energéticas de los procesos internos para la fabricación del azúcar. Inicialmente la generación era para uso local y se limitaba a cubrir la energía cinética que demandaban los equipos de extracción de jugo, tales como picadoras y molinos, cuya fuerza motriz era el vapor principal producido en las calderas. La segunda demanda fundamental de la energía la constituían los procesos de fabricación, conocidos como de tratamiento, procesamiento y cocimiento del jugo y mieles, tales como la evaporación, el calentamiento y la cristalización.

Para cumplir con esta segunda demanda de energía se ha empleado el vapor llamado “de escape”, es decir, vapor que ha cedido parte de su energía en un proceso primario (i.e. moviendo una turbina), pero conserva suficiente energía a una presión y temperatura menor, el cual, según algunas definiciones, se convierte en la primera manifestación de la cogeneración en los ingenios azucareros. La razón de esta afirmación proviene del hecho de que la fuente del vapor de escape era la descarga de las máquinas de extracción que utilizan en una primera fase la energía cinética contenida en el vapor principal. Esto quiere decir que el vapor principal que se usa en los equipos de extracción de jugo es el mismo que luego se utiliza en el proceso de fabricación del azúcar solo que con menor energía, menor presión y menor temperatura. Dicha energía es casi agotada por los equipos de extracción, el remanente contenido en el vapor de escape es la energía doblemente aprovechada.

Con el aumento de la cantidad de caña molida en los ingenios y, por ende, el crecimiento de las fábricas, más el afán por optimizar el proceso de fabricación del azúcar, los ingenios cogeneradores fueron invirtiendo en turbinas de vapor más grandes acopladas a generadores eléctricos. De esta manera lograron generar energía eléctrica y así en época de zafra se independizaron de la red eléctrica nacional, constituyéndose así en un ahorro energético para el país. Estas turbinas también descargan vapor de escape, por lo tanto, se logró mantener y mejorar la disponibilidad de esa energía térmica hacia la fábrica.

El siguiente paso que algunos ingenios cogeneradores han dado es electrificar los procesos de extracción de jugo (picadoras y molinos) que típicamente eran movidos con vapor y ahora son eléctricos. Como resultados, el uso de la energía es más eficiente ya que el vapor principal que antes se utilizaba para mover picadoras y molinos ahora se emplea exclusivamente para mover turbogeneradores, que a la vez producen energía eléctrica, y así la extracción y todos los equipos e instalaciones del proceso funcionan de manera más eficiente.

Con esta última estrategia, los ingenios internamente han logrado “cogenerar”, paralela y secuencialmente, energía principal y de escape tanto térmica como eléctrica. La producción de estas formas de energía se ha realizado con la quema en calderas de un solo combustible, el bagazo.

El bagazo es un subproducto que se origina en la molida de la caña de azúcar; viene en la caña en forma de fibra que ya no se puede aprovechar en la extracción del azúcar. A lo largo de su historia, los ingenios han hecho esfuerzos para quemar eficientemente el bagazo de manera que existan cada vez mayores excedentes y así se pueda generar más energía eléctrica. Los que lo han logrado, generan para sí toda la energía térmica y eléctrica que necesitan, además cuentan con un excedente que les ha permitido vender parte de esa energía “cogenerada” a la red eléctrica nacional, de esta manera los ingenios cogeneradores han logrado contribuir a satisfacer la creciente demanda energética del país.

Adicionalmente, la cogeneración en los ingenios azucareros ha representado un factor positivo para el medio ambiente, argumentándose que la utilización de un combustible de origen “no fósil” ha disminuido la emanación de algunos gases de efecto invernadero a la atmósfera.

CONCEPTO BÁSICO

No existe una sola definición para la cogeneración, así varios autores la consideran una técnica y otros, un proceso o un sistema. Desde un punto de vista energético, la cogeneración está definida así:

Definición

Una definición simplificada es: cogeneración es la técnica empleada para la producción secuencial de energía, por lo general eléctrica y térmica, a partir de una sola fuente de energía.

Sin embargo, la cogeneración puede verse integralmente como un proceso y no como una técnica: es un proceso mediante el cual la descarga de calor de un proceso se convierte en una fuente de energía para otro proceso de conversión posterior.

En los sistemas de cogeneración (Figura 1), los procesos primarios y secundarios de la utilización de la energía se dan simultánea y secuencialmente; las energías que se transforman pueden ser de naturaleza eléctrica, mecánica o térmica. Esta última suele presentarse en forma de calor aunque el concepto se aplica también al frío. Todas estas energías siempre se generan a partir de la combustión de un solo combustible.

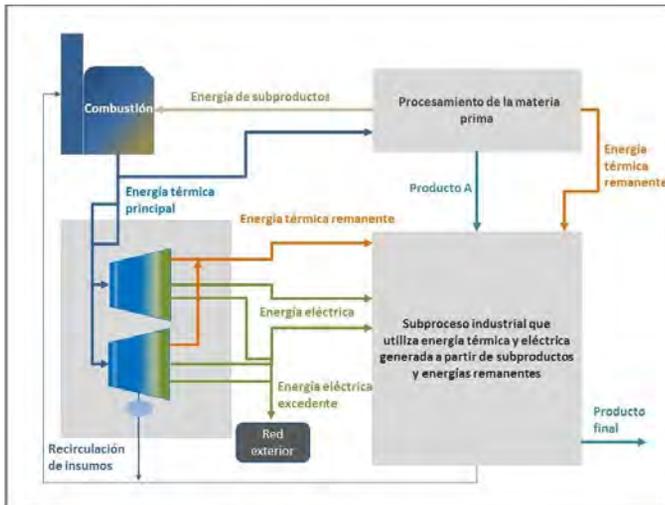


Figura 1. Sistema de cogeneración con producción simultánea y secuencial de energía térmica y eléctrica

La idea básica de la cogeneración es aumentar el rendimiento global integrando dos sistemas energéticos, generalmente la energía eléctrica con la térmica (calor). Como resultado, el sistema combinado entrega una mayor eficiencia y menores costos que realizando la operación de cada recurso energético por separado.

Tipos de cogeneración

Si la energía que se generó por primera vez es utilizada y descarga calor que se usa después como calor de proceso, entonces se llama *topping* o proceso de cabecera. Si la descarga de calor de un proceso industrial se utiliza secundariamente para generar energía, entonces tenemos una configuración de *bottoming* o de cola.

Cogeneración de ciclo de cabecera: En este ciclo se genera primero la energía eléctrica; para producir la electricidad se utilizan turbinas de vapor, turbinas a gas o motores de diésel y luego el calor descargado se emplea en algún proceso industrial posterior, por ejemplo, en sistemas de evaporación y cocimiento u otros requerimientos de carácter térmico. Es el sistema más aplicado en la industria azucarera. Si se trata de turbinas a vapor, tanto los gases de escape de las calderas como la descarga de vapor en las turbinas se convierten en fuentes de calor para otros procesos.

Cogeneración de ciclo de cola: Este ciclo es térmico, pretende recuperar calor de un proceso industrial para luego producir energía eléctrica. En este caso se requiere vapor de temperatura y presión adecuadas para la operación de turbogeneradores que generen la energía eléctrica. Este proceso no es útil en los ingenios cogeneradores.

Características necesarias para la cogeneración

En principio, cualquier proceso que tenga una importante demanda de calor y electricidad es un posible cogenerador. Sin embargo, en términos generales puede establecerse que los potenciales cogeneradores deben cumplir con alguna de las siguientes características:

- Producir importantes excedentes de calor, ya sea a través de los gases calientes provenientes de la combustión en las calderas o en forma de vapor de escape de baja presión proveniente de la descarga o extracción de las turbinas.
- Disponer de un combustible muy barato, de suministro continuo, estable y uniforme. De hecho, mientras mayor es la diferencia de precios entre el combustible y la electricidad, mayor beneficio económico reporta implementar un sistema de cogeneración.

- El proceso industrial involucrado debe ser continuo, de otra manera se perdería la energía cogenerada.

COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

La cogeneración en la industria azucarera está sujeta a un marco legal amparado en la Ley General de Electricidad.

Marco legal¹

La Ley General de Electricidad del país establece que es libre la generación de electricidad y no se requiere autorización previa por parte del Estado, y el artículo 8 del mismo cuerpo legal, establece que es libre la instalación de centrales generadores.

El proceso de generación, transporte y distribución de electricidad en Guatemala había estado regulado normalmente por la Ley del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) Decreto Legislativo No. 1287 del 27 de marzo de 1959, el cual estableció los mecanismos para poder entrar al negocio de la electricidad y era el Consejo Directivo que lo conformaba, el órgano encargado de proponer al ejecutivo los niveles tarifarios. Esta institución se creó con el carácter de entidad estatal descentralizada, con autonomía funcional, personalidad jurídica, fondos privativos y plena capacidad para adquirir derechos y contraer obligaciones en materia de su competencia.

El negocio de la electricidad tradicionalmente se había manejado por la vía estatal (INDE, EEGSA y empresas eléctricas municipales); la Constitución de la República de Guatemala ha dejado planteado por muchos años (artículo No. 129), que en la producción de electricidad puede participar el sector privado. En los últimos años la economía nacional ha experimentado una serie de cambios, enmarcados en el proceso de la globalización y ajuste estructural impulsado por los organismos financieros internacionales, que ha implicado promover la modernización de la economía. Ese aspecto se ha manifestado en una mayor apertura hacia el exterior y la reestructuración del aparato estatal, en función de una mayor participación de los agentes privados, bajo el esquema de la desmonopolización. La idea de que el Estado debe relegar al sector privado las actividades productivas que no puede cumplir (papel subsidiario) ha pasado a ser fundamental, lo que ha motivado la necesidad de un ordenamiento que para

¹ **Logan Christel.** (2008). Régimen jurídico aplicable a la actividad de generación de energía eléctrica en el ordenamiento jurídico guatemalteco. Guatemala. 134 páginas.

el caso del subsector eléctrico se ha materializado en propuestas concretas de tipo legal, que en primera instancia está permitiendo el proceso de la desmonopolización en este subsector.

Dentro del marco de la problemática del subsector eléctrico brevemente esbozada, se inicia el proceso de la desmonopolización, para lo cual el primer paso consistió en nombrar una Comisión Multisectorial que se ocuparía de proponer soluciones integrales a la problemática del subsector eléctrico que generaría la nueva Ley General de Electricidad.

Dentro de las conclusiones y recomendaciones de la Comisión destacan:

- a) Desmonopolizar el subsector eléctrico.
- b) Establecer mecanismos para que las relaciones entre los agentes que participen en el sub-sector se realicen, eliminando la injerencia política.
- c) Garantizar que los agentes que participen en cualquiera de las funciones del servicio (generación, transmisión, distribución y comercialización) operen en igualdad de condiciones.
- d) Revisar la legislación y estructuración de las empresas públicas del subsector.
- e) Garantizar que los recursos naturales renovables y no renovables sean utilizados racionalmente.
- f) Promover el uso de fuentes alternas de energía para la generación eléctrica.
- g) Revisar la estructura de distribución de energía y promover la competencia y reconversión de las empresas distribuidoras, así como facilitar la participación de nuevas empresas.
- h) Establecer mecanismos para la venta de acciones y cualquier otro proceso que permita optimizar los recursos de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA).
- i) Todas las empresas eléctricas tendrán la autonomía para administrar su producción, compras y distribución de energía.
- j) Efectuar los cambios necesarios a la legislación vigente, para que cualquier empresa pueda fijar sus propios precios.

Ley de Fomento al Desarrollo de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía:

La Ley General de Electricidad constituye el marco dentro del cual se inscribe toda actividad dedicada a cualquier parte del proceso (generación, transmisión, distribución y comercialización). Es importante destacar que en cuanto al proceso concreto de la cogeneración, existe esta ley (Decreto-Ley No. 20-86). La que tiene como objetivo fundamental el promover y fomentar el aprovechamiento de fuentes nuevas y renovables de energía, fuentes no convencionales y fuentes nuevas en el país, estableciendo incentivos y ventajas legales a las actividades que involucren uno o más de los siguientes campos: investigación, experimentación, educación, capacitación, promoción, difusión, producción, fabricación de equipos

específicos. El aprovechamiento de fuentes nuevas y renovables de energía y la comercialización de los productos obtenidos de estas actividades, se define “aquellas como fuente nueva y renovable de energía aquellas como la radiación solar, el viento, las mareas, el agua, la geotermia, la biomasa y cualquier otra fuente de energía que no sea la nuclear ni la producida por hidrocarburos y sus derivados” (Artículo 7).

Flujo de la energía en la cogeneración

En una planta cogeneradora típica de los ingenios, la generación de vapor principal se produce en las calderas. Una caldera acuotubular recibe constantemente condensados calientes desde el proceso de evaporación; los evaporadores producen el condensado después de utilizar el vapor de escape y lo devuelven para volver a ser evaporado en la caldera. El condensado se evapora solo si recibe una transferencia de calor por radiación y convección proveniente de la combustión del bagazo; a la vez el bagazo (combustible) no se quemará, a menos que exista una suficiente cantidad de aire atmosférico comburente entrando al quemador. En la mayoría de instalaciones modernas, el aire antes de entrar a la cámara de combustión pasa por un precalentador en donde le es cedido el calor remanente en los gases de chimenea de la caldera. El aire así precalentado es utilizado para el proceso de combustión y para mantener una turbulencia adecuada y un lecho de bagazo, y así favorecer una completa combustión.

El bagazo es un combustible que proviene del proceso de extracción por lo que la generación eficiente en la caldera depende de la estabilidad de la molienda y de los procesos industriales. De la caldera surgen dos flujos de energía: por un lado está la contenida en el vapor producido y que más adelante será aprovechada en la turbina y por otro, la energía, que significa una pérdida, es la contenida en los gases de chimenea, que representan la entropía de este proceso y que son expulsados a la atmósfera. Aunque los gases de la caldera algunas veces se usan para precalentar los condensados y el aire de combustión, llevan un remanente de energía que ya no se aprovecha.

En el turbogenerador se utiliza toda la energía contenida en el vapor al convertir su entalpía en energía eléctrica. La energía eléctrica es empleada para cubrir la demanda del proceso industrial, las necesidades de la caldera y de la misma turbina. El excedente de la energía eléctrica sale del sistema hacia la red eléctrica nacional y el vapor de escape de la turbina, con menor presión y temperatura, ingresa al proceso industrial donde es aprovechado y luego condensado para regresar a la caldera y comenzar nuevamente el ciclo. En la Figura 2, se ilustra el flujo de los insumos energéticos necesarios para la cogeneración de energía térmica y eléctrica.

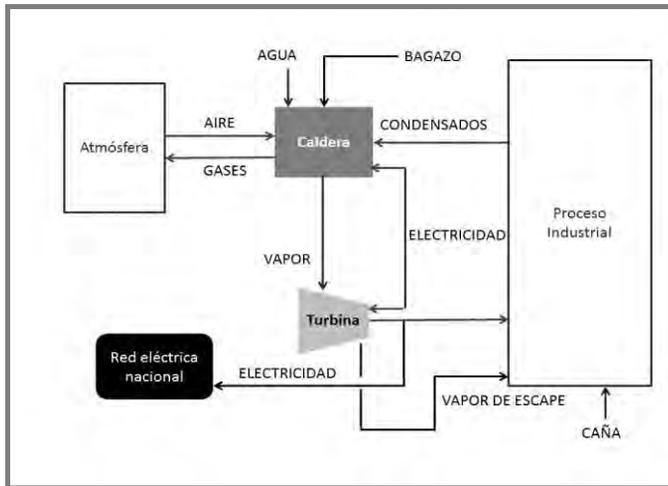


Figura 2. Flujo de energía en un ingenio cogenerador

Demanda y oferta en el mercado energético

En la práctica, la cantidad de energía que puede ser generada y cogenerada por cada ingenio azucarero, varía según la capacidad de cada uno, eso ha representado un incentivo para el crecimiento y para futuras inversiones. Al principio, los ingenios fijaron su interés en la posibilidad de aumentar su producción de energía para autoconsumo, pensando en limitar sus inversiones para hacer más eficientes sus procesos y contar con mayor disponibilidad de electricidad en la fábrica; hoy el enfoque es crecer también como suplidores de energía eléctrica. En la Figura 3, se ve cómo ha crecido la generación de los ingenios cogeneradores en las últimas diez zafras, favorecidos por las nuevas leyes y por el crecimiento de la demanda energética general del país.

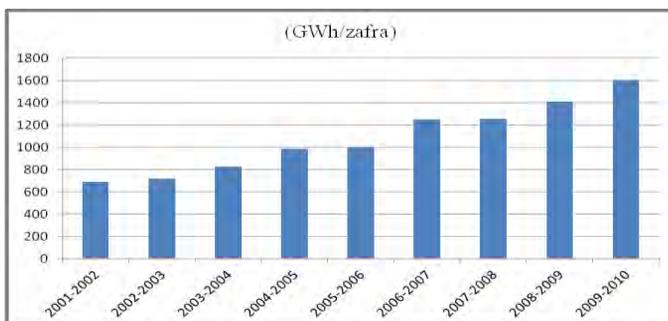


Figura 3. Crecimiento de la generación de los ingenios cogeneradores

El bagazo es considerado biomasa, según un informe estadístico del Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala (AMM); la generación interna de energía eléctrica del país a finales del año 2010 fue de 7,913.91 GWh; un 11.8 por ciento de esta energía fue cogenerada a partir de biomasa. En la Figura 4, se observa la contribución anual que los ingenios azucareros hicieron a través de la cogeneración en el año 2010 para satisfacer la necesidad de energía eléctrica en el país.

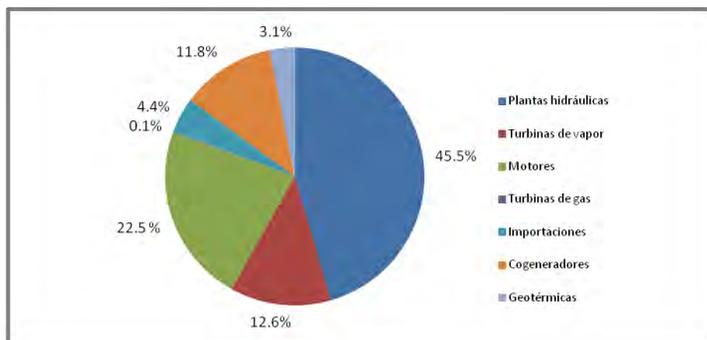


Figura 4. Producción de energía eléctrica en el 2010 en Guatemala (% del total de GWh)

PROCESOS

Ciclos de cogeneración

Los procesos o ciclos de cogeneración que utilizan turbinas de vapor y que están más difundidos en la industria azucarera son los de contrapresión y condensación; el primero es el más convencional, el segundo es el más eficiente y moderno pero necesita cantidades de vapor de más alta presión y temperatura (i.e. >600 psig y 700 °F). Además de estos dos procesos, hay un tercero que actualmente se encuentra en fase de demostración y experimentación: Es el ciclo combinado con Gasificación del bagazo que en el país aún no se tiene documentada la existencia de plantas que cogenereen con dicho proceso.

Ciclo de contrapresión: Estos procesos toman su nombre por el tipo de turbina de vapor que mueve al generador de energía eléctrica. En este proceso el vapor principal de alta o baja presión entra a una turbina de contrapresión, donde la entalpía del vapor se transforma de energía cinética o de

movimiento, que a su vez se transmite a un generador de energía eléctrica. El vapor en cada paso de transformación dentro de la turbina pierde paulatinamente presión y temperatura, y al final de su recorrido por la turbina el vapor se descarga con un remanente de presión y temperatura; este vapor de baja presión o de escape es conducido por tuberías a un proceso posterior y/o paralelo donde es utilizada la energía aún contenida en ese vapor. El trabajo que el vapor entrega en la turbina sirve para mover un generador eléctrico, el cual a través de su rotación en un campo magnético genera la energía eléctrica, esta a la vez sirve para mover y mantener en funcionamiento los equipos e instalaciones de la planta industrial y si hay excedentes se venden a la red eléctrica nacional.

Ciclo de condensación: Este ciclo es más complejo porque necesita vapor de más altas presiones y temperaturas, esto implica instalaciones más modernas y eficientes; el vapor de este proceso ingresa a la turbina, el vapor entrega su energía en la diferentes etapas de la turbina, estas máquinas son tan eficientes que el vapor no llega a la descarga, es decir, su presión y temperatura se agotan dentro de la turbina, el vapor se extrae por otros medios; frecuentemente se utilizan bombas de vacío. Con este vacío el vapor pasa hacia un condensador donde se enfría y condensa, luego es conducido al inicio del ciclo para convertirse nuevamente en vapor que regresará a la turbina, constituyéndose así en un ciclo cerrado. Sin embargo, en esta disposición no existe la cogeneración, por lo tanto en el cuerpo de esta turbina son dispuestas extracciones de vapor a diferentes presiones y temperaturas para que alguna de estas extracciones pueda aportar el vapor de escape necesario para los procesos industriales. En este arreglo, una parte del vapor se condensa y la otra se extrae con energía remanente para los procesos industriales.

El vapor en la turbina entrega entalpía y produce un trabajo, que sirve para generar energía eléctrica, que a la vez se utilizará para los equipos de la planta industrial y para vender a la red eléctrica nacional.

Una ventaja de este ciclo es que cuando el proceso industrial no requiera vapor de escape, entonces puede cerrarse la extracción de la turbina y mandar todo el vapor hacia la condensación. Se genera así exclusivamente energía eléctrica, es decir, que la turbina puede ser de ciclo dual, cogeneración en época de zafra y generación en época de no zafra.

En la Figura 5, se ilustran los ciclos de cogeneración más comunes.

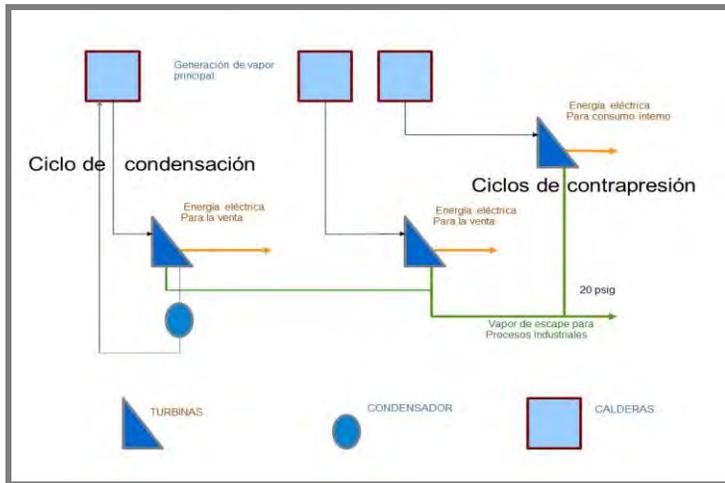


Figura 5. Planta industrial que opera con los dos ciclos de cogeneración

Producción de energía térmica

La energía térmica primaria es la contenida en el vapor principal; el agua es calentada, evaporada y generalmente llevada a su temperatura de sobrecalentamiento, con la ganancia de presión y temperatura; este vapor es conducido hacia las turbinas donde entrega entalpía y realiza un trabajo.

Combustibles utilizados: Una de las condiciones básicas para que se dé la cogeneración es que solo un combustible esté presente en los procesos de generación, entrega y aprovechamiento de la energía, tanto térmica como eléctrica. En el caso de los cogeneradores de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca, el combustible más utilizado es el bagazo. El bagazo constituye una biomasa sobrante de la molienda de la caña de azúcar; el bagazo es un compuesto celulósico fibroso, con poder calorífico en base seca de 19,868.51 KJ/kg y en base húmeda (51%) de 7,887.50 KJ/kg. En el Cuadro 1, puede verse la composición química típica del bagazo de caña:

Cuadro 1. Componentes típicos del bagazo

Compuesto	%
Carbono	23.52
Hidrógeno	3.47
Oxígeno	22.03
Cenizas	1.49
Humedad (agua)	49.5

El bagazo de la caña de azúcar tiene tres características físicas fundamentales:

- 1) *El contenido de humedad*: es la propiedad más importante desde el punto de vista de rendimiento energético en la producción de vapor principal, éste depende mucho del tipo de molinos y sus ajustes y de la manera en que la extracción del jugo es llevada a cabo. Normalmente, la humedad del bagazo está en un rango estrecho entre 49 por ciento y 52 por ciento. Esto quiere decir que de una unidad de masa de combustible quemado en las calderas, aproximadamente la mitad es bagazo y la otra es agua.
- 2) *Contenido de cenizas*: El porcentaje de cenizas fluctúa entre 0.75 por ciento y 4 por ciento; la cantidad de estas cenizas depende del tipo de suelo, edad, quema, forma de alce, recolección y lavado de la caña antes de ser molida. Los constituyentes varían de acuerdo con el tipo de suelo, abonos, variedades, clima imperante, etcétera.
- 3) *La granulometría*: La forma, tipo y disposición de la fibra depende del grado de preparación que tenga la caña en el proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras, picadoras y molinos. Además, a menor tamaño de la partícula de bagazo, menor peso, por lo tanto el tiempo de caída de la partícula desde la entrada al horno a la parrilla es mayor, por lo tanto un menor tamaño asegura una mejor combustión.

En la Figura 6, se ilustra el desarrollo del uso del bagazo como combustible, los ingenios cogeneradores han hecho paulatinamente cambios tecnológicos en sus plantas, para sustituir con bagazo a los combustibles fósiles tal como el Fuel Oil No. 6 o bunker C. En las últimas diez zafras, los cogeneradores prácticamente han duplicado su consumo de bagazo, de esta manera han aumentado su generación total y a la vez han sustituido los hidrocarburos por un combustible más barato y limpio.

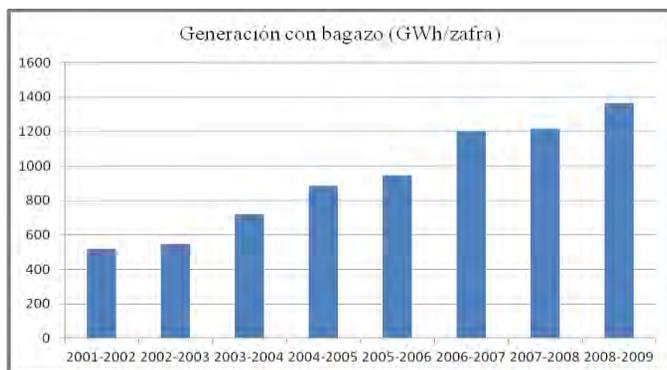


Figura 6. Generación de cogeneradores a partir exclusivamente de bagazo

Producción de vapor principal: El combustible proveniente de la molienda de la caña o de las bodegas de *stock*, es conducido a través de fajas transportadoras hacia las calderas; ahí es alimentado manual o automáticamente hacia adentro de los hogares de las mismas.

Las calderas son generadores de vapor acuotubulares, que aprovechan la energía térmica (calor) proveniente de la combustión del bagazo y que, a través de convección y conducción en las paredes de los tubos, lo transfieren al agua contenida dentro de sus tuberías hasta alcanzar la temperatura de ebullición y de sobrecalentamiento. Luego el horno de la caldera sigue absorbiendo energía en forma de calor latente de vaporización, por lo que el suministro de agua a la caldera debe permanecer constante durante la operación. El vapor producido se conduce por tuberías hasta la casa de turbinas.

Los factores más importantes que se toman en cuenta para una adecuada y eficiente producción de vapor en las calderas son:

- *El control automático de la presión*, este es un factor que debe diseñarse adecuadamente; los lazos (circuitos) de control deben equilibrar la cantidad de combustible y aire que se alimentan y los gases que se extraen del hogar de la caldera para que los sets de operación se mantengan constantes.
- *La humedad del bagazo*, esta variable afecta la combustión del bagazo retardándola, ya que el calor generado por el combustible primero deberá evaporar el agua contenida para luego seguir quemando y gasificando la fibra. La humedad dependerá de la cantidad de agua de imbibición usada en la extracción del jugo y de las condiciones de operación de los molinos. Debe encontrarse un equilibrio para optimizar el uso los recursos y las operaciones, a fin de sacar el mayor rendimiento posible en los procesos de extracción y de generación de vapor.
- *El exceso de aire*, un proceso eficiente de producción de vapor es aquel que también controla estrechamente el exceso de aire en la combustión, un exceso de aire asegura la transformación de todo el carbono en dióxido de carbono y saldrá en los gases de chimenea. Por el contrario, una menor cantidad de exceso de aire hace que parte del combustible que entra al hogar no se queme totalmente, produciendo monóxido de carbono (CO) y partículas carbonosas, por lo tanto aumentan las pérdidas por combustible no quemado y hay mayor porcentaje de cenizas en los drenajes, ceniceros y chimeneas. Demasiado aire también promueve la formación de NO_x y baja la temperatura de los gases.
- *La cantidad de ceniza*, las cenizas que se forman en la combustión, están compuestas en su mayoría por arena del campo, que no arde y pasa inmediatamente a formar parte de los “no quemados” de la caldera. Las cenizas y arenas menos pesadas vuelan junto a los gases de combustión hacia la chimenea, y causan desgaste por abrasión en los componentes por donde pasan, especialmente en las regiones de máxima velocidad de los gases.

- *La operación*, las buenas prácticas de operación de una caldera acuotubular incluyen un adecuado control químico del agua de alimentación, una limpieza oportuna del hollín adherido a las tuberías de transferencia, una limpieza rápida y eficiente del hogar y parrilla del hogar.
- *El diseño del hogar*, una parrilla de fácil limpieza, sin entradas de aire exterior, con entradas de aire de combustión adecuadas y bien dispuestas, con alimentadores de bagazo que contabilicen y desmenucen el bagazo y toberas que produzcan una fuerte turbulencia en el hogar garantizan una eficiente combustión del bagazo.
- *El monitoreo*: Las variables operativas de la caldera, tales como, el nivel de agua de alimentación, presión, temperatura, eficiencia, caudal de vapor, etcétera se monitorean constantemente a través de un adecuado sistema de medición y alarmas que respondan a los valores permisibles de operación.

Producción de vapor de proceso: El vapor de escape no se produce directamente en las calderas; este vapor que generalmente tiene una presión de entre 15-25 psig, es el vapor principal que ya entregó la mayor parte de su energía en las turbinas, que sale casi agotado de las mismas y se conduce hacia el proceso industrial transformándose así en vapor de proceso. La cantidad de vapor de escape es la misma que el vapor producido en las calderas, solo que de menor presión y temperatura. Este vapor constituye la razón número uno por la que el proceso se convierte en cogeneración. Comúnmente, el proceso industrial es el que determina qué cantidad y presión de vapor de escape se necesita; la producción de energía eléctrica por cogeneración está estrechamente ligada a este requerimiento, es decir, si el proceso industrial disminuye o se detiene, también deberá disminuir el proceso de cogeneración de energía eléctrica y, por consiguiente de energía térmica primaria en las calderas. De otra manera, el vapor de escape tendría que tirarse a la atmósfera perdiéndose para siempre.

Generación de energía eléctrica

La energía eléctrica es producida en los turbogeneradores; el vapor principal generalmente sobrecalentado, proveniente de las calderas ingresa a la turbina en la cual la energía se transforma de energía térmica a trabajo mecánico: La turbina gira rápidamente acoplada a un generador eléctrico que a la vez produce una corriente eléctrica; esta corriente es transformada y conducida a los equipos eléctricos del proceso de fabricación de azúcar y del mismo proceso de generación de energía. Los excedentes de electricidad son conducidos a la red eléctrica nacional para ser distribuida por empresas externas.

Transformación de energía mecánica a eléctrica: La turbina es una máquina rotativa de alta velocidad; se necesita que una fuerza motriz la haga girar y esa energía la aporta el vapor generado en la caldera, que es conducido por tuberías

de acero y admitido dentro de la turbina de forma controlada por medio de válvulas de admisión que, automáticamente controlan el flujo de vapor de acuerdo con la regulación de carga eléctrica de la máquina. El vapor que ha ingresado a la turbina pasa por la placa de toberas, encargada de distribuir inicialmente el vapor sobre todos los álabes de la primera rueda de la turbina, y así sucesivamente el vapor pasa impulsando a todas las ruedas de la turbina, en cada etapa el vapor pierde parte de su presión, temperatura y velocidad. La turbina está acoplada a un generador eléctrico, por lo tanto el generador gira junto con la turbina; en algunas unidades existe un reductor de velocidad acoplado entre la turbina y el generador. El trabajo que el vapor hace en la turbina se manifiesta como energía mecánica de alta rotación; el rotor del generador gira dentro de un estator fijo que le rodea y por efecto del campo magnético entre ellos se establece una corriente eléctrica de alto voltaje.

Utilización de la energía eléctrica: La energía eléctrica que fluye desde el generador, es conducida a transformadores que suben o bajan el voltaje de la corriente, dependiendo del uso posterior. La energía eléctrica de menor voltaje es enviada a los diferentes procesos industriales para cubrir todas las necesidades de energía eléctrica internas de la planta, tales como iluminación, aire acondicionado, potencia para mover equipos mecánicos, eléctricos y controles electrónicos.

La energía eléctrica es transformada a mayor voltaje, generalmente a 69,000 ó 230,000 Voltios y 60 Hz, con el fin de poder sincronizar con la red eléctrica nacional y vender los excedentes producidos. Paralelamente, en la turbina se está descargando vapor de escape que constantemente fluye hacia el proceso industrial, así termina y se mantiene el ciclo de la cogeneración.

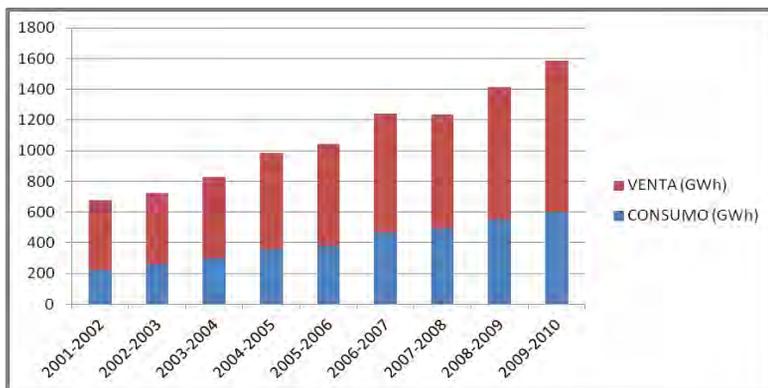


Figura 7. Venta y consumo de energía eléctrica de los ingenios cogeneradores

En la Figura 7, se ilustra el aumento de la generación de energía eléctrica de los ingenios cogeneradores, pero también se ve cómo ha incrementado el consumo interno de los mismos, en parte, por la electrificación de los tándems de molinos, este consumo representa oportunidades de mejora que se pueden monitorear a través del uso adecuado de índices de eficiencia energética.

ÍNDICES DE EFICIENCIA

La eficiencia energética de una central cogeneradora de un ingenio azucarero se mide básicamente a través de los índices de consumo de vapor, generación excedente y generación de vapor. Estos índices se expresan como:

- Consumo específico de vapor en el proceso (Kg_v) por cada tonelada de caña molida (T_c). Si disminuye el consumo de vapor en el proceso, se tendrán mayores excedentes de combustible y se amplía el rango de fechas operativas de la planta cogeneradora.

$$\text{Consumo de vapor} = Kg_v / T_c$$

- Índice específico de generación de electricidad excedente, expresado en KWh de electricidad excedente (no es considerado el consumo interno) por tonelada de caña molida (T_c). A mayor excedente de energía eléctrica mayores ingresos por aumento del volumen de venta a la red eléctrica nacional.

$$\text{Generación excedente} = KWh/T_c$$

- Índice de generación de vapor, representa los kg de vapor generados en la caldera por cada kg de bagazo utilizado como combustible.

$$\text{Generación de bagazo} = Kg_v / Kg_b$$

Representa el rendimiento del ciclo del proceso cogenerador; a menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos.

COSTOS

Para contabilizar los costos de la cogeneración, primero se establece el costo del combustible-bagazo que tiene un costo correspondiente a la energía consumida en el proceso de extracción; deben agregarse los costos operativos (personal y

mantenimiento), el costo de insumos químicos para tratamiento de agua y el costo de la energía eléctrica consumida para los equipos propios de la planta cogeneradora.

Para establecer los costos de la cogeneración primero se debe distribuir y diferenciar los costos asociados a los diferentes procesos:

- El costo de producción de la energía eléctrica
- El costo de la extracción de azúcar y todo el consumo energético del proceso
- El costo del vapor de escape consumido en el proceso industrial

Segundo, se define la manera de asignar costos del combustible atribuidos a cada consumidor de energía del proceso, en la medida de lo posible, esta asignación de costo debe hacerse en base a saltos de entalpía, es decir, que debe ponderarse la energía de acuerdo con su capacidad de aportar trabajo en el punto donde es demandada.

GLOSARIO

Biomasa: Masa integrada por componentes biodiversos con características de combustibilidad. Para el presente caso se refiere a la masa sujeta de combustión en los ingenios, basada en bagazo de caña.

Potencia eléctrica: Para un generador, la potencia es la medida de la capacidad de la planta de producir energía eléctrica, es la cantidad de energía eléctrica que dispone una planta para entregar a sus clientes. Para un consumidor, es la medida de la cantidad de energía eléctrica que necesita para operar o la cantidad de energía eléctrica que demanda de su proveedor.

Energía eléctrica: Se denomina así a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos.

Picadoras y molinos: Equipo que prepara, desmenuza y extrae el jugo y el bagazo de la caña de azúcar.

Zafra: Periodo del año en que se cosecha, transporta, muele y procesa la caña de azúcar para la fabricación de dicho producto.

Caldera: Generador de vapor que utiliza el calor emanado por la quema de un combustible para producir vapor de agua a determinada presión y temperatura.

Turbina: Máquina rotativa en la que se utiliza el vapor para transformar la energía térmica a mecánica. Si está acoplada a un generador se genera paralelamente energía eléctrica, y al conjunto combinado se le denomina TURBO-GENERADOR

Acuotubular: Caldera que utiliza una gran cantidad de tuberías dentro de las cuales circula agua, esta al recibir una transferencia de calor se evapora.

Vapor principal: Vapor generado en las calderas acuotubulares para el uso posterior y exclusivo en turbinas.

Vapor de escape: Vapor que se descarga en la etapa final de las turbinas, y del cual aún se puede aprovechar energía en un proceso industrial posterior.

AMM: Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala, ente encargado de coordinar las transacciones entre los agentes del sector de energía eléctrica del país.

BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. 2011. Informe Estadístico 2010. Guatemala. 32 p.
2. Agüero, C.; Pisa, J.; Andina, R. 2006. Consideraciones sobre el aprovechamiento racional del bagazo de caña como combustible. Perú. 8 p.
3. Batres, Luis. 2008. Beneficios económicos de instalar una planta cogeneradora de energía en Guatemala. España. 89 p.
4. Castillo, Leonidas. 2010. Resultados zafra 2009-2010. Presentación de la Asociación de cogeneradores independientes. Guatemala, CENGICAÑA.
5. Hugot, E. 1964. Manual para Ingenios Azucareros. USA.
6. Kenneth Wark, Jr. 1996. Termodinámica. Quinta Edición. Editorial McGRAW-HILL. pp. 783-787.
7. Logan, Christel. 2008. Régimen jurídico aplicable a la actividad de generación de energía eléctrica en el ordenamiento jurídico guatemalteco. Guatemala. 134 p.

8. Spiewak, Scott A. 1987. Cogeneration & Small power production manual. USA. The Fairmont Press, INC. 642 p.
9. Vargas, Luis; La Fuente, Fernando. 2000. Cogeneración en Chile. Potencialidad y desafíos. Revista Chilena de Energía. Volumen 430. pp. 1-4.

PRODUCCIÓN DE ETANOL

Rodolfo Espinosa y Claudia Ovando*

INTRODUCCIÓN

El etanol o alcohol etílico es un hidrocarburo natural, de fórmula general C_2H_5OH que en la nomenclatura química es un derivado del etano (C_2H_6). Industrialmente se produce mediante el proceso de fermentación de la glucosa, carbohidrato monomérico presente en la sacarosa y en otros compuestos poliméricos como el almidón y la celulosa. Las mieles intermedias o finales que se producen en los ingenios azucareros son ricas en glucosa o en sacarosa, que mediante la hidrólisis ácida pueden convertirse en una mezcla de glucosa/fructosa, que a la vez se transforma en etanol, mediante las reacciones de glicólisis catalizadas por enzimas producidas por microorganismos como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

El proceso industrial de producción de etanol consiste en tres etapas perfectamente definidas: 1) Reacciones bioquímicas, producto del metabolismo de los microorganismos utilizados para el efecto, que transforman los azúcares fermentables en alcohol etílico, como producto principal y otros subproductos metabólicos o residuales que dependen de la pureza de la materia prima utilizada y de las condiciones ambientales en las que se lleva a cabo la reacción. 2) Separación del producto deseado (etanol) del resto de compuestos presentes en el mosto fermentado y concentración del mismo para reducir su volumen para su manejo posterior. El método generalizado es mayormente por destilación –separación de componentes– en virtud de su volatilidad relativa y sus diferentes temperaturas de ebullición y condensación y por otras operaciones unitarias como extracción, adsorción, etcétera. 3) El tratamiento, disposición y aprovechamiento de los subproductos separados mediante la destilación. Esta última etapa ha cobrado vital importancia recientemente para el mejor aprovechamiento de recursos y la protección del ambiente.

* Rodolfo Espinosa es Ing. Químico, Ph.D., Coordinador de Programa de Investigación Industrial de CENGICANA. www.cengicana.org; Claudia Ovando es Ing. Química, M.Sc. Jefe de Laboratorio de Procesos, Bio etanol, S.A. (Grupo Pantaleón) www.pantaleon.com



Figura 1. Producción de etanol

El etanol, como producto de fermentación se ha utilizado por más de 40 siglos, principalmente como bebida embriagante, en los últimos 200 años se le encontraron otros usos industriales, medicinales y recientemente, en los últimos 40 años, como combustible automotor debido a los altos precios del petróleo.

Usos del etanol

- Bebida embriagante
- Solvente para perfumería y otros
- Medicina (antiséptico al 85%)
- Reactivo industrial
- Combustible
- Combustible para motores de 4 tiempos
- Otro

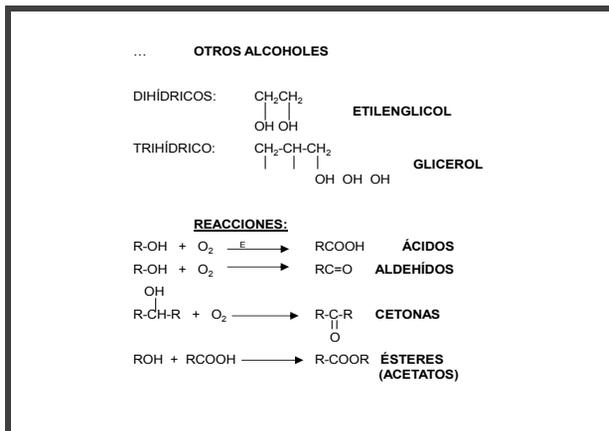
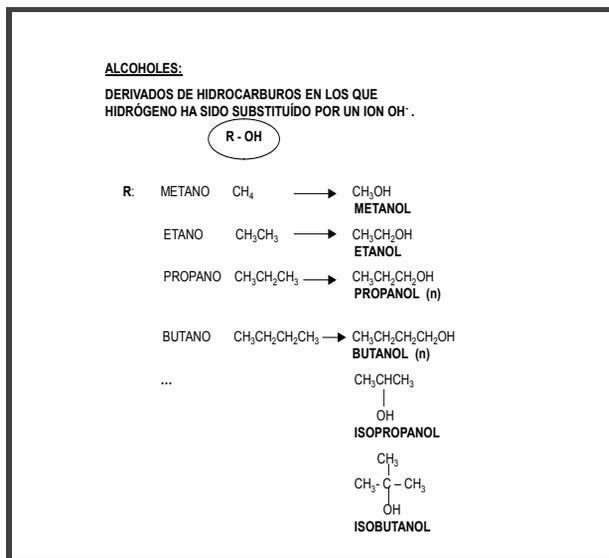


Figura 2. Alcoholes y sus reacciones

RESEÑA HISTÓRICA

La producción de etanol en Guatemala se inició posiblemente en la era precolombina con la fabricación de bebidas embriagantes, producidas en

núcleos familiares, a partir de frutas y posiblemente maíz. En la época colonial, con la importación de la caña de azúcar, eventualmente se utilizó panela como materia prima y su producción comenzó a ser regulada para propósitos fiscales, a mediados del siglo XIX, de manera que las incipientes destilerías, que producían de forma artesanal con tanques de fermentación de madera y alambiques de cobre, se instalaban en las inmediaciones de la Administración de Rentas de cada departamento de Guatemala, para su mejor control fiscal.

A mediados del siglo pasado, los fabricantes de panela y miel virgen (guarapo concentrado a 45-60 Brix) y los productores de alcohol se unieron para instalar una central de producción y añejamiento en Santa Lucía Cotzumalguapa, ya con una infraestructura más industrial que artesanal. Los trapiches de aquella época y los ingenios azucareros eran los proveedores de las materia primas (miel virgen para alcohol “potable” y melaza para alcohol industrial (Circa, 1960). La producción anual de alcohol en Guatemala era de aproximadamente 5 millones de litros de etanol, mayormente para consumo en bebidas alcohólicas. En las siguientes dos décadas la producción fue aumentando a 15 millones, luego a 30 millones por año y, posteriormente, a una capacidad instalada de 40 millones de litros por año y surgieron dos destilerías más, una de ellas anexa, por primera vez, a un ingenio azucarero.

Actualmente la caña de azúcar se siembra en Guatemala en 230,000 hectáreas de terrenos planos de la costa sur y algunas pequeñas regiones en el oriente y nororiente del país. El rendimiento promedio es de 100 t de caña/hectárea. Se muelen alrededor de 20 millones de t de caña/año con un rendimiento promedio de 0.1 t de azúcar/t de caña molida. Con la cantidad de caña que se siembra actualmente en Guatemala podrían producirse anualmente entre 360 millones de galones de etanol, si no se produjera azúcar, y 55 millones de galones si solo se procesara la melaza. La capacidad instalada actual para producir etanol a partir de melaza es de aproximadamente 40 millones de galones anuales en cinco destilerías aldedañas a ingenios azucareros.

El consumo anual de gasolina en Guatemala, toda importada, es de 150 millones de galones. Si ya existiera la legislación necesaria, el etanol anhidro, mezclado con la gasolina en una proporción del 10 por ciento, podría sustituir al MTBE (metil - terbutil - éter) que se incorpora a la gasolina como antidetonante, sin hacer modificación alguna a los vehículos en circulación. La producción actual de etanol a partir de melaza es suficiente para dicha sustitución sin afectar la producción de azúcar. Cualquier excedente en la producción puede exportarse para generar divisas, como se hace actualmente con el azúcar.

DESTILERÍA ANEXA A UN INGENIO

Con el aumento del precio del petróleo y sus derivados (i.e. gasolina), las destilerías independientes, cuya materia prima principal es melaza proveniente de ingenios azucareros, el precio del Combustóleo No.6, conocido también como Bunker C, hizo prohibitiva la generación de vapor dentro de la destilería, como fuente de calor para el proceso de destilación. Al mismo tiempo, la cogeneración de energía dentro de los ingenios hizo muy atractiva la instalación de destilerías anexas a los mismos, ya que puede aprovecharse el vapor de escape de las turbinas, se acorta la distancia para el transporte de mieles, se aprovechan los condensados del ingenio como agua de proceso y se cuenta con toda la infraestructura del ingenio para proveer otros servicios a la destilería. La principal desventaja es que la producción en la destilería queda parcialmente supeditada a la temporada de zafra. Sin embargo, con el auge de las calderas a carbón que se está implementando en los principales ingenios, la temporada de producción puede extenderse considerablemente. Es importante hacer notar que dicha anexión ha traído una transición cultural en la operación de las destilerías, ya que algunos términos técnicos utilizados en la producción de azúcar tienen diferente significado para los operadores de las destilerías y viceversa; lo que es relevante para unos, no lo es para los otros.



Cortesía de Grupo Pantaleón, S.A.

Figura 3. Destilería de etanol anexa a un ingenio azucarero

Secciones principales del proceso de producción de Etanol

- Preparación de materia prima; fermentación; destilería; manejo de Vinaza y Servicios

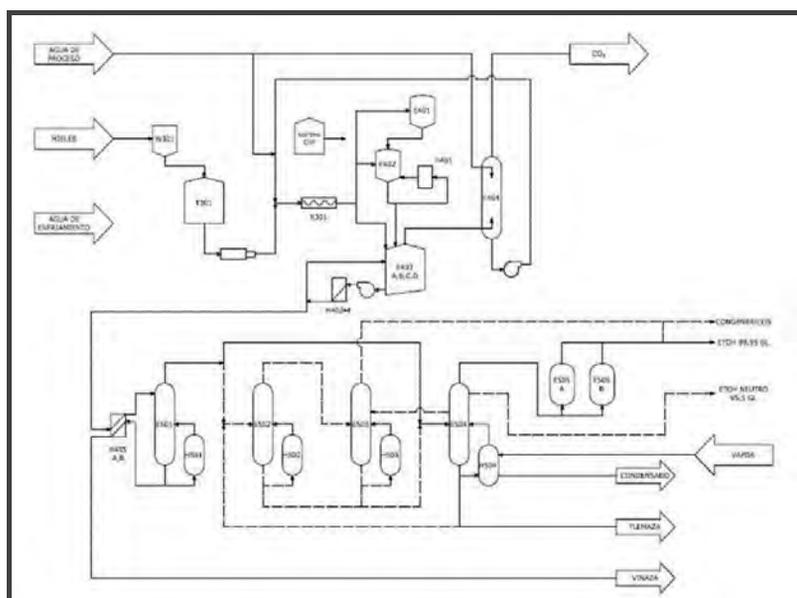


Figura 4. Diagrama del proceso típico de una Destilería

PROCESOS UTILIZADOS

Materia prima

La molienda de la caña produce jugo con 13 por ciento de azúcares, que se filtra y se concentra por evaporación para obtener “meladura”, con un contenido de 65 por ciento de azúcares (sacarosa, fructosa, glucosa y otras). La meladura se somete a un proceso de evaporación/cristalización de la sacarosa (azúcar de mesa) que se separa por centrifugación consecutiva de las mieles A y B. La miel final o miel C, más conocida como melaza, tiene un contenido promedio de 50 por ciento de azúcares fermentables (típicamente

33 por ciento de sacarosa, 9 por ciento de glucosa y 8 por ciento de fructosa). La producción de melaza es de 0.03 t/ t de caña molida, es decir, 0.24 t de melaza/t de azúcar producida.

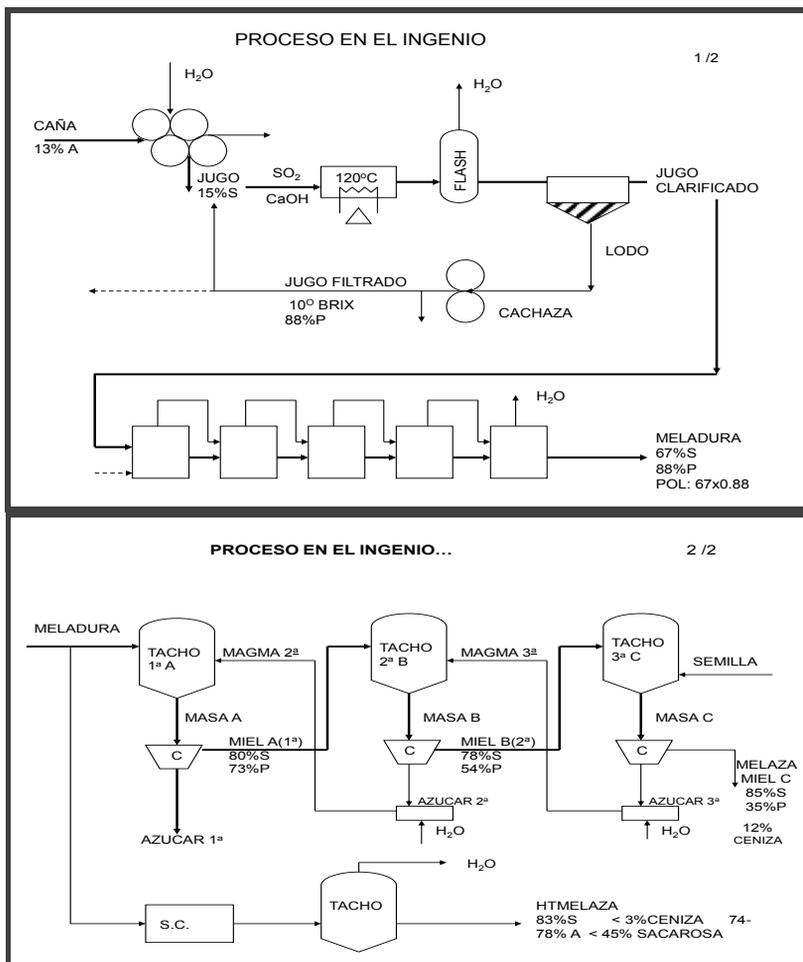


Figura 5. Proceso de producción de mieles en un ingenio

Dicha melaza constituye actualmente la materia prima para la producción de alcohol etílico o etanol, sin embargo, éste podría producirse usando como materia prima cualquier fracción del proceso de fabricación de azúcar: jugo, jugo concentrado, miel A o miel B, dependiendo de factores

económicos y del mercado de ambos productos. Obviamente, las condiciones de operación y los rendimientos en la producción varían según la materia prima utilizada.

En la Figura 6, se puede apreciar la clasificación general de los carbohidratos, dentro de los cuales se cuentan los azúcares. Es necesario hacer notar que no todos los azúcares pueden ser transformados en alcohol a través de la glicólisis, que, como su nombre lo indica, parte de la molécula de glucosa. Los azúcares contenidos en el jugo de la caña y los jugos concentrados o mieles, son mayormente sacarosa, que tiene que ser convertida a glucosa mediante hidrólisis ácida (pH 4.5) y catalizada artificial o naturalmente con hidrolasa. La hidrolasa es producida por la levadura (*Saccharomyces* sp.) y se separa y concentra industrialmente para aplicarla como catalizador de la reacción llamada “inversión de la sacarosa”, en la producción de “miel invertida” o High Test Molasses (HTM), con alto contenido de glucosa (no cristizable).

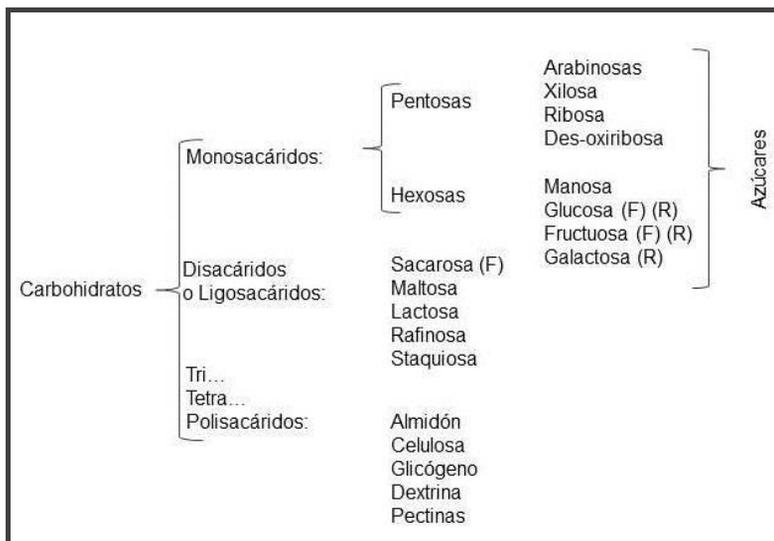


Figura 6. Clasificación de los carbohidratos

En la producción de etanol a partir de derivados de caña de azúcar se utilizan las siguientes expresiones:

- Azúcares fermentables: azúcares que pueden ser transformados o degradados directamente por microorganismos.

- Azúcares reductores: azúcares que reducen al reactivo de Fehling.
- No todos los azúcares reductores son fermentables.
- No todos los azúcares fermentables son reductores.
- Sin embargo, los azúcares fermentables son, en su mayoría, reductores (98% aprox).
- La sacarosa no es fermentable como tal y no es reductora, pero cuando se hidroliza, se convierte en glucosa/fructosa que son fermentables y reductores.

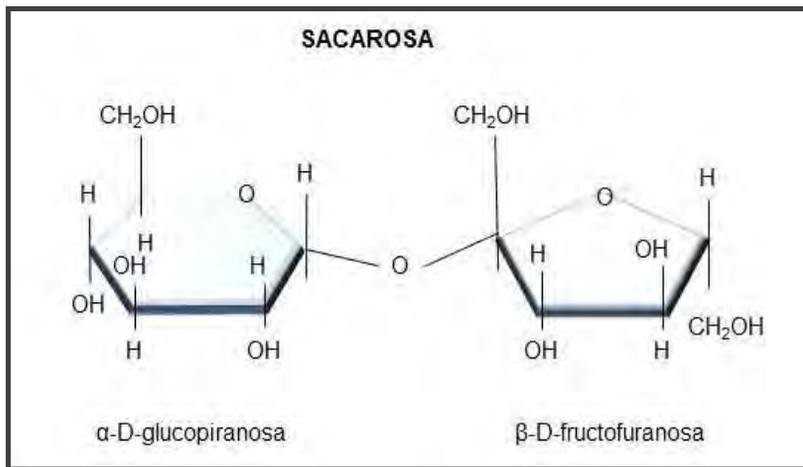


Figura 7. Estructura de la sacarosa

Fuente: www.perafan.com

Para los operadores de destilerías, el contenido de glucosa es lo más importante. El total de azúcares reductores es un indicador muy aproximado del contenido de azúcar fermentable. La sacarosa como tal no es fermentable, pero al hidrolizarse el complejo glucosa-fructosa equivale a dos moléculas de glucosa disponibles para su conversión a etanol y dióxido de carbono.

El valor de Brix en la fermentación, aunque es un indicador que se puede obtener rápidamente, es una medida de los sólidos totales, no de los azúcares fermentables de la solución de melaza. Además, dicho contenido de sólidos y el de azúcares fermentables varía de manera constante, de un día para el siguiente y hasta de hora a hora, dependiendo de una serie de factores como el origen y la variedad de la caña, el avance de la temporada de la zafra, la eficiencia del ingenio, las condiciones del almacenamiento de la melaza, etc. Por lo que la determinación del Brix como un parámetro para caracterizar y predecir resultados de fermentación es inexacto, al igual que la determinación de azúcares reductores y ambos métodos han caído en desuso con el advenimiento

de la cromatografía líquida de alta precisión (HPLC), que ofrece resultados rápidos, precisos y desglosados de sacarosa, glucosa, fructosa, ácidos orgánicos y etanol.

La Figura 8, muestra las variaciones del contenido de azúcar respecto del Brix en varias muestras de melazas.

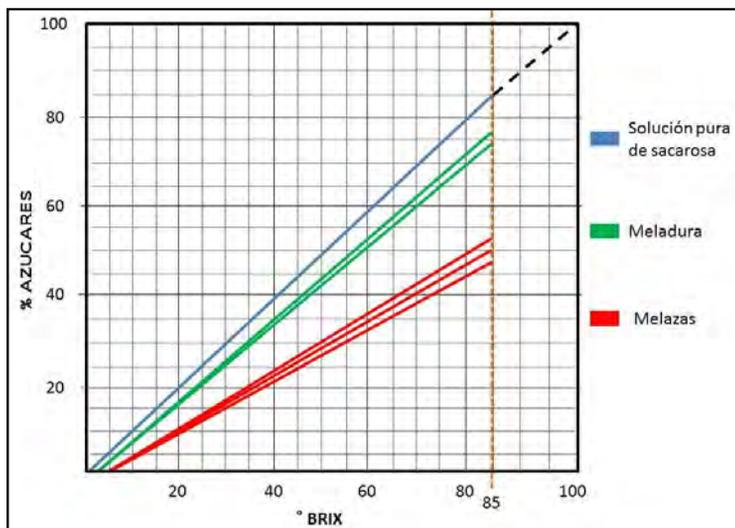


Figura 8. Relación entre concentración de azúcares y grados Brix

Microbiología

La producción de alcohol es un proceso multidisciplinario basado en la química, bioquímica y microbiología. En el pasado la producción del alcohol era considerado un arte y fue hasta hace 150 años que describió la ciencia de la fermentación alcohólica. Al tratar el proceso conociendo sus bases científicas, es posible obtener menor cantidad de problemas microbiológicos y de ingeniería y con ello mejores resultados de operación y aprovechamiento de la materia prima (Ingledew, ATB). Conocer los aspectos microbiológicos en la fermentación alcohólica es medular, ya que en la reacción son actores principales la levadura y los demás microorganismos competidores (contaminación bacteriana).

La levadura es un hongo (eumyceto) unicelular. Generalmente se reproduce por gemación; por ser microorganismos unicelulares crecen y se reproducen más rápido que los mohos filamentosos y en proporción a su peso, son más aptas para efectuar cambios químicos debido a que tienen mayor área superficial en relación a su volumen. Se diferencian con facilidad de la mayor parte de bacterias por su tamaño relativamente grande (Pelczar, 1982). Difieren en tamaño y forma, pueden medir de 1-5 μm de diámetro.

La levadura más utilizada en los procesos comunes de fermentación alcohólica es la cepa *Saccharomyces cerevisiae* (levadura de panificación).

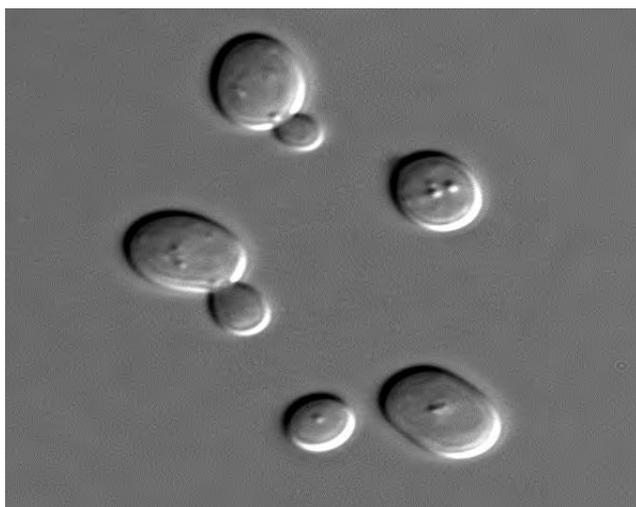


Figura 9. Cepa *Saccharomyces cerevisiae*

El alcohol se produce mediante el metabolismo de los azúcares por la levadura. En condiciones aeróbicas (presencia de aire) se promueve la reproducción de levadura y en condiciones anaeróbicas (ausencia de aire) ocurre la reacción de fermentación, ambas reacciones comienzan de la misma manera y su tronco común es la glucólisis (reacciones sucesivas para la conversión de glucosa en energía mediante reacciones enzimáticas). Durante esta conversión de la glucosa se obtienen como coproductos alcohol etílico, dióxido de carbono y en menor cantidad glicerol, y algunos ácidos orgánicos.

Unas de las enzimas que participan en la fermentación son la diastasa, invertasa o hidrolasa y la zimasa, esta última es la responsable final de dirigir la reacción bioquímica que convierte la glucosa en etanol.

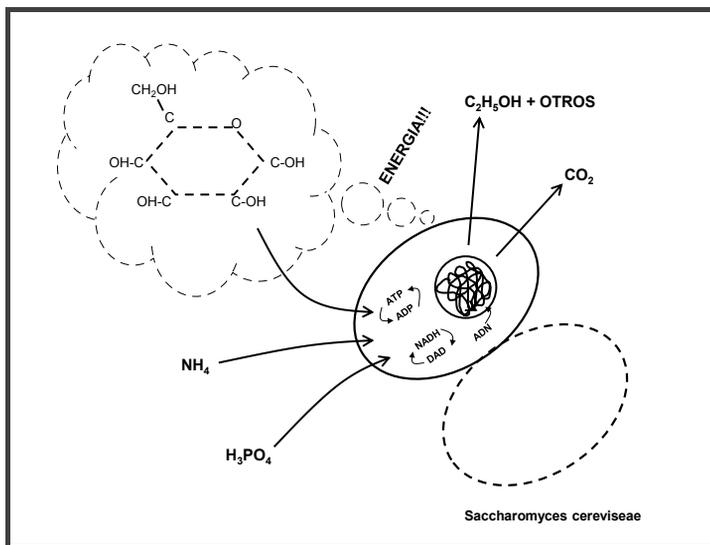


Figura 10. Metabolismo de *Saccharomyces cerevisiae* en la producción de ETOH

En la Figura 10, puede observarse el progreso de las reacciones bioquímicas de conversión de azúcares en etanol; es importante notar que junto con la producción de etanol se obtiene dióxido de carbono, biomasa de levadura y en menores cantidades glicerol, alcoholes superiores, aldehídos y cetonas. Estas reacciones usualmente pueden transcurrir en el rango de 45 a 60 horas.

Fermentación

Fundamentos de fermentación: Reacción de transformación/degradación de materia orgánica catalizada por enzimas producidas intracelularmente o exocelularmente, de forma controlada o no, para producir protoplasma celular, metabolitos deseados o no, reproducción de microorganismos, en presencia o en ausencia de aire.

El azúcar contenida en las mieles diluidas a la concentración adecuada es convertida principalmente en alcohol etílico, mediante la fermentación, una serie de reacciones catalizadas por enzimas producidas por microorganismos (Levadura, *Saccharomyces* sp.), siguiendo la ruta bioquímica de la glucólisis. Dicha ruta describe las reacciones que sucederían si el sustrato fuera una solución pura de glucosa. Pero cuando el sustrato es una solución de melaza o de mieles intermedias provenientes de la caña de azúcar, que además de azúcares fermentables contienen una gran variedad de compuestos (se han

identificado más de 200), éstos pueden reaccionar bajo las condiciones ambientales del proceso de fermentación y dar lugar a otros subproductos, tales como metanol, cetonas, aldehídos, ácidos orgánicos (pirúvico, succínico, acético) y alcoholes superiores con más de tres carbonos en su composición (propanol, butanol, pentanol, etc). Este grupo de alcoholes, muy afines entre si y con propiedades fisico-químicas muy similares, se conocen colectivamente como “Aceite de fusel” por su apariencia aceitosa y por su poca afinidad con el agua.

Para propósitos de cálculos preliminares y estimaciones de rendimiento en planta, la reacción básica que se utiliza es la siguiente:

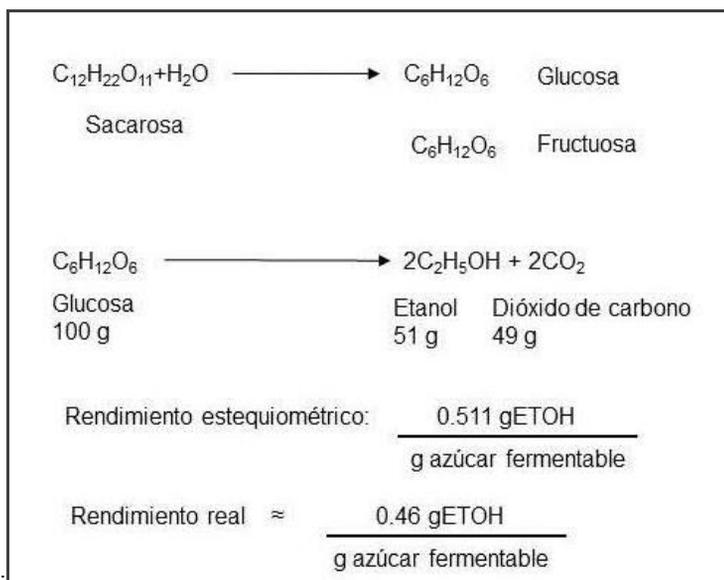


Figura 11. Producción de etanol (reacción básica)

El rendimiento real es más bajo por la formación de otros compuestos como se describió en el párrafo anterior, además de la cantidad de masa celular de levadura que se permita reproducir. La optimización del valor de rendimiento depende de la calidad de la materia prima, del proceso que se adopte y las condiciones de operación del mismo.

En general, es importante notar que:

- En presencia de aire (respiración) y con nutrientes (nitrógeno, fósforo y elementos traza) la levadura se reproduce más.
- En ausencia de aire (fermentación) y con nutrientes limitados (que limitan a su vez la formación de ADN y ARN) la levadura se reproduce mucho menos, y en su metabolismo de mantenimiento produce etanol, y otros compuestos.
- La exposición de la levadura a altas concentraciones y periodos prolongados de etanol y CO_2 disminuyen su viabilidad.
- Un inóculo masivo tiene más posibilidades de lograr la eficiencia deseada en el proceso en un cultivo no aséptico, es decir, en competencia con contaminación bacteriana.
- La especie escogida de microorganismo (*S. sp.*) reacciona de acuerdo con las condiciones ambientales que le rodean (i.e. pH, temperatura, concentración relativa de sustrato, reología).
- La glucólisis, para producción de etanol, es una reacción exotérmica, por lo tanto hay que remover el calor generado dentro del reactor para mantener la temperatura dentro del mismo lo más cercana al valor óptimo que favorezca a la especie de levadura escogida (i.e. 33°C).

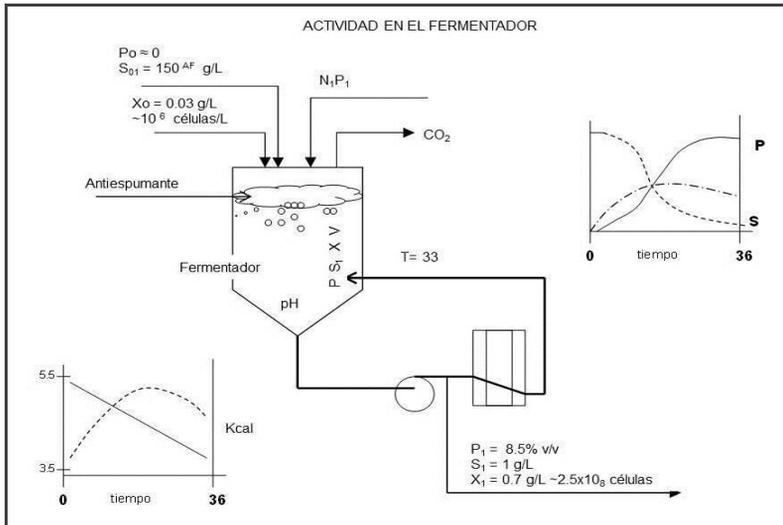


Figura 12. Actividad en el fermentador

En la Figura 13, puede observarse el progreso de las reacciones bioquímicas de conversión de azúcares en etanol y masa celular de levadura. Estas reacciones, bajo condiciones normales pueden completarse en periodos de 24 a 60 horas, dependiendo de la concentración inicial de azúcares fermentables. Pero es importante notar que las variables que caracterizan la fermentación varían con respecto al tiempo a diferentes tasas (diferentes pendientes) pudiéndose diferenciar claramente tres etapas, a saber:

- 1) Periodo de adaptación del inóculo de levadura a las condiciones iniciales y auto ajuste del ambiente propicio. A nivel industrial esto ocurre en el reactor denominado “Propagador” bajo condiciones aeróbicas y lo más asépticamente posible.
- 2) Periodo de crecimiento exponencial. Con las condiciones óptimas, la levadura se reproduce y desarrolla su actividad metabólica con una pendiente constante. Dicha actividad se aprovecha en el “pre-fermentador” que es un equipo para efectuar la transición entre la etapa aeróbica y la anaeróbica.
- 3) Periodo de estabilización y muerte. Ocurre en el fermentador principal con el inóculo inicial en su fase exponencial y con el máximo volumen de sustrato. La actividad metabólica disminuye gradualmente, a medida que la concentración de sustrato disponible se hace menor la concentración de metabolitos aumenta, hasta que la fuente de energía y nutrientes se agota, causando la muerte o la inhibición de los microorganismos.

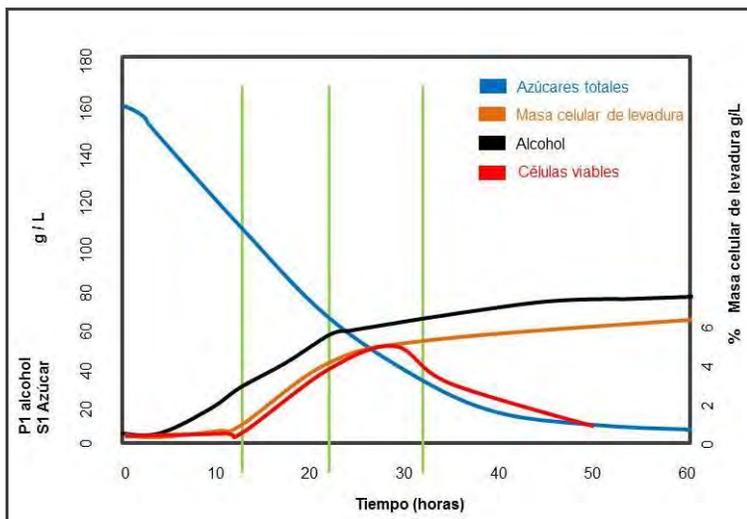


Figura 13. Progreso de la reacción de fermentación

La Figura 14, se puede fraccionar en tres etapas bien definidas:

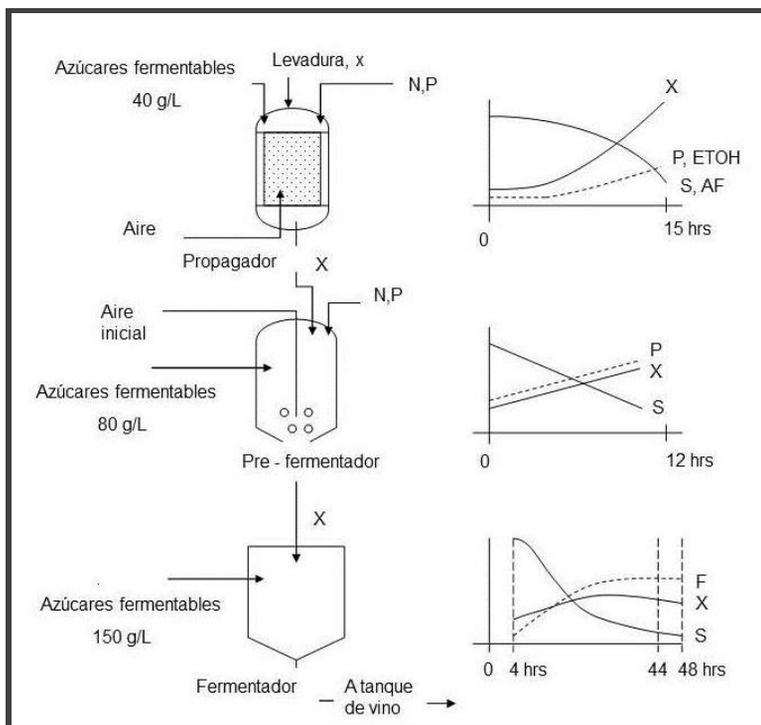


Figura 14. Fraccionamiento (secuencia) de la fermentación

Fermentación por tandas: En la fermentación por tandas, por lotes, discontinua o “batch”, un volumen definido de solución de melaza se carga a un tanque/reactor o fermentador, junto con los nutrientes necesarios y el inóculo de levadura necesario para iniciar la reacción. El inóculo se prepara previamente, partiendo de una cepa pura de levadura desde el laboratorio y propagándola en fracciones incrementales, hasta alcanzar entre el 5 por ciento y 10 por ciento del volumen total. Algunas destilerías han optado por comprar el inóculo ya reproducido en forma de levadura comercial fresca o seca y agregarlo directamente a alguna de las etapas finales previas al fermentador. Con esto se evitan riesgos de contaminación y se ahorra el costo en equipo y proceso de reproducción/propagación. Después de transcurrido el tiempo necesario para agotar todo el azúcar y obtener el máximo de concentración de etanol, la tanda

se da por terminada y se transfiere el volumen total del fermentador al proceso de destilación.

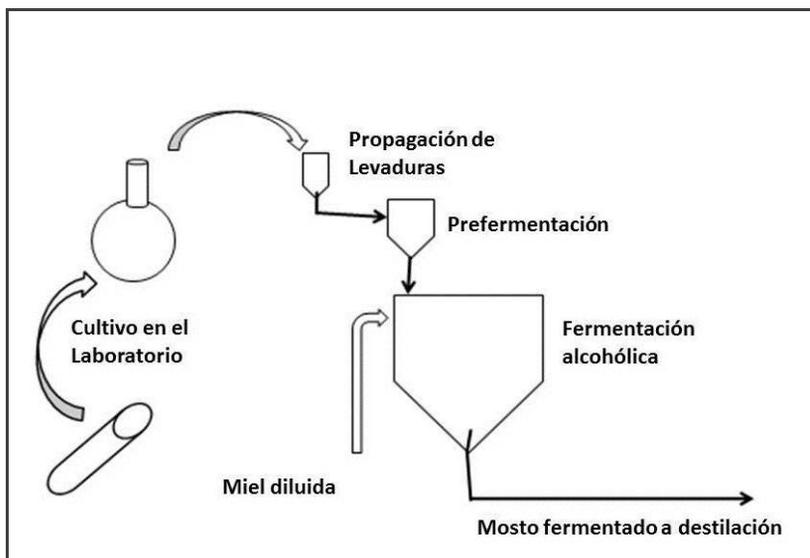


Figura 15. Fermentación por tandas

Fermentación por tandas con reuso de levadura: En este caso, después del batch inicial, se separa una fracción de la levadura mediante centrifugación, se lava con agua limpia, y se somete a un tratamiento a pH bajo (2.5–3.5) para forzar a las células a protegerse naturalmente fortaleciendo su pared celular y hacerse más resistente. La crema de levadura así tratada constituye el inóculo para el siguiente batch, de manera que se debería utilizar menos azúcar para formar protoplasma de levadura, dejando aquel disponible para la formación de etanol y aumentar el rendimiento de la fermentación. El sobrenadante de la centrifugación, que contiene el alcohol del lote completo, se transfiere al proceso de destilación. Este proceso se repite sucesivamente hasta que se determina que la crema de levadura ya no está en óptimas condiciones y se inicia un nuevo ciclo. En Guatemala esta variante de proceso de fermentación ha caído en desuso porque requiere más energía, más insumos y más control, además de que no presentó ganancias significativas.

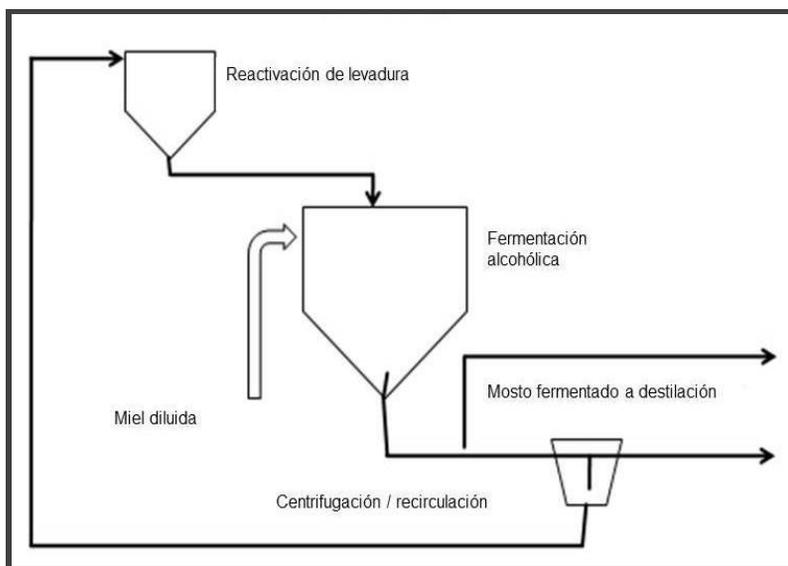


Figura 16. Fermentación por tandas con reuso de levaduras (Melle-Boinot)

Fermentación continua: En esta modalidad, un flujo continuo de solución de melaza se alimenta al reactor, mientras que del mismo se retira un flujo similar de mosto fermentado igualmente, en forma continua, estableciéndose un estado estacionario en el que dentro del reactor, la concentración de masa celular, de etanol y de azúcares es constante y en un delicado equilibrio. Como no puede permitirse que la concentración de azúcares baje al mínimo en detrimento de la viabilidad de la levadura, generalmente se envía el mosto en equilibrio a una segunda etapa de agotamiento de azúcares y máxima producción de etanol, para luego transferirse el mosto a destilación. Al observar las curvas de la cinética de la producción de etanol, se aprecia que hay dos etapas bien definidas que permiten diseñar adecuadamente los volúmenes de los reactores para ambas etapas. La fermentación continua requiere aún más control, y los riesgos de contaminación bacteriana son mayores, dado que no es económico esterilizar la solución de melaza previa a ser inoculada. Cuando se usa fermentación continua, se tiene claro que es continua pero no perpetua.

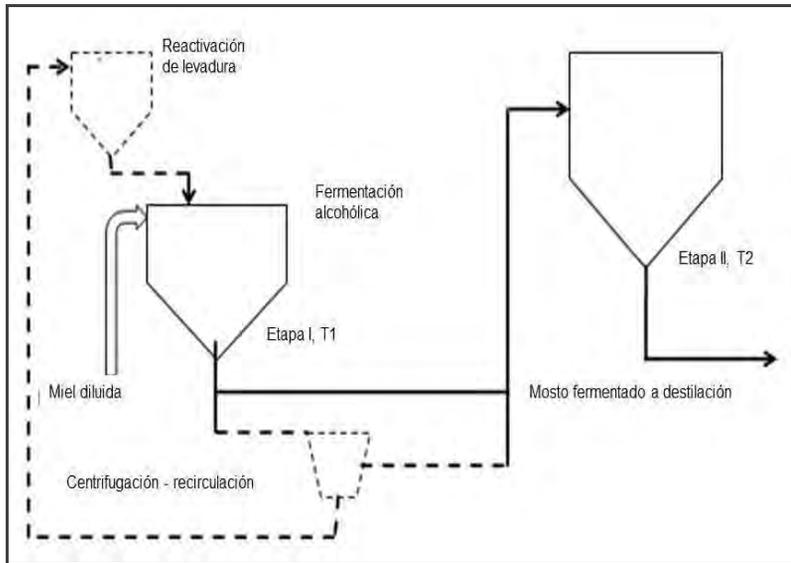


Figura 17. Fermentación continua

Fermentación discontinua con prefermentación continua: En esta forma de operar, una variante de la anterior se aprovecha al máximo la cinética de la fermentación alcohólica.

Se propaga la levadura una vez y se alimenta al pre-fermentador para desarrollar allí la fase logarítmica del crecimiento y de producción de etanol. La alimentación de solución de melaza o miel es continua. Al completarse el volumen, el cultivo se ha mantenido en su fase exponencial en óptimas condiciones y una parte del mismo (80%) se transfiere al fermentador final, al mismo tiempo que éste se llena. El 20 por ciento que permanece en el prefermentador sirve de inóculo para el mosto fermentable que se sigue alimentando continuamente, en preparación del inóculo para el fermentador subsiguiente y así sucesivamente. Con esto se logra mantener las curvas de fermentación en óptimo desarrollo y se acorta el ciclo total de fermentación, ya que durante el llenado, y hasta en el vaciado de los fermentadores, la fermentación sigue ocurriendo en su etapa correspondiente.

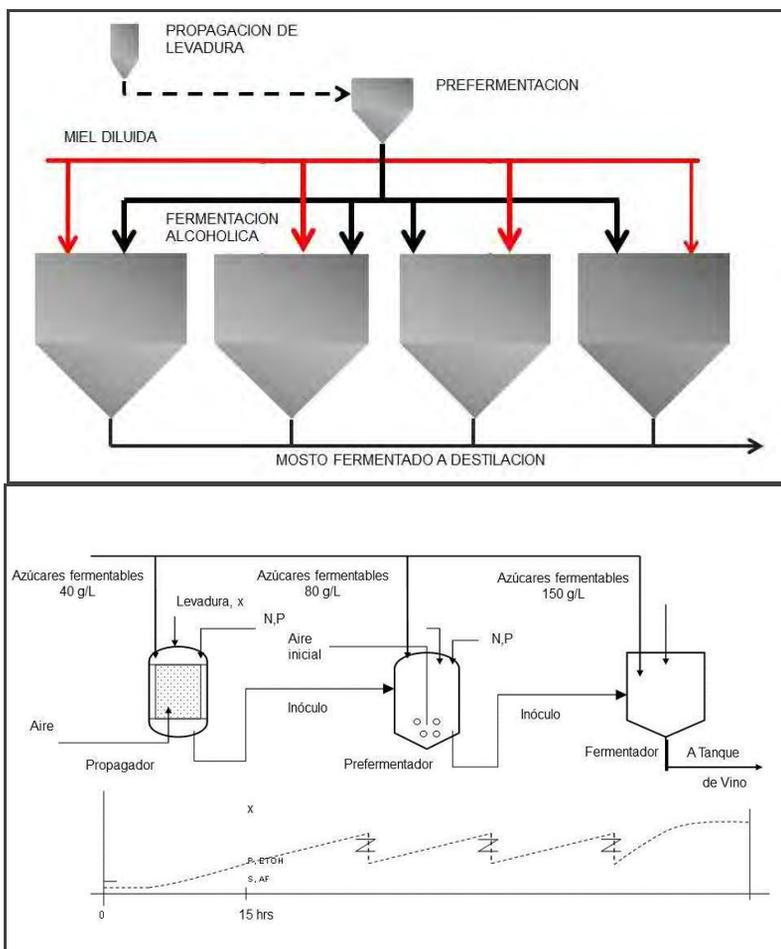


Figura 18. Fermentación por tandas con prefermentación continua

Otras consideraciones generales importantes:

- A menor concentración inicial de azúcares fermentables, mayor es la velocidad de reacción y más alto el rendimiento: $R = \Delta P / \Delta S$, pero menor volumen de producto.
- A mayor concentración inicial de azúcares fermentables y sólidos totales, más lenta la reacción, y más bajo el rendimiento pero más concentración de

producto P en el mosto final, y mayor productividad $P = R / \Delta t$, hasta cierto límite, propio de cada especie, como se aprecia en la Figura 19.

- Aunque se reportan valores de hasta 16 por ciento de alcohol en el mosto final, obtenidos en el laboratorio al final de 120 horas, para fines prácticos a nivel industrial se puede obtener 11 por ciento en volumen en un ciclo de 48 horas, con una eficiencia ($Eff = R_{real} \times 100 / R_{estequiométrico}$) de hasta 88 por ciento.

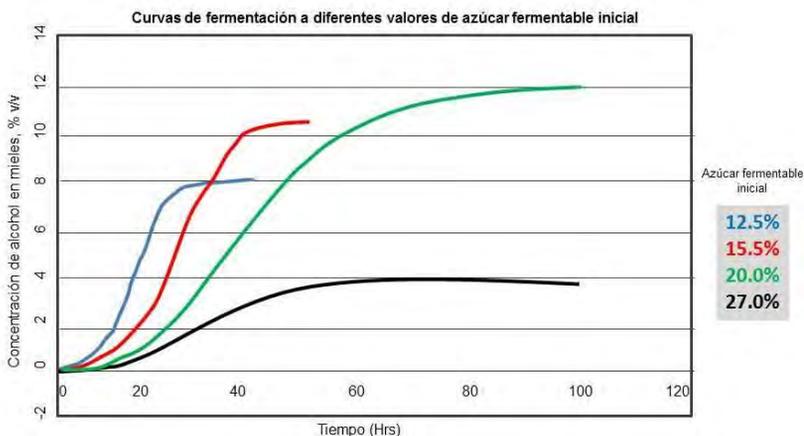


Figura 19. Curvas de fermentación

Destilación

Fundamentos de destilación: La destilación es un proceso físico de separación de dos o más compuestos con diferente peso molecular contenidos en una solución, en virtud de su volatilidad relativa y la diferencia de sus puntos de ebullición. Todos los compuestos, entre sus propiedades físicas tienen una temperatura de ebullición y de condensación que les corresponde a diferentes condiciones de presión y que son específicos para cada compuesto. Al aplicar una fuente de calor a una solución o mezcla de compuestos, se alcanza la temperatura de ebullición de cada uno de ellos y lo volatiliza, separándolo en forma de gas o vapor del otro u otros componentes que aún permanecen en la fase líquida. Industrialmente esto se lleva a cabo en equipos llamados columnas de destilación, diseñados para contener ambas fases.

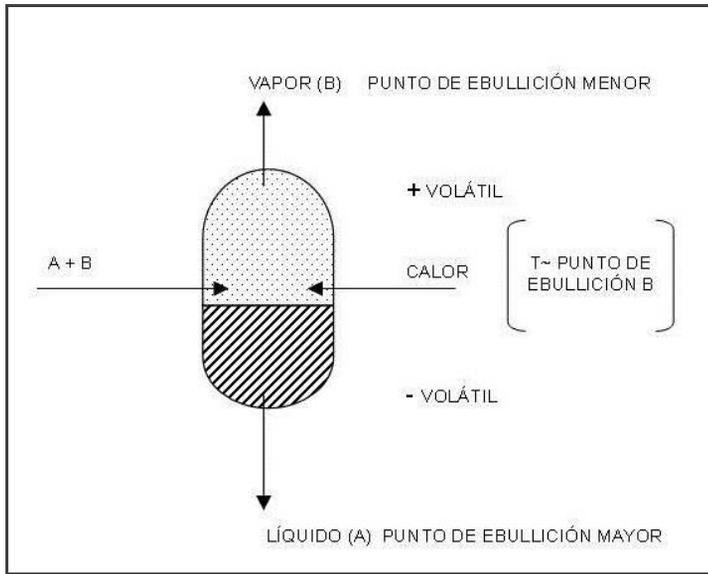


Figura 20. Separación de dos componentes por destilación

En una columna continua, el calor se aplica por el fondo, y la solución a destilarse se alimenta en la parte superior de la columna, de manera que los vapores del fondo suben enriqueciéndose del compuesto que se desea separar al ponerse en contacto con el líquido alimentado, al entrar ambos en contacto en el interior de la columna, que típicamente tiene “platos” o bandejas que facilitan ése contacto. El líquido que baja agota el contenido del producto a separar, sin alcanzar su propio punto de ebullición.

La fracción o fracciones más volátiles, que llegan a la parte alta de la columna, tienen que convertirse a la fase líquida otra vez para poderse recuperar y manejar adecuadamente. Esto se logra enfriando el producto en intercambiadores de calor llamados también condensadores. En la destilación con más de dos componentes como es el caso del etanol de derivados de caña, se pueden también separar fracciones muy afines entre sí en condensadores parciales. El producto deseado, libre de congéneres se recircula al plato más alto para enriquecer la fase líquida y extraerlo de ahí como producto final.

No todas las fracciones individuales pueden separarse en una sola columna de destilación, primero porque para grandes volúmenes de producción, una sola columna sería muy difícil de construir por razones estructurales. Luego, porque todos los productos de la fermentación son muy afines entre sí, de manera que

las porciones líquidas o gaseosas que están en equilibrio en cada plato son en realidad mezclas de varios componentes, que, para ser separados se necesitan otras condiciones termodinámicas y, en algunos casos, otras operaciones unitarias diferentes, como extracción, adsorción, decantación, etcétera.

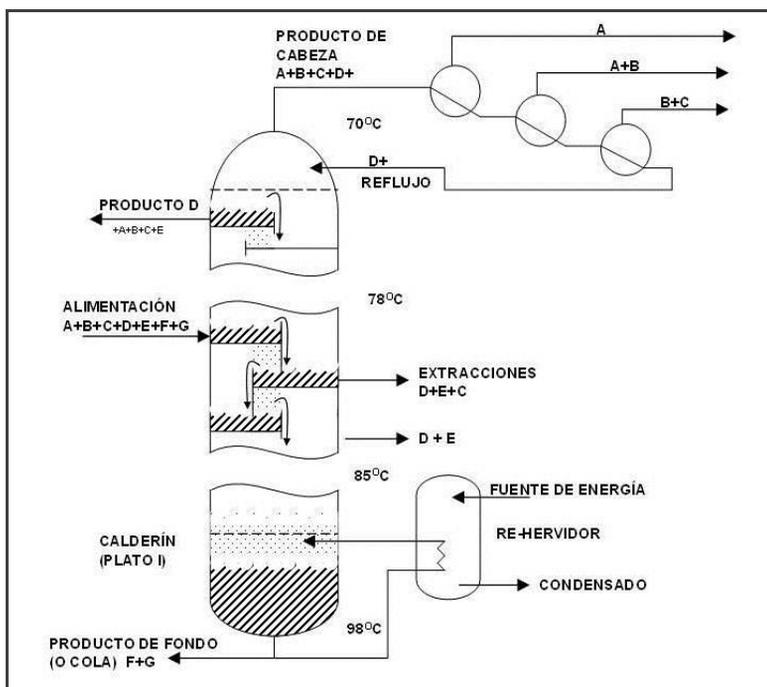


Figura 21. Columna de destilación de multicomponentes

La Figura 22, ilustra un arreglo típico de destilación contemporáneo. En éste, la fuente de calor, vapor de baja presión, ya no entra en contacto directo con el mosto a destilar, sino que cede su calor en un re-hervidor al líquido del fondo de la columna, los vapores que se forman en este intercambio son los que ascienden a lo largo de la columna para irse enriqueciendo de etanol. Con esto se logra reducir el volumen de la vinaza del fondo de la columna y el vapor condensado puede retornarse a la caldera contribuyendo al ahorro de energía y de agua en el ingenio. El arreglo también muestra el uso del agua de enfriamiento en cascada, para lograr los gradientes de temperatura mínimos necesarios para la condensación de las fracciones volátiles. Por otra parte, los vapores primarios a condensarse pueden utilizarse como fuente de calor para otro re-hervidor que sea parte del arreglo de otra columna aledaña.

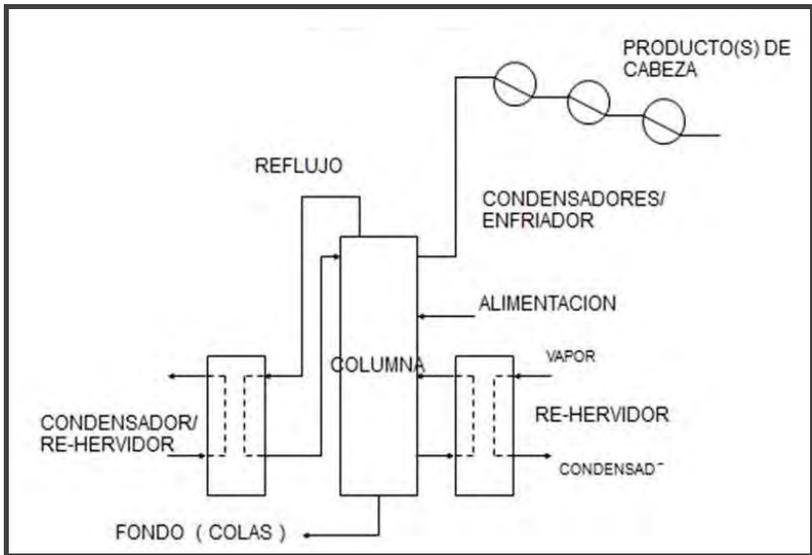


Figura 22. Esquema general de destilación

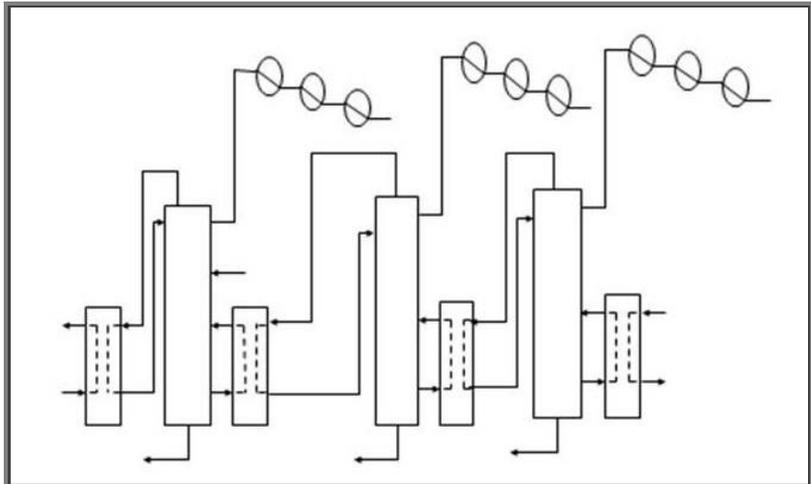


Figura 23. Combinación de reflujo y rehervidores (reboilers)

Destilación de mosto fermentado: El mosto fermentado, con un contenido alcohólico entre 8 y 11 por ciento, pasa entonces a un proceso de destilación, para separar el etanol y compuestos congénicos, gracias a su volatilidad

relativa. El calor necesario es provisto por vapor residual del ingenio. La destilación azeotrópica permite concentrar el alcohol a 95.5 por ciento.

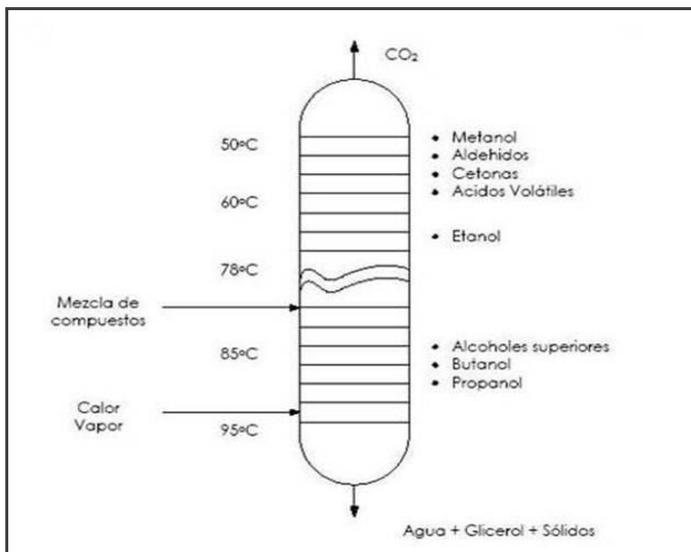


Figura 24. Fracciones de multicomponentes en la destilación de alcohol

Azeótropo es el término químico para dos líquidos que, a determinada concentración se vaporizan juntos y al mismo tiempo porque ebulen a la misma temperatura. El etanol y el agua no pueden separarse cuando la mezcla alcanza los 95.5 G.L. porque a esa concentración forman un “azeótropo” y se vaporizan juntos. El 4.5 por ciento de agua restante debe de removerse mediante algún proceso de deshidratación, como adsorción en tamiz molecular si el producto final va a ser utilizado como combustible (MFG, motor fuel grade). El residuo de la destilación se conoce como vinaza, y dependiendo de cuanto pueda recircularse al proceso, se producen entre 5 y 10 litros de vinaza por cada litro de etanol. La práctica común es disponer de la vinaza mediante la irrigación de los cañaverales para devolver los nutrientes al campo.

Dependiendo del producto y la calidad deseada, los arreglos de columnas varían de una destilería a otra. Algunas destilerías modernas tienen la posibilidad de producir varios tipos de producto, incluso al mismo tiempo, pero eso implica mayor inversión de capital en mayor número de columnas y una operación mucho más complicada.

Algunos arreglos típicos se ilustran a continuación:

Destilación Barbet: Es la combinación de columnas más utilizada para la fabricación de rones pesados y aguardientes. En la primera columna (columna de vino, destrozadora o “stripper”) se separa como vapor todo lo que no sea agua, glicerol y sólidos, que se van por el fondo como vinaza. La mezcla de compuestos livianos pasa a la segunda columna (columna purificadora o de “cabezas”) en donde se evaporan los compuestos más volátiles (metanol, aldehídos, cetonas, ácidos volátiles) que el Etanol, quedando éste en una mezcla con agua y alcoholes pesados (aceite de fusel) que se mantienen en forma líquida y se retiran del fondo de la columna para alimentar la tercera columna (columna de concentración o rectificación). En esta última se extrae el aceite de fusel por el primer tercio de la misma, el agua (flemaza) se extrae por el fondo y el etanol con los congénicos remanentes se recupera como el destilado final.

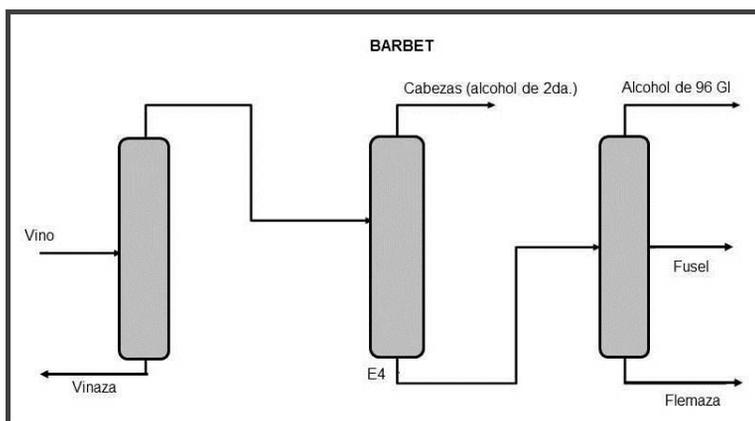


Figura 25. Destilación Barbet

Destilación extractiva: Es una variante del arreglo anterior en el que la columna purificadora se sustituye por una de “destilación extractiva”, es decir, una columna en la que se combinan las operaciones de destilación y extracción simultáneamente. Gracias a un fenómeno que se descubrió a mediados del siglo pasado, tanto los congénicos livianos como los pesados, combinados entre sí, tienen una volatilidad relativa mayor que la solución etanol – agua, cuando ésta es cercana al 14 por ciento en volumen. El agua del fondo de la tercera columna sirve para diluir la solución recuperada de la primera columna, propiciando las condiciones para extraer el alcohol de la mezcla y llevarla al fondo de la columna para luego alimentar la columna de rectificación, donde se separa más fácilmente como una destilación binaria.

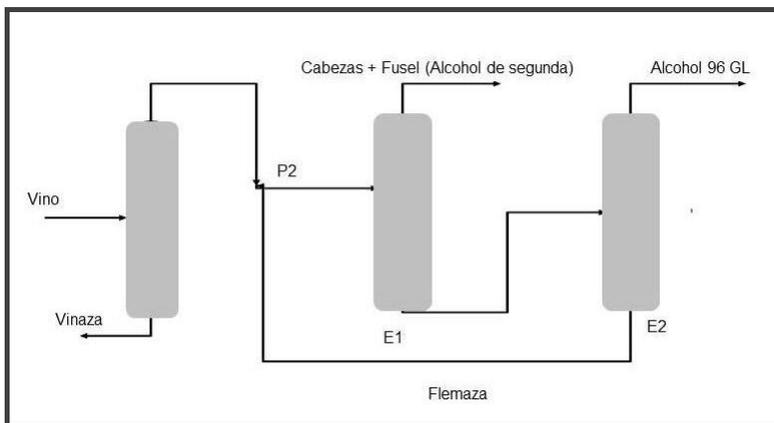


Figura 26. Destilación extractiva

Purificación y recuperación de etanol: Para obtener alcohol con la menor cantidad posible de congénicos (las denominaciones varían de región a región, son coloquiales y no están oficializadas: alto grado, neutro, extra-neutro, super-fino, etcétera) al arreglo base de destilación extractiva se agregan columnas adicionales para a) recuperar el alcohol de las fracciones volátiles y b) eliminar las trazas de congénicos que podrían ir en el alcohol rectificado, mediante el manejo optimizado de los perfiles de temperatura en la columna depuradora.

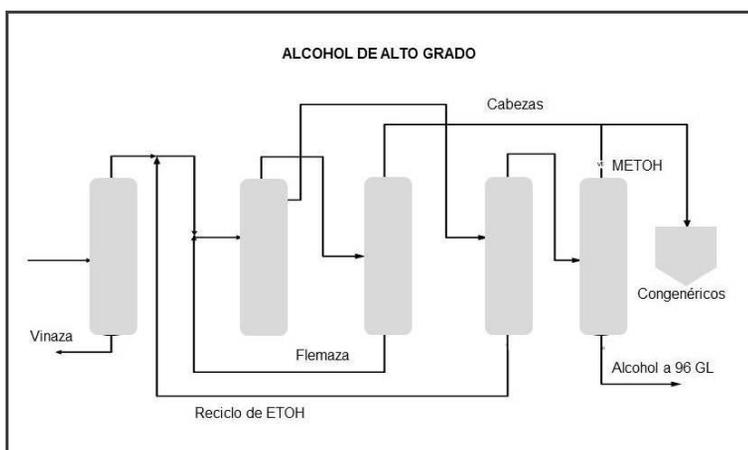


Figura 27. Alcohol de alto grado

Deshidratación : En la destilación de etanol-agua, bajo condiciones de presión positiva, hay un valor máximo en la concentración de alcohol en el agua (entre 95.5% y 96.5%), dependiendo de la presión atmosférica del sitio. El producto de la destilación azeotrópica es entonces etanol “hidratado“. El alcohol con agua no puede utilizarse como combustible por razones obvias. Sin embargo, es posible “deshidratar” alcohol, mediante otros procesos utilizados industrialmente, a saber:

- Aplicando vacío a la columna para bajar el punto de ebullición del etanol y desplazar el azeótropo hacia una concentración de 99.5 por ciento v/v.
- Agregando un tercer componente cuya mezcla con el agua tiene un punto de ebullición diferente al de la mezcla original, desplazando así el azeótropo.
- Haciendo pasar la mezcla por resinas que presentan alta afinidad por el agua y mucha área de contacto para adsorberla. Cuando los intersticios de la resina (tamiz molecular) se saturan de agua, ésta se desorbe por la acción del calor que se hace pasar por la columna que contiene dicho material.
- Nanomembranas de poro tan pequeño (a nivel molecular) que sirven como filtros y solo dejan pasar la molécula de agua, que es menor que la molécula del etanol.

Los dos primeros métodos de deshidratación han ido cayendo en desuso y el cuarto no está disponible comercialmente todavía.

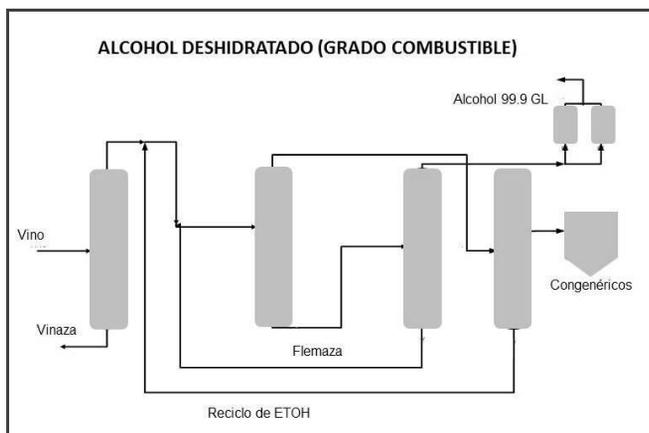


Figura 28. Alcohol deshidratado

Productos y calidad

El producto del proceso de producción de alcohol vía fermentación de azúcares es alcohol etílico (etanol). La clasificación de los tipos de alcohol que se pueden obtener de los procesos de destilación está en función de la composición y concentración del alcohol que se logre y según el diseño de la planta.

Algunas plantas están diseñadas únicamente para obtener alcohol hidratado, el cual se caracteriza por tener la concentración máxima de agua obtenible debido al azeótropo. Otras poseen procesos adicionales para eliminar el agua que no pudo ser removida durante la destilación y así producir alcohol deshidratado. Luego, según el grado de purificación o rectificación que se aplique, se puede obtener diferentes calidades o composiciones de los productos.

Alcohol hidratado: Hay variedad de especificaciones para el alcohol hidratado, usualmente son particulares para cada cliente. Puede caracterizarse según su uso final y algunos requisitos mínimos como el grado alcohólico, el tiempo de oxidación, la cantidad de alcoholes superiores, ésteres, cetonas y otros productos congénicos. Es importante que en su evaluación, además de los análisis de cromatografía y los análisis físico-químicos, se realice un análisis sensorial, como la catación del producto, a fin de evaluar olores y sabores característicos.

Podrá observarse que los requisitos de calidad son más exigentes que un alcohol carburante, lo cual se debe a que usualmente el alcohol hidratado se utiliza en bebidas, perfumes o fármacos, en donde se requiere que otros componentes presentes no interfieran en las propiedades del otro producto a fabricar.

Tipos comunes de alcohol hidratado

Alcohol crudo (Raw): Es un alcohol que no ha sido rectificado, usualmente tiene de 92-95 por ciento v/v de alcohol, también es llamado alcohol bruto. El olor, sabor y productos congénicos dependen de la materia prima del que haya sido procesado. Usualmente, se vende como materia prima para posteriores rectificaciones.

Alcohol industrial: Contiene al menos 95 por ciento v/v de alcohol, puede tener algún grado de rectificación, sin embargo, sus características no son suficientes para considerarlo potable. Se destina principalmente en la industria química (disolventes de tintes, pinturas, resinas) y farmacéutica. Tiene alto contenido de aldehídos, ésteres, fusel (alcoholes superiores), un olor fuerte y desagradable. También se le llama alcohol semi rectificado, alcohol de segunda o alcohol tipo REN.

Alcohol neutro (alto grado): Debe tener al menos 96 por ciento v/v de alcohol y menor contenido de impurezas, ya que se utiliza para elaborar bebidas alcohólicas (de diferentes sabores o aguardientes), para la crianza de vinos, perfumería, cosméticos y algunos fármacos. No debe contener olores detectables de otros congenéricos. Para lograr bajo contenido de impurezas debe haber pasado por procesos de rectificación y tener un buen control en la materia prima y de los productos en proceso. También llamado alcohol potable, grado alimenticio o alcohol fino.

Alcohol extraneutro: Alcohol con al menos 96-96.2 por ciento v/v, destinado a la elaboración de licores claros como el Vodka y el Ginebra, en menor porcentaje se utiliza en perfumería fina y algunos fármacos. Es un alcohol suave, sin olor, que pasa pruebas organolépticas rigurosas, las cuales en general son realizadas por expertos catadores. Casi no contiene aldehídos, residuos secos o fusel.

Los alcoholes neutro y extraneutro son rectificadas, y la cantidad de dichas rectificaciones depende de la cantidad de impurezas presentes en los vinos de donde provienen o el diseño del proceso. También se les llama alcohol extrafino. Cuando se deshidrata (99.9%) se convierte en un alcohol absoluto.

En el Cuadro 1, puede observarse, a manera de ejemplo, cómo la calidad va mejorando a medida que disminuye la cantidad de congéneres y aumenta el tiempo de reacción al permanganato, pero estas mismas especificaciones cambian según la región de venta (Europa, Estados Unidos, Japón, etcétera) o las necesidades del cliente. Se colocaron las principales propiedades, sin embargo, según el destino de uso o la pureza deseada en el producto, puede requerirse evaluar más parámetros y en algunos casos hasta evaluar el color en diferentes longitudes de onda y/o el olor a través de expertos catadores.

Cuadro 1. Tipos de alcoholes de acuerdo con sus propiedades

Propiedades	Unidades	Crudo	Industrial (REN)	Neutro (potable o fino)	Extra neutro (extrafino)
Grado alcohólico 20°C	% v/v	94-95.2	95-96	96 min	96-96.2 min
Acidez como ácido acético	Mg/100 mL	3 max	2 max	1.5 max	0.5 max
Material involátil	Mg/100 mL	4 max	4 max	1 max	1 max
Metanol	Mg/100 mL	35 max	5 max	1.5 max	1 max
Ésteres	Mg/100 mL	10 max	6 max	2.1-4	0.2 – 1 max
Aldehídos	Mg/100 mL	3 max	5 max	1.1 - 6	0.2- 1 max
ISO propanol	Mg/100 mL	1 max	1 max	0.5 max	0.5 max
Alcoholes superiores fusel	Mg/100 mL	20 max	10 max	0.5 max	0.5 max
Tiempo de permanganato a 15°C	Minutos	1 min	5 min	25 mínimo	36-50
Aspecto		Sin partículas suspendidas	Sin partículas suspendidas	Sin partículas suspendidas	Sin partículas suspendidas
Color		Claro transparente	Claro transparente	Claro transparente	Claro transparente
Olor		Característico	Característico	Neutro sin rastros de otros materiales	Neutro sin rastros de otros materiales

Alcohol deshidratado: Es el alcohol al cual se le ha removido el agua remanente después de la rectificación, usualmente es por medio de procesos de tamizado molecular o con destilación extractiva (benceno-hexano), aunque esta última tecnología está casi en desuso.

El uso principal que se le da al alcohol deshidratado es para utilizarse en los motores de ignición por chispa y compatible para ser mezclado con gasolina. A esta clase de alcohol se le ha nombrado indistintamente como etanol carburante, alcohol carburante, alcohol etílico deshidratado, etanol anhidro o alcohol anhidro carburante; así mismo en inglés se le reconoce como *fuel ethanol*, *anhydrous ethanol*, *anhydrous ethyl alcohol* o como *motor fuel grade etanol*. Cuando el alcohol es preparado con desnaturizante es llamado alcohol anhidro desnaturizado (*denatured fuel ethanol*). El desnaturizante es una sustancia que se agrega al alcohol carburante que lo hace inapropiado para la ingesta humana pero adecuado para uso en automóviles; el alcohol desnaturizado

tiene especificaciones diferentes al alcohol carburante sin desnaturalizar, ya que la proporción de sus componentes cambia.

La normativa mundial que rige la calidad del alcohol carburante está concentrada principalmente en tres regiones: Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea; las normas brasileñas (NBR) son emitidas por la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), las normas estadounidenses por Asociación Americana de Estandarización (ASTM) y las europeas por el Comité Europeo de Estandarización (CEN), aunque también existen especificaciones exclusivas de clientes según su uso final. A pesar de las diferencias propias de cada normativa, los requerimientos de calidad son similares, por lo que en el año 2006 el Gobierno de Brasil, el Gobierno de Estados Unidos de América y la Comisión Europea iniciaron acciones para unificar o compatibilizar los estándares de calidad del alcohol carburante, con el objeto de incrementar significativamente la viabilidad del mercado, de este producto. Los miembros de este equipo de trabajo publicaron en diciembre del 2007 los primeros resultados de las discusiones, negociaciones y recomendaciones para los diferentes cuerpos de estandarización (TTF, 2007). Sin embargo mientras no se cuenta con una normativa unificada, los productores buscarán cumplir los requerimientos de sus clientes principales junto a la normativa legal de su país. Por ello es importante conocer las especificaciones y sobre todo el significado de cada requisito de calidad, y aunque en Guatemala no se está comercializando y utilizando mezclas de gasolina con alcohol, sí se cuenta con producción de alcohol que podría destinarse a este uso en otros países, de esa cuenta es imperativo estar conscientes de la importancia del cumplimiento de cada requisito por su consecuente efecto en los equipos automotores. En el Cuadro 2 se indican las especificaciones comúnmente utilizadas para el alcohol carburante.

Cuadro 2. Especificaciones para alcohol carburante (Silva, 2007)

Requisito	Unidad		Brasil	ASTM	Europa	Método o norma
Densidad (20°C)	Kg/m ³	max	791.5			NBR 5992/
Grado alcohólico a 20°C	% m/m	min/min	99.3*			ASTM D 4052
	%v/v		99.6			
Contenido etanol a 20°C	% m/m	min/min			98.7**	ASTM D 5001/
	%v/v			92.1**		EC*2870/200 METHOD B/ASTM D 4052
Agua	% m/m	max/max	0.7		0.3	ASTM E 203/ PR EN
	%v/v			0.1		15489
Acidez total como ácido acético	mg/L	max/max	30	56	56	NBR 9866/ASTM D
	%m/m			0.007	0.007	1613-06/PREN 15488
Conductividad eléctrica	mS/m	max	500			NBR 10547
pHe				6.5-9.0		ASTM D 6423

Continuación Cuadro 2.

Requisito	Unidad		Brasil	ASTM	Europa	Método o norma
Cobre	Mg/kg	max	0.07	0.1	0.1	NBR 10893/ASTM D 1688 ^o /PREN 15492
Cloruros	<u>Mg/kg</u>	max/max		40		ASTM D 7319-7/ASTM
	Mg/L			32	20	7328-07E1/PREN 5484/15492
Gomas lavadas	Mg/100 mL	max		5		ASTM D 381
Aspecto			claro	claro	claro	ASTM D 4176-07/ VISUAL
Metanol	<u>%v/v</u>	max		0.5		ASTM D
	%m/m				1	5501/EC/2870/2000/EN 1601/EN 13132
Alcoholes superiores (C3-C5)	%m/m	max			2	EC/2870/2000 EN 1601/EN 13132
Azufre	mg/kg	max		30	10	ASTM D 2622/D3120 ASTM D 5453/D6468/PREN 15485/15486
Material volátil	Mg/L	max			100	ASTM D 1353-03/EC/2870/2000, METHOD II

*Densimetría, **Cromatografía de gases. ASTM- American Society of Testing Materials, NBR-Associação Brasileira de Normas Técnicas, EC-European Community, EN-European Norms, pREN-Draft method

No todas las especificaciones incluyen estos requisitos, inclusive hay algunas que incluyen otras características tal como el contenido de fósforo, nitrógeno, benceno, ciclohexano, plomo, sulfatos, sodio, etcétera; lo cual depende del cliente y del uso específico del producto. El residuo de la destilación se conoce como vinaza, y dependiendo de cuánto pueda recircularse al proceso, se producen entre 5 y 10 litros de vinaza por cada litro de etanol. La práctica común es disponer de la vinaza mediante la irrigación de los cañaverales para devolver los nutrientes al campo.

Subproductos

Vinaza: El residuo de la destilación se conoce como vinaza, y dependiendo de cuánto pueda recircularse al proceso, se producen entre 5 y 10 litros de vinaza por cada litro de etanol.

La vinaza ya no es considerada un desperdicio, sino un subproducto valioso, que lleva consigo calor aprovechable, proteína y vitaminas contenidas en la levadura. Puede recuperarse para alimentación animal, sales minerales y orgánicas provenientes de la caña y estas a la vez pueden devolverse al campo

mediante ferti-irrigación, carbohidratos residuales y otros compuestos biodegradables que servirán de sustrato para fermentación anaeróbica y producción de metano, combustible aprovechable en el ingenio o en la misma destilería. Igualmente, el agua puede recuperarse mediante evaporación o filtración y los sólidos residuales pueden manejarse como compost, por su alto contenido de nutrientes y devolverse al campo como fertilizante.

Dependiendo de las condiciones particulares de cada empresa y de sus respectivos análisis técnico-económicos, se adopta la mejor combinación de los procesos mencionados con el doble propósito de aprovechar el subproducto del etanol, como para preservar el medio ambiente.

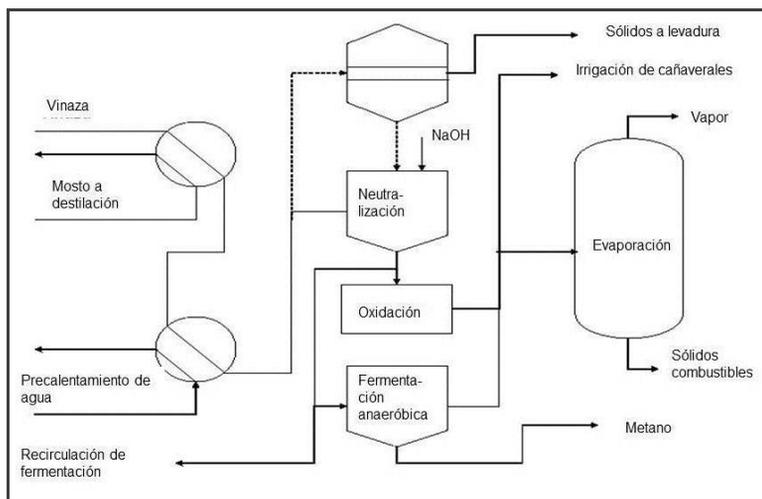


Figura 29. Disposición de vinazas

Dióxido de carbono: Durante la fermentación se produce una cantidad de dióxido de carbono, CO_2 , equivalente a la masa de etanol generada por el metabolismo de la levadura. La evolución del CO_2 dentro del fermentador provoca agitación, y ése es el primer beneficio que se obtiene de él, porque evita el uso de agitación mecánica.

El uso principal que se le da en la industria es como preservante en bebidas carbonatadas, y para la fabricación de hielo seco. Es rentable solo cuando estas industrias están localizadas muy cerca de las destilerías. También es un inhibidor de fermentaciones indeseadas durante el almacenamiento de melaza o

mieles; en ese caso se mantiene o se hace pasar una atmósfera de CO₂ sobre el contenido del tanque de almacenamiento.

Hay que considerar también que es uno de los gases de invernadero, y por eso se están realizando investigaciones a nivel mundial para su recuperación y uso, y para mitigar sus efectos.

Congénéricos

Congénéricos (aceite de fusel): En los productos azucarados también hay aminoácidos; las levaduras asimilan el radical nitrógeno, en la síntesis de nuevos compuestos de aminoácidos como las proteínas y las enzimas.

Entre estos aminoácidos presentes en los jugos y mieles podemos mencionar la leucina, la isoleucina, la valina, etcétera, los cuales al ser desprovistos del radical que contiene el nitrógeno ceden alcoholes como producto de la reacción, dando origen a alcoholes superiores alifáticos con la fórmula general C_nH_{2n+1}OH (n de 3 hasta 8). Tienen alto peso molecular y por su aspecto viscoso la mezcla de éstos es llamada aceites de fusel (fusel oil). El nombre aceite de fusel proviene del vocablo alemán *fousel* que significa “espíritus malignos”.

Entre los principales alcoholes superiores contenidos en el alcohol carburante se encuentran el propanol, isopropanol, butanol, isobutanol, alcohol amílico e isoamílico, estos dos últimos generalmente en mayor proporción.

Como ejemplo de las reacciones de conversión de aminoácidos en alcoholes, se representan las siguientes reacciones globales:

- *leucina + agua* -----> *alcohol isoamílico*



- *isoleucina + agua* -----> *alcohol amílico*



- *valina + agua* -----> *alcohol n-butílico*



- *ácido alfa-amino butílico + agua* -----> *alcohol n-propílico*



La producción de la mezcla de alcoholes superiores o “aceites fusel” alcanza valores promedios, comprendidos entre 0.4 por ciento y 0.6 por ciento de la producción total de alcohol.

La cantidad de aceites fusel obtenida en una destilería depende de las condiciones de fermentación y del sistema de selección del plato de extracción de fusel de las columnas rectificadora y concentradora de cabezas, principalmente.

Composición del aceite de fusel: Se proporciona a continuación la composición típica de los aceites de fusel obtenidos en destilerías que procesan jugos o mieles de caña de azúcar.

Cuadro 3. Composición típica de los aceites fusel

Compuesto	Fórmula química	Concentración (%v/v)
Acetaldehído	C_2H_4O	0.003
Propanol	$CH_3CH_2CH_2OH$	0.060
Acetato de etilo	$C_4H_8O_2$	0.008
Iso-butanol	$C_4H_{10}O$	0.076
n-butanol	$CH_3(CH_2)_2CH_2OH$	0.025
3-pentanol	$C_5H_{12}O$	0.002
Alcohol Isoamílico	$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	63.53
n- amílico	$C_5H_{12}O$	0.186
2,4 dimetil 3 pentanol	$C_7H_{16}O$	0.001
Furfural	$C_5H_4O_2$	0.008
n-amil acetato	$C_7H_{14}O_2$	0.583

Usos del aceite de fusel: Debido a la baja producción de fusel de las destilerías, se hace inviable económicamente la utilización del mismo por la vía de la separación de los congéneres que contiene. Es por ello que normalmente se desecha o se utiliza como combustible en las calderas de la destilería o del ingenio. Sin embargo, puede servir como materia prima para la producción de acetatos, mediante reacciones de esterificación.

Insumos

Además de melaza, el proceso de producción de etanol requiere de otros insumos, tales como nutrientes, químicos, agua de proceso, agua de enfriamiento, energía eléctrica y vapor. Algunos de estos insumos se obtienen a un precio nominal como subproductos de la operación en el ingenio azucarero y

otros deben adquirirse exclusivamente para la destilería. Los consumos varían dependiendo de los equipos, la tecnología y el proceso disponible.

Cuadro 4. Requerimientos de energía e insumos en destilerías

	DEST 1	DEST 2	DEST 3	DEST 4	DEST 5	KATZEN	LITERATURA **
Vapor, Kg / Litro Alcohol *	3	4.2	3.5	5.5	4.8	2.28- 5.21	4.8
EE KW / Litro Alcohol	0.033	0.2	0.15	0.15	0.03		0.03
L Alcohol / t melaza	252	262		260	264	261	267
H ₂ SO ₄ , lb / L Alcohol	0.004	0.006		0.008	0.01		0.0038
UREA, lb / L Alcohol	0.004	0.008					0.0015
H ₃ PO ₄ lb / L Alcohol	0.0025						0.0015
Levadura lb / L Alcohol	0.0015	0.02		0.005	0.008		0.0025

* Depende del arreglo de columnas y producto final

** Peters & Timmerhaus,. IRAS Statement of Capabilities.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aiba, S.; Humphrey, A.; Millis, N. 1975. Biochemical Engineering. 2nd Edition, Academic press, London , UK.
2. Borzani, W.; Almeida e Lima, V.; Aquarone, E. 1975. Biotecnología – Enghaniaria Bioquímica. Edgard Blucker Ltda.
3. Espinosa, R. 1984. The alcoholic Fermentation of molasses- practical aspects. Doctoral dissertation, Century University, New Mexico.
4. Duarte, P.; Vânia, Marcia. 2006. Especificaciones de la calidad del etanol carburante y del gasohol (mezcla de dasolina y etanol) y normas técnicas para la infraestructura. Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y El Caribe-CEPAL. LC/MEX/L.71/Rev.1. pp. 3-7.
5. Ingledew, W. M. 2009. The Alcohol Textbook, 5th Edition. Ethanol Technology Institute. Nothingham,University press.

6. Normas: ASTM D 891-95, 2004; ASTM D 4052-96, 1996; ASTM D 4806-6 c, 2006; ASTM D 5798-06, 2006; ASTM D 5501, 2004; ASTM D 1613, 2006; ASTM D 6423-99, 2004; ASTM D 4176, 2004.
7. Paturau, J. M. 1982. *Byproducts of the Cane Sugar Industry*. Elsevier Scientific Publishing Co. New York.
8. Prescott, S.; Dunn, C. 1967. *Industrial Microbiology*, McGraw- Hill, co.
9. Peters, M.; Timmerhaus, K. 1980. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, McGraw –Hill, N.Y.
10. Reynolds, R. 2002. *Fuel Specification and Fuel Property Issues and Their Potential Impact on the Use of Ethanol as a Transportation Fuel*. Downstream Alternatives Inc. Phase III Project Deliverable Report. Oak Ridge National Laboratory, Ethanol Project. pp. 2-2/2.
11. Silva Junior, J. F. 2007. *Market specification and Methods for Fuel Ethanol*. Symposium on BioFuels: Measurements and Standars to Facilitate the Transition to a Global Commodity. US National Institute of Standards and Technology (NIST), Brazil's National Institute of Metrology (INMETRO). UNICA/IETHA. June 26-29, 2007. Pp.

PERSPECTIVAS DE LOS COPRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Mario Muñoz*

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la Industria Azucarera basa su producción en tres productos principales: azúcar, electricidad y alcohol. Los mercados de estos tres productos presentan demandas con cierta variabilidad, que en algún momento pudiera representar una incertidumbre y menores ingresos de los previstos por los productores. Entre los factores más importantes que afectan la producción, la generación, la demanda y el consumo de estos productos son: Las políticas gubernamentales, tanto de los países productores como de los compradores, tales como subsidios o impedimentos arancelarios, los efectos climáticos regionales y las leyes regulatorias para la conservación del medio ambiente, la entrada a los mercados de competencias de economías emergentes, la necesidad de sustitución de las materias primas no renovables, tales como el petróleo y sus derivados, el auge y la búsqueda de biocombustibles y materias primas biodegradables, y en general el crecimiento de las economías en un mundo cada vez más globalizado.

Lo anterior conduce a las fábricas de azúcar a buscar alternativas de nuevos coproductos, que bien puedan ser derivados de productos en proceso o de subproductos de desecho y residuales. La gama de posibilidades es muy grande, sin embargo, su éxito comercial dependerá del grado de desarrollo de las tecnologías que se utilicen y del valor agregado a dichos productos. Es decir, que se pueden generar productos con alto valor agregado, pero por su alto precio tendrán volúmenes de venta bajos, o se puede producir productos con menor valor agregado pero el volumen de ventas deberá ser mayor, de cualquiera de las dos formas de comercialización, la producción de estos coproductos tiene retos no solo tecnológicos sino también de marketing.

A lo largo del proceso de fabricación del azúcar, se encuentran varias fases de donde pueden extraerse “productos en proceso”, que constituirían las materias primas para otros coproductos y derivados, a veces, con métodos

* Ing. Mecánico Industrial, Profesional en Eficiencia Energética del Programa de Investigación Industrial de CENGICANA. www.cengicana.org

de fabricación bien diferenciados, y en otras ocasiones con procesos químicos adjuntos, la integración de estos procesos se conocen como bio-refinerías.

El primer producto en proceso que muchas veces no se aprovecha eficientemente son los residuos de la cosecha, esto debido a la quema de los cañales. Cuando la cosecha es en verde, gran cantidad de biomasa queda en los campos, así algunos la utilizan como alimento para animales, combustibles para calderas, abonos y fertilizantes, desarrollo de hongos, generación de pulpas para papel, etcétera. Otro coproducto importante es el bagazo proveniente de la molienda de la caña, por su alto poder calorífico es generalmente utilizado como combustible para calderas; sin embargo, puede ser utilizado para la fabricación de productos diversos, tales como, agregados para concretos, alimento para animales, pulpas y papeles e incluso puede ser utilizado para recuperar suelos expuestos a hidrocarburos. Las mieles y jugos no empleados para el azúcar, fundamentalmente, son la materia prima para la producción del alcohol, el cual a la vez puede usarse en aplicaciones de química fina para elaborar otros compuestos y un sinnúmero de sustancias químicas de uso alimentario y farmacéutico. Las bio-refinerías pueden procesar los productos azucarados para elaborar sustancias edulcorantes y similares para la fabricación de productos químicos de aplicaciones extensas en muchas industrias. Finalmente, los residuos provenientes del proceso de fabricación del azúcar, tales como la vinaza, la cachaza y la ceniza de calderas, también tienen participación posible en mercados de industrias importantes, como la producción de biogás, forrajes y agregados puzolánicos.

Las tecnologías utilizadas para producir todos estos productos van desde elementales y convencionales hasta experimentales, nuevamente será el mercado el que marque la factibilidad y el desarrollo de los mismos. Sin lugar a dudas, un mundo que cambia tan aceleradamente y que exige bienes y productos de materias primas limitadas, llevará a los ingenios azucareros a desarrollar tecnologías y coproductos alternativos para hacer frente a los cambios del futuro. Existe una amplia gama de procesos y productos, esto permite a una moderna fábrica de azúcar ser una opción muy flexible. Sin embargo, todo dependerá del tamaño, el potencial y las perspectivas del mercado en el que se desarrollen esos coproductos. La Figura 1, ilustra algunos de los caminos para desarrollar coproductos en la industria azucarera.

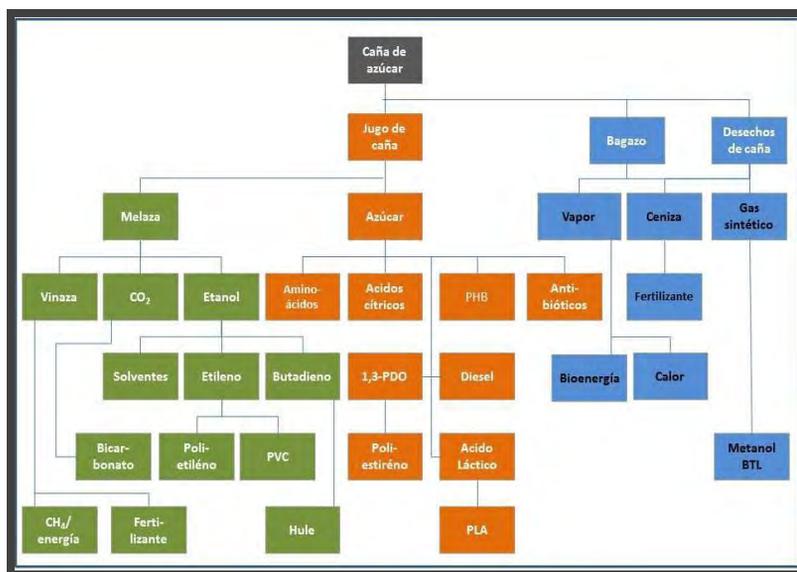


Figura 1. Productos y coproductos posibles en una bio-refinería basada en caña de azúcar

CONCEPTOS

Coproductos

Un coproducto se deriva de los insumos principales de un proceso de producción (materia prima, mano de obra y cargos indirectos), en donde se obtienen dos o más productos diferentes en forma simultánea, estos se consideran de igual importancia, ya sea por las necesidades que cubren o por su valor comercial, en relación con la producción total.

Subproducto o derivado

Un subproducto se deriva de los insumos de un proceso de producción (materia prima, mano de obra y cargos indirectos), en donde se obtienen dos o más productos diferentes en forma simultánea o posterior, según su valor comercial, se consideran de importancia secundaria en relación con los productos principales.

Del azúcar puede derivarse un número relativamente grande de coproductos y subproductos, la producción de los mismos depende del valor final de los coproductos principales y del tamaño del mercado al que pertenecen. En el Cuadro 1 puede verse, de manera general, un grupo misceláneo de coproductos finales que se derivan de la caña de azúcar, sus características y mercados comunes.

Cuadro 1. Productos misceláneos de la caña de azúcar (Cabello, 2002)

Producto	Características	Uso y mercados
Briquetas de bagazo	Combustible alternativo	Hornos de leña
Hongos Pleurotus	Exquisitez culinaria	Restaurantes
Sirope tipo maple	Repostería y dulces	Industrial
Azúcar y panela	Minidosis, cubos, Etc.	Líneas aéreas
Color caramelo	Alimentos y bebidas	Bebidas y conservas
Hidrocoloides	Alimentos y farmacia	Medicamentos
Caramelos	Diferentes tipos	Uso generalizado
Saborizantes cárnicos	Autolizado de levaduras	Embutidos, sopas
Productos veterinarios	Prebióticos	Ganadería, porcino
Bebidas típicas	Productos típicos región	Turismo
Alcohol específicos	Gel de limpieza	Doméstico y otros
Hielo seco	Refrigeración alternativa	Pesca, leche, helados

APLICACIONES DE LOS COPRODUCTOS

Un coproducto tiene más o menos valor agregado, cuando este se puede vender a granel, por lo general a precios bajos (baratos), o cuando se vende al detalle pero a precios más altos (caros), los productos azucarados generalmente se convierten en sustancias de química fina. Como se muestra en el Cuadro 2, entre los productos que se comercializan a granel y que son hidratos de carbono, la sacarosa ocupa el segundo lugar después de la celulosa y supera con creces a la producción combinada de todos los demás hidratos de carbono.

Cuadro 2. Producción anual de productos carbohidratos.

Productos carbohidratos	Producción anual (millones de toneladas)
Celulosa	< 130
Sacarosa	~ 124
Almidón	~ 25
Glucosa	~ 6
Celulosa	~ 5
Gomas	< 1

Se estima que sólo el 1.7 por ciento de la producción de la sacarosa anual se destina a usos “no” alimentarios. La caña de azúcar y sus coproductos se prestan a posibilidades en las siguientes áreas:

- Productos de química fina
- Productos farmacéuticos
- Polímeros (plásticos biodegradables)
- Construcción y materiales estructurales
- Fermentación o sustrato de la enzima para la producción de productos químicos
- Nuevos productos alimentarios y edulcorantes
- Cogeneración de energía
- Combustibles tales como biodiésel y etanol

DIVERSIFICACIÓN DE LOS COPRODUCTOS

Los coproductos y derivados de la caña de azúcar pueden participar en mercados diferentes, según la tecnología utilizada para su fabricación, las materias primas e insumos generados a lo largo de todas las fases del proceso de fabricación del azúcar. Se dice que se usan de forma elemental, cuando su aplicación es directa y sin valor agregado de procesado, también pueden procesarse con los procedimientos industriales convencionales, donde los productos tienen tecnologías y mercados bien diferenciados y conocidos. Un tercer y cuarto mercado lo representan las tecnologías complejas y las de punta, donde el procesado de las materias primas es complejo, de alto valor agregado pero a veces de uso limitado, en algunos casos aún en fase de desarrollo o experimental.

En el Cuadro 3, en la primera columna, se ven las diferentes materias primas provenientes de las fases de la fabricación del azúcar; a la derecha, las tecnologías y los usos que frecuentemente se dan a los coproductos derivados.

Cuadro 3. Diversificación de los coproductos del azúcar de caña, según la tecnología (ICIDCA, 2000).

Materia Prima	Tecnología (Productos/Procesos)				Usos
	Elemental	Convencional	Compleja	De Punta	
Hojas y cogollos	Uso directo	Hongos comestibles			Alimento humano, alimento animal
		Densificación			Mejorador del suelo
		Ensilaje con cachaza			Alimento animal
Bagazo	Mezclado con melaza	Aumento digestibilidad	Pulpa y papel	Papel y cartones	Alimento animal, uso Industrial
		Compactado	Tableros Moldeados	Celulosa macrocristalina	Combustible, uso industrial, farmacéutico
			Furfural	Compuestos de lignina	Uso industrial, veterinario
			Xilitol	Compuestos furánicos	Uso Industrial, farmacéutico
Meollo*	Mezclado con melaza	Aumento digestibilidad			Alimento animal
Jugos y mieles pobres		Alcohol	Glucosa, fructosa	Derivados de la levadura	Potable y uso industrial, farmacéutico
		Levadura de recuperación	Cítrico, láctico	Enzimas hormonas	Alimento animal, uso industrial, agrícola
		Aguardiente, ron	Levadura forrajada	Control de plagas	Uso humano, alimento, uso agrícola
		Gas carbónico, hielo seco	Lisina	Alcohol reactivo	Uso industrial en alimentos, laboratorios
		Deshidratación	Destrana, Xantano	Bebidas	Uso industrial, consumo humano
		Alcohol	Alcohol	Fitoesteroles	Potable y uso industrial, cosméticos
Melaza	Mezclado con bagazo o meollo	Levadura de recuperación	Glucosa, fructosa		Alimento animal
		Bloques nutricionales	Aguardiente, ron	Cítrico, láctico	Alimento animal, uso humano
		Gas carbónico, hielo seco	Levadura forrajera		Uso industrial en alimentos
		Deshidratación	Lisina		Uso industrial
			Destrana, Xantano		Uso industrial
			Alcohol		Uso industrial
Cachaza	Uso directo	Composteo	Ceras, aceite	Alcoholes de alto peso	Fertilizante, uso industrial, farmacéutico
	Secado al sol				Fertilizante
Ceniza	Mezclado con cachaza				Fertilizante
Residuales	Tratamiento en lagunas				Fertilizante
Vinaza	Aspersión en campos	Tratamiento en lagunas	Levadura forrajera		Fertilizante, riego
			Biogás		Protección medio ambiente
			Concentración/incineración		Protección medio ambiente

- **Meollo:** Médula de la caña, residuo de la caña después de haberle quitado la fibra.

DESCRIPCIÓN DE LOS COPRODUCTOS Y DERIVADOS

Los productos derivados de la caña de azúcar pueden analizarse según la materia prima de donde provienen. El proceso de fabricación del azúcar de caña se divide en varios pasos, en donde la transformación de la caña en azúcar genera “productos en proceso” y de los cuales pueden extraerse muchos coproductos y derivados. Según la fase de fabricación, los productos en proceso más comunes en las industrias azucareras son:

- Los residuos de la cosecha
- El bagazo
- Las mieles, jugos y melaza
- La cachaza
- La vinaza

La Figura 2, ilustra los escenarios para que un coproducto derivado de la caña de azúcar pueda industrializarse, éste depende en gran medida de los costos de fabricación y del valor (precio) de mercado del mismo.



Figura 2. Índices económicos para la selección de coproductos de la caña de azúcar (Almazán, 1998)

Coproductos de los residuos de la cosecha

Son aquellos productos generados por el aprovechamiento de los desechos que quedan en los campos después de que la caña ha sido cortada y alzada, estos productos están constituidos básicamente de hojas, cogollos y paja. La cantidad y calidad dependerán del tipo de cosecha (quema o en verde) y las características físicas y químicas variarán de acuerdo con la variedad de caña, suelo y tratamiento agrícola. En la Figura 3 se observan las posibilidades comerciales y tecnológicas que tienen los residuos dejados en el campo después de la cosecha.

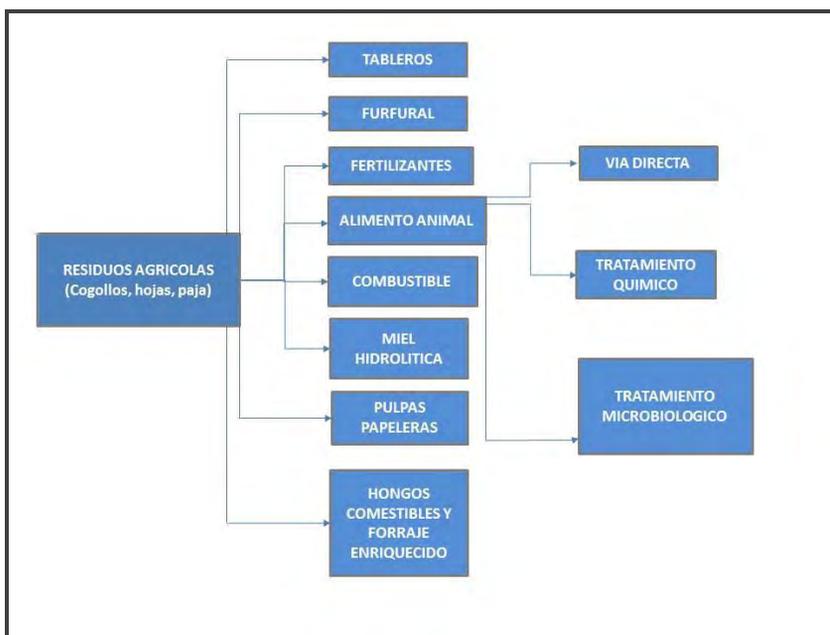


Figura 3. Alternativas para la utilización de los residuos agrícolas de la caña de azúcar

A continuación, se resumen algunas aplicaciones específicas, alternas y no convencionales de los residuos de la cosecha.

Forrajes: Los residuos de cosecha (cogollo, hojas y paja) pueden utilizarse para alimento de ganado, generalmente es necesario que antes sean mezclados con miel final, urea y sales minerales.

Producción de ácido láctico: Hay resultados que sugieren que los residuos de la cosecha de la caña de azúcar (hojas y cogollos) pueden ser utilizados como materia prima barata para la producción fermentativa de ácido láctico. El material de desecho de la cosecha en verde tiene un contenido de agua de aproximadamente el 75 por ciento y un contenido nutricional total de azúcares, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Estos nutrientes son necesarios para el crecimiento de microorganismos, lo que sugiere que los residuos y subproductos de la cosecha de caña podrían emplearse como sustratos baratos para la fermentación (Serna, 2007).

Biogás: La producción de biogás utilizando biodigestores, ha demostrado ser factible a partir del tratamiento de los tallos machacados y los residuos de la caña dejados en el campo después de la cosecha, estos productos aumentan la cantidad y la calidad de la producción de biogás formado a partir de la mezcla con el estiércol del ganado (Pound, 1981).

Coproductos del bagazo (ICIDCA, 2000)

El bagazo, según los conceptos anteriores, es un coproducto del que se aprovecha su alto poder calorífico para generar energía térmica y eléctrica en los ingenios, comercialmente representa importantes fuentes de ingreso para las fábricas. Sin embargo, al bagazo como biomasa, también se le puede aplicar otras tecnologías para convertirlo en coproductos y derivados que representen alternativas a la generación eléctrica actual. El bagazo, residuo lignocelulósico remanente de los tallos de caña, obtenido a la salida del último molino, constituye un conjunto heterogéneo de partículas de diferentes tamaños. Desde el punto de vista físico el bagazo está constituido por: Fibra de bagazo, sólidos solubles, sólidos insolubles y agua. Químicamente el bagazo está constituido por celulosa, hemicelulosa y lignina, como principales polímeros naturales, ver el Cuadro 4.

Cuadro 4. Composición física del bagazo

Fracción	Rango%
Fibra	55-60
Médula	30-35
Finos, tierras y solubles	10-15

A continuación, algunas aplicaciones específicas del uso del bagazo para generar otros productos alternos no convencionales:

Concentrados para animales: Se han producido concentrados proteicos de las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y *Candida utilis*, para suplementar la alimentación de bovinos y caprinos, mediante el aprovechamiento biotecnológico del desecho generado en el procesamiento industrial de la caña de azúcar (bagazo). La hidrólisis con ácido sulfúrico diluido (6% v/v) y una relación líquido/sólido de 30, mediante 4 horas en ebullición a reflujo, del bagacillo de caña de azúcar se obtienen azúcares reductores solubles, los cuales sirven de medio de cultivo para el crecimiento de las levaduras *S. cerevisiae* y *C. utilis*, no tóxicas para los animales. La *C. utilis* superó a la *S. cerevisiae* en la producción de biomasa (proteína unicelular) en un 48 %, para la misma concentración de azúcares reductores, provenientes del hidrolizado ácido concentrado de bagacillo de caña de azúcar. El análisis estadístico indicó que la *C. utilis* es la mejor levadura a usar en este bioproceso. El elevado contenido de lisina y treonina, así como un contenido balanceado de aminoácidos, sugiere un uso potencial de los concentrados proteicos producidos como complementos de dietas de cereales, ya que éstos son deficientes en aminoácidos. (Ferrer, 2004)

Pulpa y papel: La existencia cada vez menor de materiales fibrosos, para ser empleados como materia prima en la industria de derivados y su carácter renovable, han estimulado en las últimas décadas un proceso acelerado de desarrollo en la utilización del papel en las producciones de pulpa y productos aglomerados. Las pulpas de bagazo de caña presentan una combinación de propiedades y resistencia, que les permiten incorporarse a la pasta de papel. Las pulpas se pueden emplear fundamentalmente para fabricar papel periódico y papeles de imprenta, también se utilizan en la formulación de cartón o cartoncillo de alta calidad, si el procesamiento de las pulpas es alcalino pueden producirse papeles más finos como el bond, las cartulinas y los papeles tissue. Si las pulpas tienen elevadas purezas químicas (pastas alfa) suelen utilizarse para la fabricación de fibra e hilaza adecuada para el proceso de la fabricación del rayón. Las pulpas absorbentes son un tipo especial diseñadas para la rápida absorción de líquidos lo que las hace la materia prima para pañales y toallas sanitarias. La utilización del bagazo en la industria del papel depende del costo y las características del producto a obtener, es necesario tener en cuenta las operaciones de transporte, procesado y almacenaje del bagazo (ICIDCA, 2000).

En la Figura 4 se visualiza uno de los procesos comunes utilizados para la producción de papel a partir del bagazo de caña.

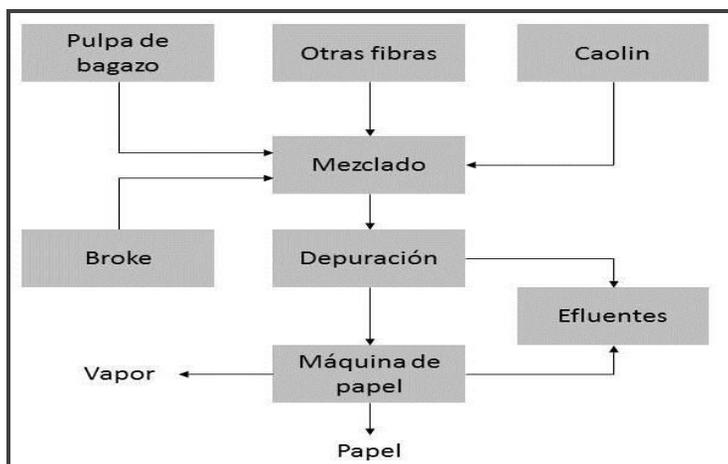


Figura 4. Proceso de fabricación de papel periódico a partir de bagazo de caña

Celulosas: La Carboximetilcelulosa y la celulosa Microcristalina, también pueden producirse a partir del bagazo de caña. La Carboximetilcelulosa se utiliza como detergente, espesante y pegamento en la industria del tabaco, en la fabricación del rayón y para engomar hilos en la industria textil. La celulosa Microcristalina, por su pureza química posee propiedades que la hacen muy adecuada para la fabricación de cremas, cosméticos, detergentes y como excipiente en la industria farmacéutica.

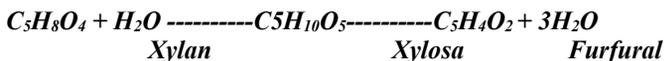
Medios filtrantes: En la producción de medios filtrantes se ha demostrado la factibilidad del bagazo como componente en la mezcla con otras fibras de madera. Los medios filtrantes tienen diferentes usos: Filtros para cervezas y rones, siropes azucarados, vinagre, vino, productos farmacéuticos, papeles para laboratorios, filtros para pinturas y barnices.

Fármacos: A partir de la lignina (por su capacidad de absorción) se desarrollan fármacos para el tratamiento de trastornos gastrointestinales. Se ha demostrado que es capaz de enlazar nitratos, sustancias cancerígenas, sales biliares, nitrosaminas y sales minerales en el tracto gastrointestinal.

Tableros: Estos son productos elaborados en forma de paneles a partir de partículas de bagazo, aglutinadas con encolante orgánico bajo ciertas condiciones de temperatura y presión. La industria de muebles es la mayor consumidora de estos paneles, especialmente de tableros prensados de varias capas. Si la sustancia aglutinante es cemento los tableros de bagazo pueden utilizarse para edificaciones tales como viviendas o escuelas. Adicionalmente,

los tableros aglutinados con yeso sirven fundamentalmente para la manufactura de cielos falsos.

Furfural: Este es un aldehído derivado de los pentosanos que se hallan con la celulosa en muchos tejidos de las plantas. Constituye el principal elemento de los furanos. Las propiedades químicas lo hacen un producto muy versátil y de alta reactividad para la síntesis de compuestos orgánicos. Sus principales aplicaciones son productos industriales tales como polímeros y plaguicidas. Se deriva de la siguiente reacción química:



En la práctica, cerca de 25 toneladas de bagazo son necesarias para producir una tonelada de Furfural. En la Figura 5, aparece una descripción esquemática de los productos que pueden derivarse del mismo.

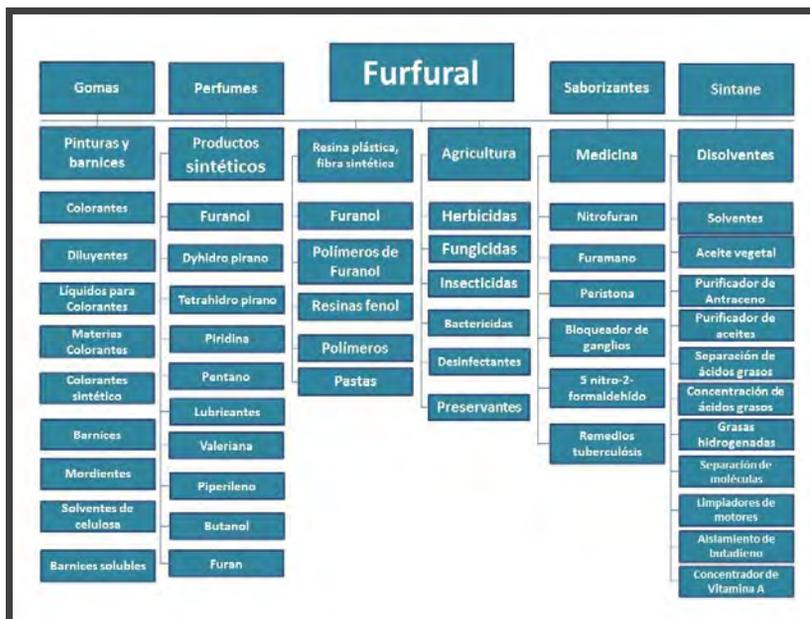


Figura 5. Aplicaciones del Furfural (Gravitis, 1999)

Carbón activado: El bagazo puede tratarse por pirolisis (descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno) para obtener

carbón activado, este producto es utilizado como adsorbente en los procesos de decoloración, protección química, tratamiento de aguas residuales y purificación de productos químicos.

Hidrólisis del bagazo: El bagacillo hidrolizado (desdoblamiento de la molécula de ciertos compuestos orgánicos del bagazo por la acción del agua) es un producto que se obtiene mediante el tratamiento con vapor, con el objetivo de aumentar su digestibilidad para su empleo como alimento animal, especialmente ganado vacuno y aves.

Fuente de sílice: Dependiendo del tipo de suelo y época en que es cortada la caña, la ceniza del bagazo, proveniente de los hornos de las calderas, puede ser una rica fuente de sílice. Algunos estudios han revelado su aplicación en la producción de gel de sílice como adsorbente, material para cerámicas, cemento, aditivos para el concreto, catalizadores, cosméticos, pinturas y recubrimientos. El tratamiento consiste en secar, filtrar y calentar en un horno las cenizas de bagazo en una atmósfera con oxígeno, luego se le trata con ácido clorhídrico. En la tabla 5 pueden verse en la columna derecha, los componentes de la ceniza de bagazo luego de este tratamiento. (Worathanakul, 2009)

Cuadro 5. Producción de sílice (SiO₂) a partir de ceniza de bagazo

Componente	% de masa		
	Materia prima	Calentamiento 3 h	Tratamiento con ácido
SiO ₂	19.417	29.849	89.037
K ₂ O	35.036	23.99	2.134
P ₂ O ₅	12.428	12.043	1.687
SO ₃	10.969	13.242	0.33
CaO	14.482	13.307	2.549
Mn ₂ O ₃	1.236	1.303	0.153
Fe ₂ O ₃	1.884	1.812	1.969
Al ₂ O ₃	0.973	1.262	0.791
Otros	0.809	0.594	0.791

Removedores de hidrocarburos: El bagazo y la cachaza como bio-remediadores de suelos, se han utilizado como texturizantes y enmienda de suelos con derrames de hidrocarburos tales como petróleo, diésel y gasolina. La cachaza, además de funcionar como enmienda, presenta la ventaja de aportar microorganismos al suelo con la capacidad de biotransformar los tóxicos. (García, 2011)

Agregados puzolánicos: La introducción de materiales sustitutos del cemento Pórtland, tal como las puzolanas, brinda la posibilidad de utilizar

productivamente un material de desecho que por lo general, sobra en grandes cantidades en los ingenios, tal como el bagazo. Se han abordado diversos criterios del empaquetamiento de partículas en la elaboración de mezclas binarias, ternarias y multicomponentes en la confección de pastas, morteros y hormigones. Al formular una mezcla de partículas, en donde participa un aglomerante es deseable componer las mismas tan densamente como sea posible para lograr así el mayor empaquetamiento. Esto minimiza la cantidad necesaria de aglomerante que tiene que llenar los espacios entre los agregados en la mezcla y brinda un beneficio económico, una menor contracción y concede mayor fortaleza al concreto, mortero o pasta (Martínez, 2003).

Coprodutos de los jugos, mieles y melaza (ICIDCA, 2000)

Los productos azucarados de la caña de azúcar son los que se agotan en las fábricas del azúcar y de donde se extrae la misma, pero hay una buena cantidad de productos edulcorantes y derivados que pueden extraerse de las mieles, hoy en día, la miel final o melaza es la más aprovechada para fines diferentes al azúcar, generalmente para la producción de alcoholes (rones y etanol). Sin embargo, como una alternativa al azúcar, existen otros coprodutos que pueden derivarse de las mieles. A continuación algunas aplicaciones y productos que se extraen de los jugos y mieles.

Amilasa: Producto enzimático de origen bacteriano, participa en la degradación del almidón. El resultado final es una mezcla de glucosa, maltosa y dextrinas de bajo peso molecular. La amilasa brinda una valiosa solución a los problemas del mejoramiento de productos, tales como almidón, papeles, alcoholes, cervezas, textiles y detergentes.

Dextranasa: Es una endoenzima que se emplea para degradar las dextranas de alto peso molecular, con el objetivo de reducir las pérdidas de azúcar y la deformación de cristales de azúcar, manifestada por el aumento en la viscosidad de las masas cocidas.

Celulasa: El uso fundamental de estas enzimas es la degradación de la celulosa, se utiliza con frecuencia en el procesamiento de cereales, cervezas, extractos de frutas y tratamiento de residuales.

Xilanasas: El uso fundamental de este complejo enzimático es la degradación del Xilano, tiene su uso principal en la producción de Xilitol, sustituto del azúcar para diabéticos.

Levaduras: Las levaduras son microorganismos unicelulares utilizados con fines industriales y comerciales, se usan como aditivo para alimentación

humana y para forrajes. Las levaduras tienen las ventajas de asimilar gran cantidad de sustratos, muestran altas velocidades de crecimiento y su biomasa es fácilmente separable. La levadura *Saccharomyces* sp se utiliza en la industria panadera, alcoholera y de cerveza. La levadura *Torula* es un forraje valioso por su alto contenido proteico y la levadura *Invertasa* es la que se usa para la inversión de las mieles porque hidroliza la sacarosa.

Miel deshidratada: Este producto es un polvo higroscópico de color pardo rojizo y agradable sabor. Está diseñado para la alimentación de cerdos y aves en su primera etapa de cría, sustituyendo el empleo de cereales.

Uso directo: Las mieles son jarabes azucarados obtenidos a partir de la concentración y agotamiento de la sacarosa del jugo de caña. Según la etapa de proceso, las mieles pueden ser mieles ricas, meladura invertida, miel A, miel B y miel final. Estas mieles son alternativas para el alimento de ganado bovino, especialmente mezclado con bagazo y urea. En la Figura 6 se muestra un comparativo del rendimiento calórico por hectárea, de varios coproductos de diversos granos utilizados para alimentación de animales. El mayor rendimiento corresponde a la caña de azúcar.

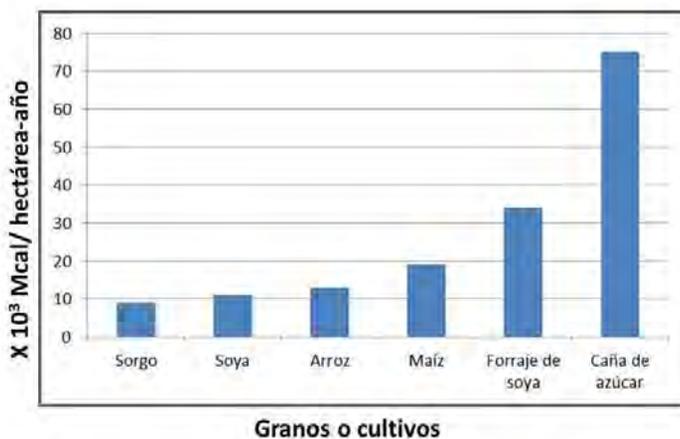


Figura 6. Rendimiento calórico anual por hectárea en mega calorías

Lisina: Es un aminoácido que no puede ser sintetizado por los animales, por lo que debe ser incorporado por medios externos. La carencia de lisina en la alimentación obstruye el sistema sexual y provoca agotamiento muscular y otros fenómenos patológicos. Este producto se emplea para el enriquecimiento de cereales para humanos y en la industria farmacéutica.

Ácido cítrico: El ácido cítrico es un producto químico que se obtiene de mieles finales por fermentación. La mayoría del ácido cítrico se emplea en la industria alimentaria como acidulante, emulsificante, estabilizador de grasas y aceites para acentuar el sabor. También es utilizado en la industria farmacéutica.

Coproductos del alcohol

El alcohol es un coproducto de la caña de azúcar, a su vez se constituye como la materia prima para otros subproductos a través de diferentes alternativas de transformación, entre las que se encuentra la producción de etileno o acetaldehído y sus derivados, dando lugar a la industria llamada alcoquímica. El alcohol (C_2H_5OH), es un líquido incoloro, transparente, volátil, de olor etéreo y sabor picante. Se emplea en la industria de destilado con diferentes grados de pureza, se comercializa en forma hidratada o anhidra. Se obtiene por síntesis química por vía fermentativa a partir de los jugos, mieles y melazas de la caña de azúcar. El alcohol puede usarse como combustible alternativo a las gasolinas, como antiséptico, solvente, agente preservante en los procesos para la fabricación de: gomas, resinol, jabones, aceites esenciales, drogas, ceras y bebidas alcohólicas.

La química del alcohol combina dos tecnologías de éxito: la fermentación alcohólica y los procesos catalíticos del alcohol. Muchos de los productos de base biológica pueden obtenerse a partir del etanol por la vía química del alcohol. La producción de etileno abre la puerta a la producción de bioplásticos. El etileno es un precursor de varios plásticos, por ejemplo, PE, PVC, PVA, poliestireno, y su mercado mundial es de millones de toneladas métricas.

El alza de los precios del petróleo y las medidas regulatorias tendientes a la protección de la atmósfera han originado un aumento considerable de la demanda de alcohol tanto como combustible y como antidetonante alternativo al MTBE. Por el papel decisivo de Brasil como exportador tanto de azúcar como de alcohol, cualquier cambio de estrategia de este país en el sentido de dedicar más caña a uno u otro propósito, tiene consecuencias sobre la disponibilidad de ambos productos en el mercado. En este sentido, a nivel del área de Centroamérica dos aspectos merecen atención. Por una parte, el principal mercado para este tipo de alcohol son los Estados Unidos, por lo que el futuro de posibles exportaciones hacia ese mercado dependerá en buena medida de los subsidios que reciba la producción nacional de alcohol de maíz y otras materias primas locales. Por otro lado, en países

pequeños y de acceso inmediato al mar, el problema del tratamiento de los residuales es una limitante de consideración, ya que la aspersión directa en los campos de caña utilizada mayoritariamente en Brasil es poco viable cuando hay limitaciones de área y el tratamiento industrial de los mismos tiene un costo elevado de inversión.

A continuación se describen algunas aplicaciones y coproductos que se extraen del alcohol.

Ron y aguardiente: El aguardiente se define como alcohol no rectificado, obtenido por la destilación de subproductos del proceso de elaboración del azúcar de caña sometido a fermentación y es utilizado para consumo humano. La producción de bebidas destiladas a partir de la caña (aguardiente, ron, vodka, etc.) es a pesar del alto nivel de impuestos que es común para este tipo de producto, una de las alternativas más lucrativas siempre que se observen las reglas de marketing de un mercado tan competitivo como el de las bebidas. El diseño del producto adecuado, en cuanto a calidad, presentación y precio es fundamental para el éxito en esta actividad.

Neumáticos: Los neumáticos también se pueden hacer de la caña de azúcar. El caucho sintético para la producción de neumáticos se hace de butadieno, que se puede obtener a través de la conversión catalítica del alcohol. Este proceso fue desarrollado en Rusia en el siglo XX. Actualmente hay demanda favorable de biomateriales en la industria automotriz.

El proceso comienza con la oxidación del etanol, se produce acetaldehído, que es un importante producto químico intermedio para la producción de otros, tales como ácido acético, ácido peroxiacético, acético anhídrido, butanol, crotonaldehído, pentaeritritol, cloral, piridina y ésteres de ácido acético. De esta manera, el etanol llega a través de la química, a diferentes mercados tales como: la agricultura, alimentación, embalaje, construcción, recubrimientos, tintas, cosméticos y productos farmacéuticos. Éteres etílicos son otra clase de productos derivados a partir de etanol. Etil ter-butil éter (ETBE) es un oxigenante aditivo de la gasolina que puede sustituir a metil ter-butil éter (MTBE). Por otra parte, el dietiléter también se puede obtener a partir de etanol. Se trata de un importante solvente para la industria química, que se utiliza en la producción de plásticos de celulosa, por ejemplo, acetato de celulosa. En la Figura 7 se observa como del etanol – acetaldehído se extraen varios coproductos químicos.

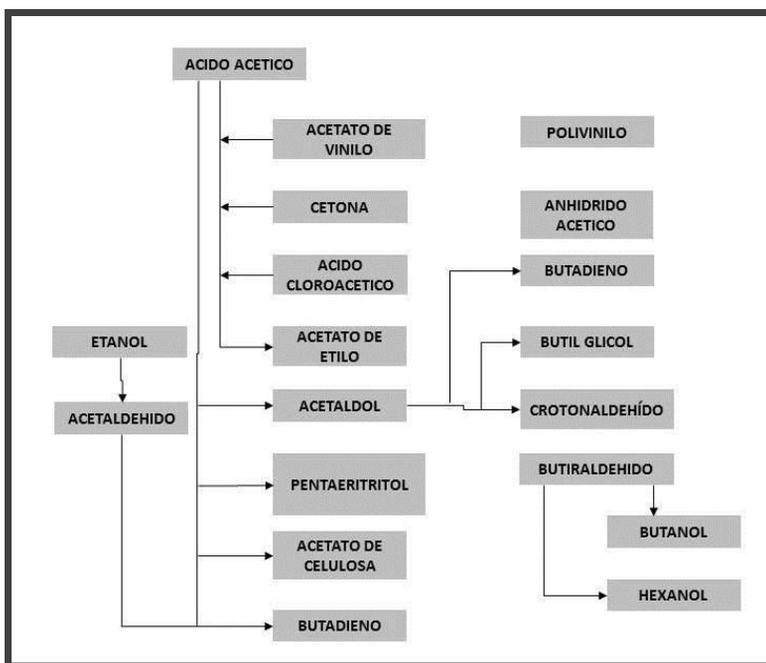


Figura 7. Derivados del etanol - acetaldehído (ICIDCA, 2000)

Biobutanol: Es un alcohol que ofrece varias ventajas. Se puede transportar en los gasoductos existentes, es menos corrosivo, se puede mezclar con gasolina o usarlo solo en los motores de combustión interna, y provee más energía por galón que el etanol. Hasta mediados del siglo XX, fue producido a partir de azúcares fermentados tales como la glucosa de maíz. Sin embargo, los bajos rendimientos, altos costos de la recuperación y el aumento de la disponibilidad de petróleo después de la Segunda Guerra Mundial dieron margen a la fermentación y a los sistemas de producción de Biobutanol. El proceso del biobutanol utilizó la bacteria *Clostridium* para realizar la tarea crítica de la fermentación. Tales procesos normalmente involucran cuatro pasos preparatorios realizados por separado y consecutivamente: pretratamiento, hidrólisis, fermentación y recuperación. El biobutanol es un líquido incoloro e insípido con un ligero olor. Otros nombres son metil-alcohol y alcohol de madera. Se produce a partir de gas natural, pero también se puede derivar a partir de fuentes de biomateria prima.

Metanol: Es una materia prima para muchos derivados en la industria química. Se utiliza para producir formaldehído, ácido acético y una variedad

de productos intermedios químicos. Estos derivados son en última instancia, usados en la fabricación de innumerables productos que encontramos en nuestra vida diaria, como: resinas, adhesivos, pinturas, tintas, espumas, siliconas, botellas de plástico, poliéster, disolventes y líquido limpiador de parabrisas. El metanol también es ampliamente considerado como un portador potencial de hidrógeno para muchas futuras aplicaciones de pilas de combustible. El metanol se encuentra entre los cuatro productos químicos más utilizados a nivel mundial. (Mohan, 2007)

Otros derivados (ICIDCA, 2000)

Dextrana: Es un polímero de la glucosa, su uso está limitado a cremas dentales, productos farmacéuticos, pinturas y pegamentos.

Goma xantana: Es un polisacárido con alta capacidad viscosificante, posee aplicaciones en muchas industrias como la alimentaria y petrolera.

Sorbitol: Es un alcohol hexacíclico que se obtiene a partir de la hidrogenación de la dextrosa. Por su valor energético y ser menos dulce que el azúcar se usa en la fabricación de alimentos de bajo contenido calórico y para diabéticos.

Glicerol: Se utiliza en la síntesis de resinas y gomas en la fabricación de explosivos, producción de celofanes, pastas dentífricas, cosméticos, productos farmacéuticos y preservativos de los alimentos.

Hidrogeno: Es considerado un combustible para el futuro, especialmente debido a que en su combustión tiene al agua como su residuo. Hay diferentes formas de producirlo, la reformulación de los hidrocarburos y su separación de la molécula de agua por electrolisis, el cual es el método industrial más utilizado. La reformulación del etanol y el uso de microorganismos están siendo estudiados. La posibilidad de reformular el etanol para la elaboración de hidrógeno es una alternativa en países productores de maíz y caña de azúcar, lo que hace posible su uso directo o por medio de pilas de combustible. Un estudio realizado en la generación de energía eléctrica en las celdas de combustible que emplean hidrógeno ha producido la reformulación del etanol y además se utilizan los residuos sólidos para la producción de biogás, éste suministra el combustible necesario para los procesos de destilación y la reformulación del etanol. Actualmente también se estudia la producción de hidrógeno microbiológico directamente de la energía solar por medio de bacterias anaeróbicas, las bacterias verdes y cianobacterias o algas azules.

su uso en los alimentos. En 1998, la sucralosa fue aprobada por la FDA para su uso en los Estados Unidos, ahora se utiliza en al menos 28 países. McNeil Especialidad Products Company, New Brunswick, Nueva Jersey, vende la sucralosa bajo la marca Splenda.

Olestra: Es un sustituto de la grasa a base de sacarosa, desarrollado por Procter & Gamble en la década de 1970. Fue aprobado para uso alimentario por la FDA en enero de 1996 tras años de pruebas. Para hacerlo, la sacarosa se hace reaccionar con los ácidos grasos para producir un poliéster de sacarosa líquida. Olestra es vendido por P & G con la marca Olean. Olestra tiene propiedades similares al aceite vegetal líquido, pero sin las calorías. En la actualidad, se utiliza para preparar aperitivos salados, en particular las papas fritas, en una alianza entre Frito-Lay y P & G.

Los fructo-oligosacáridos: Representan un interesante caso de estudio en el desarrollo de un nuevo producto, cae en algún lugar entre la categoría de aditivos alimentarios y nutracéuticos. También conocido como FOS, y comercialmente conocido como Neosugar y Meijioligo, FOS es un alimento saludable nuevo desarrollado por la fermentación o la transformación enzimática de la sacarosa. Es extremadamente popular en Japón, y también ha despertado el interés de Europa y América del Norte. FOS se dice que es bueno para "la salud abdominal" en el sentido que promueven el crecimiento de bifidobacterias en el intestino, que se supone otorgan muchos beneficios para el cuerpo. Con una dulzura que oscila entre 30 por ciento y 80 por ciento el de la sacarosa, dependiendo de la composición. Se vende en forma de jarabe o en polvo, por lo general contiene una cierta proporción de sacarosa, fructosa, junto con otros tres oligosacáridos: kestosa, nistosa y nistosa fructofuranosil. Entre algunos de sus prometedores usos no alimentarios son la protección de cerdos de la infección por *E. coli* y el control de olores porcinos.

Sucralfato: Es un complejo de hidróxido de aluminio, sulfato de sacarosa utilizado como un medicamento para la úlcera de seres humanos y animales. No se absorbe por el cuerpo y tiene sus propias características de la lucha contra la úlcera, y actuando como "vendaje de úlcera" ayuda activamente en la curación.

Polisucrosa: Es un copolímero de sacarosa y epiclrorhidrina, se utiliza para hacer gradientes de densidad para la separación celular y como un agente para diagnóstico. También tiene algún potencial como producto nutracéutico o como aditivo alimentario. Patentes de los Estados Unidos lo han promovido como un ingrediente en bebidas de rendimiento deportivo, y en la India como suplemento de hierro.

Ésteres de sucrosa: Éstos pueden tomar muchas formas, porque tienen ocho grupos hidroxilos disponibles para la reacción con numerosos grupos de ácidos grasos. Esta flexibilidad significa que muchos productos y funcionalidades pueden ser adaptados, con base en la fracción de ácido graso utilizado. Los ésteres de sacarosa tienen muchas aplicaciones en alimentos y usos no alimentarios, en especial como surfactantes y emulsificantes, con aplicaciones cada vez mayores en productos farmacéuticos, cosméticos, detergentes y alimentos, son fácilmente biodegradables, no tóxicos y suaves para la piel.

Acetato de isobutirato: Este (SAIB), es el de mayor volumen de utilización, tanto en alimentos como industrialmente. Se emplea en pinturas para automoción, como enturbador y agente estabilizador en las bebidas, en el esmalte de uñas y laca para el cabello, entre otros usos.

Detergentes de base sacarosa: De los ésteres de sacarosa se pueden hacer detergentes biodegradables no iónicos, con propiedades antibacterianas, este es otro pequeño pero creciente mercado. En Argentina, Derisa Corp. comercializa un detergente llamado sacarosa Sucrotex y detergentes de sacarosa también se fabrican en las Filipinas. En Europa, existe un gran interés en estos productos.

Sacarosa térmica-oligosacáridos caramelo: Los investigadores de la Universidad de Montana desarrollaron la sacarosa térmica oligosacáridos caramelo (COTS), mediante pirolisis controlada de la sacarosa. Sacarosa amorfa se calienta con ácido cítrico y produce Fructoglucan. Este funciona como un complemento alimenticio para mejorar el crecimiento de pollos de engorde y puede tener una aplicación como posible agente de alimentos sin calorías. Estos investigadores también han experimentado con la reacción de otros hidratos de carbono con sacarosa para fabricar otros productos. Por ejemplo, una reacción térmica controlada entre la sacarosa y la ciclodextrina produce compuestos fructoseciclodextrin con la capacidad de mejorar la solubilidad de los complejos de inclusión, transporte de sabores y vitaminas en alimentos procesados. Estos pueden tener aplicaciones como portadores de sabor y vitaminas en los alimentos.

Epóxicos: El doctor Nozar Sachinvala, un científico investigador del Centro de Investigación Regional del Sur del USDA en Nueva Orleans, ha descubierto una serie de epoxisucrosas que no son mutagénicas ni citotóxicas, que pueden pegar metal-metal, metal-vidrio y fibra-fibra. Los grandes mercados de adhesivos basados en sacarosa están probando a introducirlos en textiles, aislamientos de casas y otros materiales de construcción.

Hidrogeles (sucrogels): Compuestos conocidos como hidrogeles o sucrogels, se pueden hacer en un procedimiento de dos pasos. Mediante el ajuste de la relación de reticulación y la concentración de monómero inicial, las propiedades de los hidrogeles pueden ser manipulados en un amplio espectro. Los productos son superporosos con uso potencial en la liberación controlada de fármacos. Se pueden hacer en cualquier tamaño, forma y con las propiedades requeridas, tienen muchas aplicaciones industriales.

Plástico biodegradable (bioplástico): Un área que genera entusiasmo sobre el medio ambiente, la "química verde", es la producción de plásticos biodegradables naturales con microorganismos. Diversas especies de bacterias producen plásticos biodegradables, con almacenaje de polímeros dentro de sus células. Entre 50 por ciento – 60 por ciento del peso corporal del microorganismo pueden ser bioplásticos, y en algunos casos hasta el 90 por ciento. Los bioplásticos son caros, pero tienen la ventaja de que pueden ser procesados en el mismo equipo para la fabricación de los plásticos convencionales. Se están realizando investigaciones para diseñar bacterias para producir polihidroxialcanoatos (PHA) y otros polímeros. La fermentación se ha beneficiado de los recientes acontecimientos en la biotecnología. Estos resultados permiten la construcción de nuevos desarrollos en microorganismos. Como consecuencia, el rendimiento del proceso puede ser significativamente mejorado. Algunos ejemplos de sustancias químicas de producción fermentativa son los plásticos biodegradables como el Polihidroxibutirato (PHB), es un biopolímero obtenido de la caña de azúcar a través de un concepto totalmente renovable. El azúcar es el sustrato para la fermentación, un proceso que permite al microorganismo acumular el polímero. Las células se cosechan al final de la fermentación y el polímero se recupera a partir de la biomasa. La producción de copolímeros también es posible. La biodegradabilidad permite especiales aplicaciones, por ejemplo, tubos para el cultivo de plantas, que se degradan después que la semilla está plantada. Continúan las investigaciones para modificar genéticamente varias plantas para producir bioplásticos en lugar de los microorganismos. Por tanto, se puede suponer que en el futuro, la caña de azúcar será utilizada para producir una amplia gama de productos: edulcorantes, los biocombustibles, la bioenergía, los bioplásticos y otros productos químicos. El Cuadro 6 ilustra las perspectivas desde estos puntos de vista.

Cuadro 6. Perspectivas del desarrollo de los coproductos. (Langeveld, 2010)

Producto	Materias primas	Tamaño del mercado	Precio del mercado	Potencial compartir	Tamaño de producción	Impacto a productores	Potencial de empleo	Perspectivas de desarrollo
Farmacéutica	Cultivos selectos	muy pequeño	muy alto	muy grande	muy bajo	muy bajo		muy pobre
Química general	Almidón, azúcar, cultivos, proteínas	muy grande	bajo	modesto	muy bajo	muy bajo		pobre a modesto
Química fina	Aceites, pajas, almidón, azúcar, proteínas, cultivos	muy pequeño	promedio a bueno	bajo	bajo	modesto	muy limitado	modesto a bueno
Solventes	Aceites, pajas, almidón, azúcar, proteínas, cultivos	pequeño	bajo	muy bajo	muy bajo	muy bajo	muy limitado	muy pobre
Surfactantes	Varios	pequeño	bajo	modesto	bajo	bajo	muy limitado	Pobre
Lubricantes	Aceites	muy pequeño	bajo	modesto a alto	bajo	bajo	bueno	modesto a bueno
Polímeros	Almidón y azúcar	muy largo	muy bajo	bajo	modesto	muy bajo	muy limitado	muy limitado
Fibras	Lignocelulosa, grasas, cultivos	Modesto	bajo	bajo	modesto	bajo	bueno	modesto a bueno

Coproductos y derivados de la cañaza

Cera: La cera, el aceite y la resina componen las tres fracciones de la cera cruda de la cañaza. La cera refinada se usa en betunes, pulimentos para pisos, cosméticos, tintes, emulsiones para frutas, etcétera.

Fitosteroles: El aceite de la cañaza es un producto obtenido en la refinación de las ceras, representa una fuente de fitosteroles. La mezcla de fitosteroles tiene un amplio uso en la industria farmacéutica, para la obtención de hormonas tales como la progesterona, pregnenolona, testosterona y sus derivados.

Removedores de hidrocarburos: El bagazo y la cañaza, como bio-remediadores de suelos se han utilizado como texturizantes y enmiendas de suelos con derrames de hidrocarburos tales como petróleo, diésel y gasolina. La cañaza además de funcionar como enmienda, presenta la ventaja de aportar microorganismos al suelo con la capacidad de biotransformar los tóxicos. (García, 2011)

Coprodutos y derivados de la vinaza

Fertirriego con la vinaza: La vinaza es el residuo de la industria alcoholera, es aplicada en los cultivos de la caña de azúcar, principalmente porque constituye una fuente de potasio y otros nutrientes para el propio cultivo, además de proporcionar carbohidratos rápidamente asimilables, que favorecen el crecimiento microbiano. La descomposición de la paja depende de la acción de los microorganismos, que son los principales responsables de la mineralización y reciclaje de los nutrientes en el suelo. El aumento de la producción de CO₂ puede ser considerado como el resultado de la mineralización de la paja, debido al aumento de la actividad microbiana. La adición de vinaza estimula la producción de CO₂ y la actividad de la celulosa de la paja (Sanomiya, 2006). Se propone como alternativa ambientalmente más factible e inmediata, el fertirriego, mezclado con los líquidos residuales del ingenio en período de zafra, y aplicado con no más de cinco días de retención (Perdigón, 2004).

Biogás: La vinaza es fundamental para la producción de bioenergía, pues constituye la materia prima empleada en la producción de biogás. En las características generales de este compuesto destaca que es baja en pH, alta en temperatura, alta en demanda biológica de oxígeno (DBO), alta en demanda química de oxígeno (DQO) y posee importantes contenidos de nutrientes. Para el aprovechamiento del potencial presente en sus características físico químicas, la vinaza se somete a un proceso de digestión anaeróbica a través del cual se logra captar el metano. Luego de captarlo en cámaras especialmente acondicionadas en los biodigestores, se canaliza hacia la planta industrial, en donde se emplea como combustible para alimentar las calderas que conforman el sistema de producción de vapor y generar así la energía renovable o bioenergía que requiere la planta industrial para operar. (Meneses, 2008)

BIBLIOGRAFÍA

1. Almazán, O.; González, Gálvez, L. 1998. The Sugar Cane, its byproducts and coproducts. Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba. 12 p.
2. Alriksson, B. *et al.* 2009. Cellulase production from spent lignocellulose hydrolysates by recombinant *aspergillus niger*. 10 p.
3. Broderick, G. A.; Radlo, W. J. 2004. Effect of molasses supplementation on the production of lactating dairy cows fed diets based on alfalfa and corn silage. 13 p.

4. Brossard, L. E.; Penedo, M. Pirolisis al vacío del bagazo de la caña de azúcar. 10 p.
5. Cabello, A. 2002. La producción de derivados de la caña de azúcar en Cuba, situación actual y perspectiva. pp. 12
6. Craig, K.; Overend R. 1995. Biomass power systems, where are we, where are we going, and how do we get there? 19 p.
7. Ferrer, J.; Davalillo, Y.; Chandler, C.; Páez, G.; Mármol, Z.; Ramones, E. 2004. Producción de proteína microbiana a partir de los desechos del procesamiento de la caña de azúcar (bagacillo). 59 p.
8. García, C.; Bueno, V. Estudio toxicológico de un producto derivado de la caña de azúcar. 11 p.
9. García, R. 2011. Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado.
10. Godshall, M. A. Future directions for the sugar industry. 8 p.
11. Gravitis, J.; Suzuki, M. 1993. Biomass refinery a way to produce value added products and base for agricultural zero emissions system. 14 p.
12. ICIDCA. 2000. Manual de los derivados de la caña de azúcar. MINAZ, La Habana, Cuba, tercera edición. 458 p.
13. Jeffries, T. W.; Schartman, R. Bioconversion of secondary fiber fines ethanol using counter current enzymatic saccharification and cofermentation.
14. Kodera, K. 2007. Analysis of allocation methods of bioethanol LCA. 55 p.
15. Langeveld, J. W.; Dixon, A. J.; Jaworski, J. F. 2010. Development perspectives of the biobased economy: A review. pp. 141-151.
16. Martínez, L.; Quintana, R.; Martirena, J. F. Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante. 15 p.
17. Médoc, J.; Guerrin, F.; Courdier, R. Paillat, J. A multi modelling approach to help agricultural stakeholders design animal wastes management strategies in the reunion island. 6 p.

18. Meneses B. 2008. www.Sugarjournal.com. La Producción de Biogás con Vinaza una Alternativa Factible para Contribuir al Desarrollo de la Bioenergía. pp. 17-18.
19. Mohan, P. 2006. Liquid energy from cane in India. India. 6 p.
20. Murillo, F.; Araujo, C.; Bonfá, A.; Porto, W. 2011. Chemistry based on renewable rawmaterials: Perspectives for a sugar cane based biorrefinery. 8 p.
21. Paturau, J. M. Usos Alternativos de la caña de azúcar y sus derivados en las agroindustrias. 22 p.
22. Perdigón, S. M. La vinaza de jugos de caña energética y su aplicación en los suelos cañeros. 11 p.
23. Pound, B.; Preston, T.R. 1981. Biogas production from mixtures of cattle slurry and pressed sugar cane stalk, with and without urea. pp 11.
24. Sanomiya, L.; Assis, L.; De Oliveira, J. Nahas, E. Mineralización de la paja de caña de azúcar en suelo adicionado con vinaza, subproducto de la industria del alcohol de caña de azúcar y fertilizante. 8 p.
25. Serna, L. S.; Rodríguez, A. 2007. Lactic acid fermentative production using waste from the harvest of green sugar cane as a substrate. 6 p.
26. Worathanakul, P.; Payubnop, W.; Muangpet, A. 2009. Characterization for posttreatment effect of bagasse ash for silica extraction. 3 p.

XV. LA METEOROLOGÍA EN CAÑA DE AZÚCAR

LA METEOROLOGÍA EN CAÑA DE AZÚCAR

Otto Castro y Alfredo Suárez*

INTRODUCCIÓN

Para analizar los efectos meteorológicos que año con año inciden en la producción de caña de azúcar es importante contar con una red de estaciones meteorológicas bien distribuidas en cada uno de los estratos altitudinales, las cuales deben medir: Lluvia, radiación global o brillo solar, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. El análisis de estas variables permite entender los efectos positivos o negativos del clima en la producción de la caña de azúcar en cada uno de los estratos altitudinales y entre años de producción. Este entendimiento ayudará a desarrollar alternativas de manejo para minimizar los efectos climáticos adversos.

Cabe destacar que actualmente la Agroindustria Azucarera Guatemalteca cuenta con un sistema de información meteorológica automatizado, que constituye una opción que permite visualizar las variables meteorológicas en tiempo real y despliegue de información climática de varios años y sitios. La información en tiempo real contribuye a manejar con mayor eficiencia las labores donde las variables meteorológicas son importantes, como el caso de aplicaciones de productos químicos o aplicaciones de riego. El análisis de la información climática permite estudiar los efectos en las variables meteorológicas a causa de la incidencia de fenómenos como el ENSO y/o cambio climático, así mismo, el estudio de las relaciones entre las variables meteorológicas en el comportamiento de los balances: Energético e hídrico.

SISTEMA DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Antecedentes

En el año de 1997, se dio inicio a la creación de la red automática de estaciones meteorológicas de la Agroindustria Azucarera de Guatemala (AIA), con el objetivo principal de disponer en tiempo real de información meteorológica que ayudará a la toma de decisiones en el manejo del cultivo de la caña de azúcar, principalmente en el tema de quemadas. En ese mismo año se instaló en el Centro

* Otto Castro es Ing. Agr., M.Sc. Especialista en Riegos y Agrometeorología de CENGICANA www.cengicana.org y Alfredo Suárez es Ing. Agr., M.Sc. Coordinador del Programa de Investigación en Clima e Hidrología del ICC. www.icc.org.gt

Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar – CENGICANA, la primera estación meteorológica automática. De ahí que ASAZGUA delegó al Centro la administración, operación y mantenimiento de la red de estaciones; actividad que cumplió hasta marzo de 2011, cuando la red pasa a ser responsabilidad administrativa y operacional del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC¹).

Desde su año de creación, la red de estaciones se ha ido expandiendo de acuerdo con las necesidades de la Agroindustria Azucarera de Guatemala; a la fecha, 16 estaciones meteorológicas automáticas operan dentro de un área aproximada de 230,000 hectáreas de caña de azúcar, tal y como se presenta en el mapa de la Figura 1. Así mismo, se puede observar que a cada estación se le ha determinado su área de influencia que para el año 2011 era un aproximado de 14,375 hectáreas en promedio. Para el año 2015 se espera tener al menos 1 estación por cada 10,000 hectáreas de caña de azúcar sembrada, distribuidas proporcionalmente dentro de los estratos altitudinales de la zona cañera del sur de Guatemala.

La red de estaciones meteorológicas automáticas

Como se mencionó anteriormente, la red de estaciones de la Agroindustria Azucarera de Guatemala cuenta con 16 estaciones meteorológicas automáticas distribuidas en la región de la costa sur de Guatemala, en los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez y Retalhuleu, desde los 10 hasta los 300 metros sobre el nivel del mar (msnm). En el Cuadro 1 se presenta información pertinente a la localización geográfica, altitud y estrato altitudinal de cada una de las estaciones. Las áreas donde se localizan las estaciones meteorológicas pertenecen a los ingenios azucareros de la región, quienes se encargan de la seguridad y mantenimiento del área y, además, son los principales usuarios de la información.

Es importante observar en el Cuadro 1 que la distribución del número de estaciones por estrato altitudinal es proporcional al área cultivada de caña para cada estrato. De esta manera es que las estaciones en el estrato alto, medio, bajo y litoral corresponden al 7, 24, 22 y 47 por ciento de área cultivada, respectivamente.

La red de estaciones constituye una útil herramienta para la Agroindustria Azucarera de Guatemala, pues a diferencia de las estaciones convencionales, provee información en tiempo real con un alto grado de precisión, eliminando el error humano en la toma e interpretación de los datos.

¹ Institución creada por ASAZGUA en el año 2010, cuyo objetivo principal es el desarrollo de programas de investigación que contribuyan al diseño de estrategias de reducción de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en comunidades, procesos productivos e infraestructura de la región.

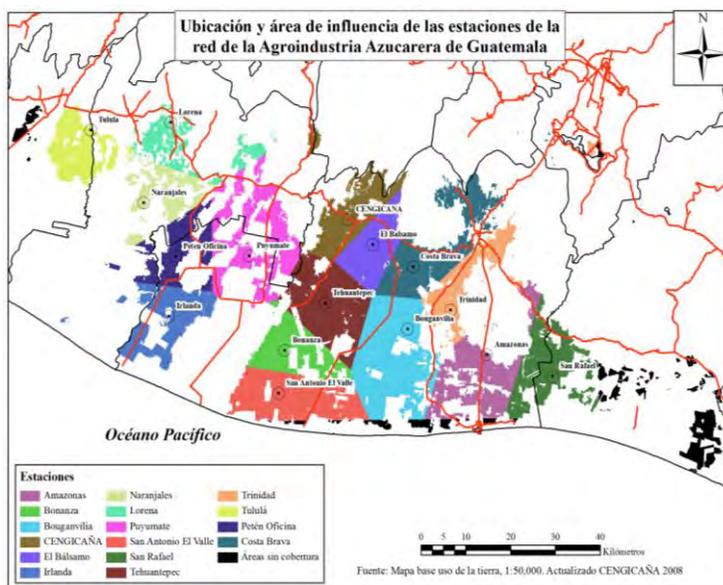


Figura 1. Red de estaciones meteorológicas automáticas de la AIA. Año 2011

Cuadro 1. Estaciones automáticas de la red. Año 2011

Estación	Código	Inicio de operaciones	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)	Estrato altitudinal
CENGICAÑA	CEN-CEN	18/11/1997	-91.055468	14.330962	300	Alto
Lorena	PAG-LOR	14/09/2009	-91.419603	14.520233	340	Alto
El Balsamo	PAN-BAL	13/02/2002	-91.003744	14.281468	280	Medio
Costa Brava	SDT-CBR	16/10/2008	-90.920738	14.237773	144	Medio
Tululá	TUL-TLA	22/02/2007	-91.586101	14.506967	253	Medio
Tehuantepec	LU-TEH	04/03/1998	-91.103443	14.168625	60	Bajo
Puyumate	PAN-PUY	14/02/2002	-91.259910	14.261557	86	Bajo
Trinidad	SDT-TRI	01/06/2003	-90.844006	14.153762	68	Bajo
Bouganvilia	MAG-BOU	14/03/2004	-90.933352	14.117690	60	Bajo
Petén Oficina	MAT-PEO	09/10/2008	-91.411898	14.260987	51	Bajo
Naranjales	PAG-NJR	30/10/2007	-91.476996	14.365688	91	Bajo
San Antonio el Valle	MAG-SAV	27/02/2002	-91.200961	13.995364	10	Litoral
Amazonas	SAA-AMA	01/06/2003	-90.769984	14.066614	28	Litoral
Irlanda	CEN-IRL	06/06/2003	-91.426867	14.145889	20	Litoral
Bonanza	LU-BON	23/10/2003	-91.187235	14.078341	29	Litoral
San Rafael	PAN-SAR	16/02/2010	-90.634491	14.023491	10	Litoral

Nota: CEN – CENGICAÑA; LU – La Unión; MAG – Magdalena; MAT – Madre Tierra; PAG – Palo Gordo; PAN – Pantaleón; SAA – Santa Ana; SDT – San Diego/Trinidad; TUL – Tululá.

En la Figura 2 se presenta la estructura y diseño de una estación meteorológica automática que opera dentro de la red.



Figura 2. Estación meteorológica automática ubicada en ingenio Tululá

Generación de información

Las estaciones automáticas recolectan información de siete variables meteorológicas relacionadas con el cultivo de la caña de azúcar (a excepción de la estación CENGICANA que también mide presión atmosférica), las cuales son: Precipitación, radiación solar global (directa + difusa), temperatura, humedad relativa, mojadura de hoja, velocidad y dirección del viento. Las estaciones generan registros de información cada 15 minutos, para un total de 96 registros diarios por variable en cada estación. Además del sensor de presión atmosférica, la estación CENGICANA cuenta con un heliógrafo para la medición diaria del brillo solar.

Los datos meteorológicos son transmitidos a un servidor central localizado en CENGICANA, donde se ponen a disposición de los usuarios de la

Agroindustria Azucarera por medio del Portal Web del Centro (www.cengicana.org). Es importante indicar que el ICC tiene un procedimiento de control de calidad de datos que se realiza semanalmente, por lo cual la información se revisa y actualiza cada siete días. Este es uno de los valores agregados que da el área de Agrometeorología de ICC a los datos meteorológicos, puesto que además de revisarlos y procesarlos, los almacena en una base de datos histórica que está también a disposición de los usuarios de la Agroindustria y de investigadores de CENGICANA para análisis climatológicos relacionados con el cultivo.

USO DE LA METEOROLOGÍA EN CAÑA DE AZÚCAR

En la Figura 3, se diagraman las variables del clima más importantes que inciden directamente en la caña de azúcar, se observa que la variable principal es la energía que se recibe del sol en el tiempo y espacio, tanto en cantidad y duración; la latitud define el número de horas luz o fotoperiodo, el cual es variable a través del año y determinante en el balance energético. También la energía del sol, aunado al comportamiento de fenómenos atmosféricos (se analizará más adelante), influye grandemente en el comportamiento de la lluvia, temperatura, viento y humedad en el ambiente, esto a la vez, determinará la demanda climática (ET_o) y cantidad de energía solar para la fotosíntesis en la caña de azúcar en todo su ciclo. Las relaciones entre la lluvia, la demanda hídrica del cultivo y la capacidad del suelo de retener agua serán importantes en el balance hídrico en cada una de las etapas fenológicas de la caña de azúcar. El resultado del balance energético y el balance hídrico puede ser positivo o negativo. En relación con la acumulación de azúcar, las variables del tiempo atmosférico y clima, que explican el comportamiento de la acumulación de azúcar en la etapa de madurez, están referidas con el mayor peso al balance hídrico y el comportamiento de la temperatura.

Es importante mencionar que la acumulación de biomasa y sacarosa en caña de azúcar, en el tiempo y espacio, año con año ha sido muy variable en la zona cañera guatemalteca, lo que hace más interesante la intervención de la agrometeorología como ciencia, la cual con sus análisis orienta para una mejor toma de decisiones en cuanto a la selección de la tecnología más adecuada.

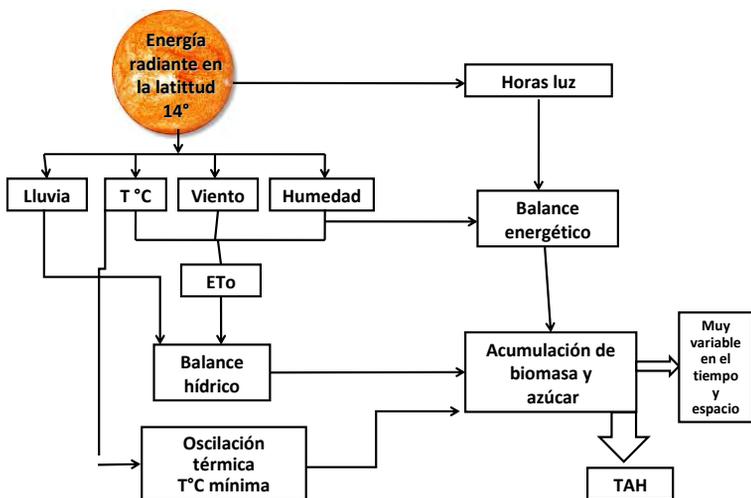


Figura 3. Variables del clima más importantes que inciden directamente en la caña de azúcar
 Fuente: Castro, 2010

El balance de energía solar

La energía solar que se recibe en un punto geo-referenciado del planeta es constante para cada año, pero diferente en otros puntos, dado a que el eje de rotación de la tierra está a $23^{\circ} 27'$ en relación con el eje de traslación, esto, aunado al movimiento aparente del sol; definen que la cantidad y duración de energía en cada latitud sea diferente.

Radiación solar al límite de la atmósfera en latitud 14° : El comportamiento de la radiación solar en latitud 14° durante el año es definida y constante a través de los años, de esta manera, en el período del 18 de abril al 20 de agosto se recibe al límite de atmósfera entre 38.16 y 37.86 MJ/m²/día de energía, respectivamente, el cual constituye el período de máxima energía (FAO, 2008). En diciembre esta energía se reduce en un 24 por ciento. La máxima duración de energía se registra el 21 de junio de cada año, con 12.84227 horas y décimas. En diciembre existe una reducción de 1 hora 39 minutos y 57.89 segundos.

Radiación solar en la superficie terrestre en la latitud 14° : En días de cielo despejado donde $n=N$, en el cual n es la duración real de la insolación o brillo solar y N la duración máxima posible de la insolación, la radiación solar podría alcanzar en el período del 18 de abril al 20 de agosto las máximas cantidades de energía, que equivalen, según modelo de la FAO, alrededor de 28.85 MJ/m²/día, principalmente en localidades cerca del nivel del mar, es decir al 75.6 por ciento

de la energía recibida al límite de la atmósfera. En la historia de registros de radiación global con el piranómetro SP-lite, el registro máximo alcanzado ha sido de 27.39 MJ/m²/día en la estación meteorológica ubicada en la finca Irlanda del estrato litoral, el 2 de octubre 2009, equivalente al 78 por ciento del total. La radiación potencial máxima en la latitud 14° que se podría registrar en localidades cerca del nivel del mar estaría en el intervalo entre 72-78 por ciento del total recibido al límite de la atmósfera.

En las condiciones de la zona cañera de Guatemala, las cantidades de energía que llega a la superficie terrestre son fluctuantes cada año. En la Figura 4 se observan los diferentes escenarios de la radiación solar, la cantidad de energía solar que llega al límite de la atmósfera en la latitud 14° (Ra), la cantidad de energía solar si n=N (Rdd) y la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre medida con el piranómetro (Rg), registrada en los últimos cuatro años. La fluctuación de la energía solar registrada como radiación global (radiación solar directa o radiación de onda corta + radiación difusa) año con año se debe, principalmente, a la incidencia de nubes. Es importante indicar que

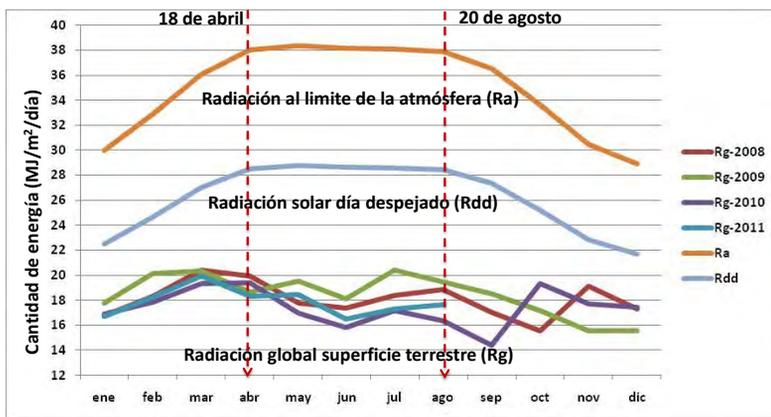


Figura 4. La radiación al límite de la atmósfera (Ra), la radiación en un día despejado (Rdd) y la radiación global (Rg) de las zafras 2007/2008 a 2010/2011 en la latitud 14° (CENGICAÑA, 2010)

El balance hídrico

Períodos determinantes de déficit hídrico: En la zona cañera de Guatemala existe un período seco variable en cada uno de los estratos altitudinales que en sus extremos se extiende del inicio de noviembre al 30 de mayo de cada año y el resto es un período con lluvia. La variabilidad en años del balance hídrico entre

el período seco y lluvioso se debe, principalmente, al establecimiento del inicio y el final del invierno desde el punto de vista agrometeorológico (inicio y final estable de la lluvia), así mismo, a la entrada de la canícula. (Ver conceptos en el anexo de entrada y salida del invierno, canícula).

Entrada del invierno (inicio de las lluvias): Los resultados de investigación (se utilizó información climática de estaciones meteorológicas con registro de 30 años de la variable precipitación pluvial “Camantulul”, ubicada a los 300 msnm y “San José” ubicada a los 10 msnm, propiedad del INSIVUMEH), muestran y confirman que la entrada del invierno es variable cada año y en cada estrato altitudinal de la zona cañera guatemalteca. En la Figura 5, se observa un análisis histórico de las entradas del invierno de la localidad Camantulul, que representa el estrato entre medio y alto (300 msnm) y San José que representa el estrato litoral del Pacífico (10 msnm), muestra que en promedio la entrada del invierno en Camantulul es el **22 de abril** y en San José es el **10 de mayo**. Históricamente, en Camantulul, la variación es de 71 días (entre el 15 de marzo al 25 mayo) y en el litoral del Pacífico la variación es de 45 días (entre el 20 de abril al 5 de junio). La entrada del invierno más tardía fue en los años 1997 y 1998, período en que incidió el fenómeno del Niño más fuerte de la historia.

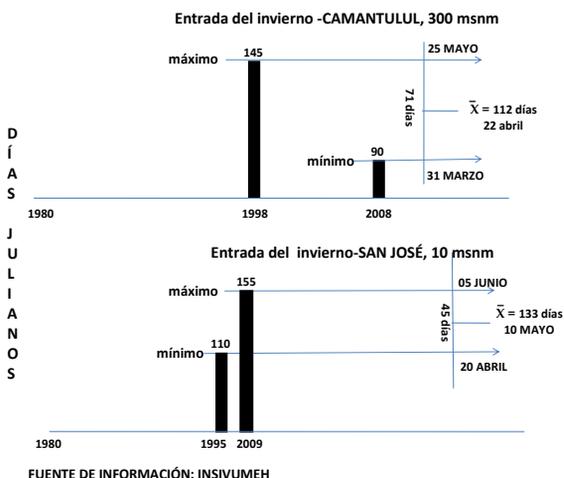


Figura 5. Análisis histórico de la entrada del invierno en dos estratos altitudinales de la zona cañera guatemalteca

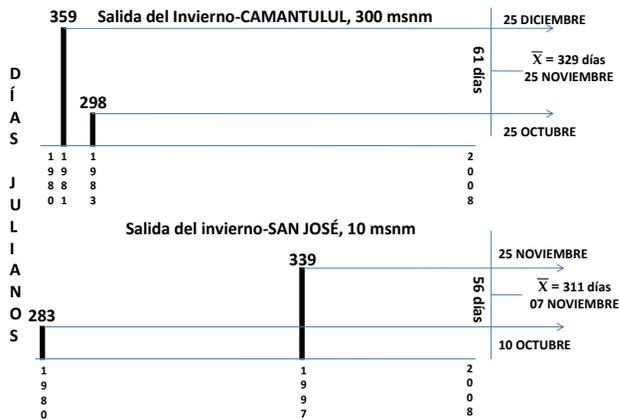
Canícula (reducción de la lluvia entre julio y agosto): Como sucede con la entrada del invierno, el período en que se presenta la canícula es variable cada año y en cada estrato altitudinal de la zona cañera guatemalteca, así como también su duración. En el estrato alto, la disminución de los días de lluvia en julio y agosto (según registros en la estación meteorológica Camantulul desde 1980 a la fecha) no ha sido mayor de 10 días, lo que desde el punto de vista de riego significa que no existen efectos significativos en el rendimiento. Caso contrario, sucede en el estrato del litoral del Pacífico (0 – 40 msnm) donde los efectos son mayores, principalmente, en suelos con predominancia de arena y sin aporte capilar. En el Cuadro 2 se observa la disminución de la lluvia en julio y agosto, a causa de la canícula en el litoral de Pacífico guatemalteco, por ejemplo, se presentan los años 1982 y 1989 considerados años secos y en un período largo, el año 1988 como una canícula corta, y el año 1997 como una canícula tardía (del 20 al 30 de agosto).

A Ñ O	JULIO						AGOSTO						# Pentadas con lluvia menor de 25 mm	Pentadas continuas
	05	10	15	20	25	30	05	10	15	20	25	30		
	Lluvia acumulada de cinco días en mm													
1982	1	11	12.5	4.3	34.5	14.1	32.2	0	12	4.5	0	37	9	4
1988	87.8	15.7	39.7	24.8	6.3	2.4	55	64.2	257.9	17.7	91.7	130.4	4	2
1989	10.2	8.9	1.9	18.2	11.3	319.4	8.3	12.5	85.2	8.5	21.8	70.5	9	5
1997	168.2	0	3	26.6	35.2	52.8	13	37.5	61.6	13.7	0	11	6	3

Fuente de información: INSIVUMEH

Fuente de información: INSIVUMEH

Salida del invierno (fin de la temporada de las lluvias): En la Figura 6 se observa que, en promedio, la salida del invierno en Camantulul es el 25 de noviembre y en San José, es el 7 de noviembre. Las diferencias entre estos dos estratos está en la variabilidad en que se presenta cada año, históricamente en Camantulul la variación es de 61 días (entre el 25 de octubre al 25 de diciembre) y en el litoral del Pacífico la variación es de 56 días (entre el 10 de octubre al 25 de noviembre). El año más tardío de la salida del invierno fue en 1981 para Camantulul y 1997 para San José, mientras que los años más tempranos fueron en 1983 para Camantulul y 1980 para San José.



FUENTE DE INFORMACIÓN: INSIVUMEH

Figura 6. Análisis histórico de la salida del invierno en dos estratos altitudinales de la zona cañera guatemalteca

Las variables meteorológicas en la acumulación de azúcar en la etapa de maduración

En los últimos 45 días del ciclo de la caña de azúcar (etapa de maduración), se incrementa la mayor cantidad de sacarosa. La capacidad para producir sacarosa depende, principalmente, de la variedad, manejo y las condiciones climáticas que incidan en esta etapa, tales como: Temperatura, brillo solar, precipitación atmosférica y viento.

El comportamiento de la temperatura en la zona cañera guatemalteca es variable en cada uno de los meses del año², así también en cada uno de los años. De los efectos de la temperatura en la acumulación de azúcar, la amplitud térmica (diferencia en grados centígrados de la temperatura máxima y mínima) y la temperatura mínima son los más importantes.

En la Figura 7 se presenta un análisis gráfico de la relación general de la amplitud térmica y el rendimiento de azúcar por período de zafra, se observa que durante los períodos del 1999/2000 al 2005/2006 el rendimiento de azúcar y amplitudes térmicas fueron altas, no así, en los períodos 2006/2007 al 2010/2011, donde los rendimientos de azúcar y las amplitudes térmicas han sido más bajas.

² **VARIACIONES DE TEMPERATURA:** La cantidad de energía solar recibida, en cualquier región del planeta, varía con la hora del día, con la estación del año y con la latitud. Estas diferencias de radiación originan las variaciones de temperatura. Por otro lado, la temperatura puede variar debido a la distribución de distintos tipos de superficies y en función de la altura.

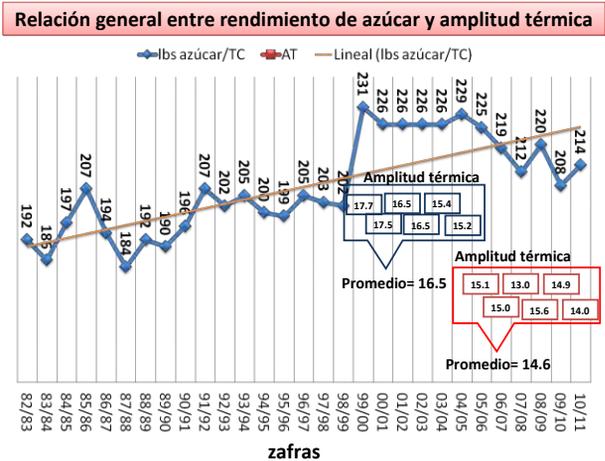


Figura 7. Relación histórica general entre el rendimiento de azúcar y el comportamiento de la amplitud térmica. Zona cañera guatemalteca

Cuando se analiza el comportamiento general del rendimiento de azúcar durante la zafra y la amplitud térmica durante el período de zafra, se observa que en los meses de mayor amplitud térmica (de diciembre a marzo) han sido mayores, de 215 libras de azúcar/TC. Noviembre, abril y mayo, históricamente han sido los meses de menor rendimiento, y se asocia a amplitudes térmicas menores de 15°C tal como se observa en la Figura 8.

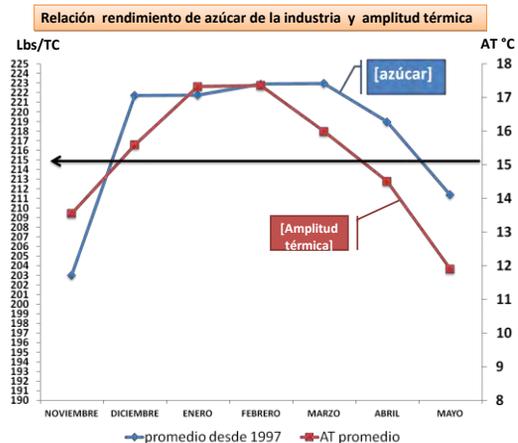


Figura 8. Relación general histórica del rendimiento de azúcar y el comportamiento de la amplitud térmica por cada mes de zafra. Zona cañera guatemalteca. CENGICAÑA, 2009

Con información histórica de rendimiento de azúcar a nivel de lote cercanos a la estación meteorológica Belén (La Unión – Los Tarros), se determinó que el grado de asociación a través de la correlación de Pearson entre la variable temperatura (temperatura promedio mínima de 30 y 45 días acumulado antes de la cosecha) y el rendimiento de azúcar comercial fueron de -0.74 y -0,73. El coeficiente de regresión indica que por cada grado centígrado que aumenta la temperatura mínima, el rendimiento de azúcar disminuye en 10.541 libras por tonelada de caña (ver Figura 9). De esta manera se comprobó que a temperatura mínima menor a 18 ° C (promedio 30 días antes del corte) proporcionan mayor acumulación de azúcar de forma natural. Aunado al comportamiento de la amplitud térmica, también se analizó que las lluvias mayores a 20 mm (acumulado 30 días antes del corte) reducen ϵ

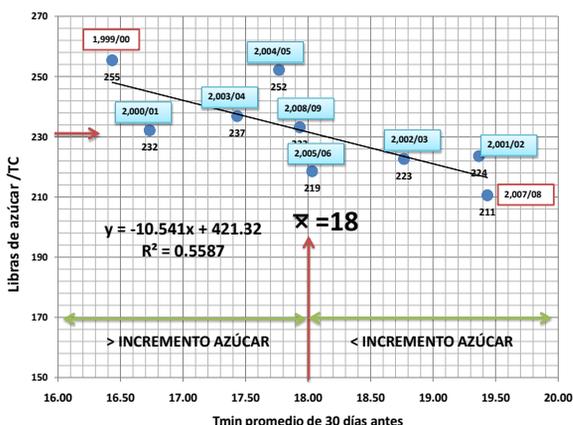


Figura 9. Análisis de regresión con las variables: Temperatura mínima promedio de 30 días antes de la cosecha (X) y el rendimiento de azúcar, libras de azúcar por tonelada de caña (Y), caso del lote 3.060 del ingenio La Unión

EFFECTO DE FENÓMENOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA LATITUD 14°

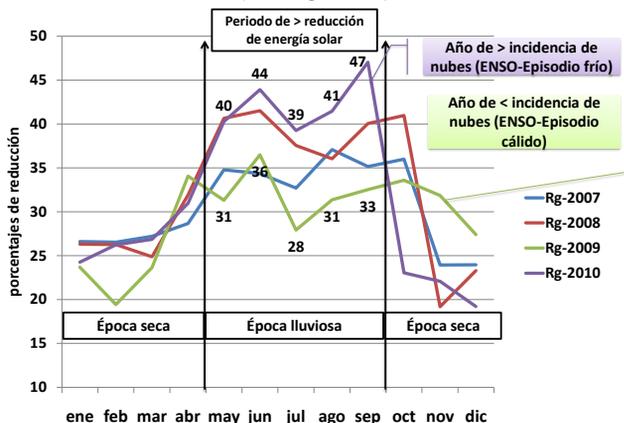
El fenómeno meteorológico que más influye en el comportamiento del clima en nuestra latitud es, sin lugar a dudas, el conocido como: El Niño o La Niña, cuyo nombre científico es ENSO (El Niño-Southern Oscillation), el cual consiste en un cambio en los patrones de movimiento de las corrientes marinas en la zona intertropical. En consecuencia, produce una superposición de aguas cálidas procedentes de la zona del hemisferio norte inmediatamente al norte del Ecuador sobre las aguas de emersión muy frías que caracterizan la corriente de

Humboldt. Entre los principales efectos en nuestra latitud se traducen en el comportamiento de la radiación global, lluvia, humedad relativa y temperatura.

Efectos del El ENSO en el balance de energía

El ENSO es la principal causa de la fluctuación de la cantidad de la radiación global que llega a la superficie terrestre en nuestra latitud. En años con incidencia de ENSO-Episodio frío (La Niña), se incrementa los sistemas de baja presión que genera períodos de mayor nubosidad de lo normal, por lo que la cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre se reduce, afectando el proceso de fotosíntesis en la caña de azúcar. Caso contrario ocurre en años con incidencia de ENSO-Episodio cálido (El Niño), los sistemas de alta presión aumentan en la época de lluvias, causando que las canículas se prolonguen y existe una mayor cantidad de días con cielos despejados.

En la caña de azúcar, los efectos negativos o positivos del ENSO se producen en la estación lluviosa, principalmente, del 18 de abril al 20 de agosto (período en que se recibe la mayor cantidad de energía en nuestra latitud). Por ejemplo, en un año de baja producción como la zafra 2010/2011 (ENSO-Episodio frío), la energía solar en el periodo de lluvia (mayo-septiembre) se redujo con un máximo de 47 por ciento, mientras que en un año con alta producción como la zafra 2009/2010 (ENSO-Episodio cálido), la reducción máxima fue de 36 por ciento. Se observa que en la zafra 2009/2010 la reducción de la cantidad de radiación global en agosto, mes determinante en la fisiología de la caña, es más baja que los otros años indicados (ver Figura 10).



Fuente: promedio de radiación global (Rg) de 13 estaciones meteorológicas
 Fuente: promedio de radiación global (Rg) de 13 Estaciones meteorológicas, CENGICANA
 ANÁLISIS: U. Castro, Área de agrometeorología

Figura 10. Porcentajes de reducción de la radiación solar que llega a la superficie terrestre en los últimos cuatro años en la latitud 14°

Efectos del ENSO en el balance hídrico

El efecto más significativo del ENSO en nuestra latitud es la alteración en cuanto al comportamiento de la lluvia en el período considerado seco. Los efectos en la entrada del invierno para el estrato alto están bien diferenciados cuando se separa los efectos del ENSO según sus episodios. **En un ENSO-Episodio frío (La Niña)**, se traduce a más lluvia en el período seco, de esta forma, se presentan lluvias aisladas la mayoría de veces intensas, desde el punto de vista agrometeorológico representa una entrada del invierno más temprano. Este período se caracteriza por presentar muchos días con nubosidad. La entrada del invierno puede establecerse del día juliano 90 (31/marzo) al día juliano 130 (10/mayo). En un **ENSO-Episodio cálido (El Niño)**, se traduce a más sequía, principalmente cuando los índices ONI (Oceanic Niño Index) son altos. El invierno entra más tarde y existe menos nubosidad. Cuando los registros de los índices ONI son mayores a 1.8 (Niño con calificación fuerte) el invierno puede presentarse hasta el día juliano 145 (25 de mayo) como sucedió en el año 1998, año en el cual no existieron lluvias aisladas intensas en el período de verano en este estrato.

Los efectos en la entrada del invierno para el estrato litoral, que es el otro extremo, difieren en relación al estrato alto y ENSO según sus episodios. En este estrato, los efectos del ENSO-Episodio frío (La Niña) y cálido (El Niño) son similares, hasta registros de índices ONI entre más y menos 1.5. La diferencia de los efectos está que en un año con ENSO-Episodio cálido, la entrada del invierno es más tardía cuando el índice ONI es mayor a 1.5 (Niño con calificación fuerte), en este caso, la entrada del invierno puede darse hasta en los primeros diez días de junio, como sucedió en los años: 1983, 1992, 1998 y 2009.

Efectos del ENSO en la producción de caña (TCH)

El ENSO en la historia productiva de caña: Cuando se analiza la historia productiva de la zona cañera de Guatemala, (ver Figura 11) se observa que durante los años con ENSO-Episodios cálidos se han obtenido los rendimientos más altos, principalmente, a partir de la década del 2000 cuando se han alcanzado toneladas de caña por hectárea hasta de 103, como sucedió en la zafra 2009/2010. La pendiente indica que por cada año que se ha presentado este episodio se alcanza 1.17 TCH más. Mientras que en años con ENSO-Episodios fríos no se ha superado las 91 TCH máximo, que se obtuvo en el año 2008 (año ENSO-episodio frío calificado como débil). La pendiente indica que por cada año que se ha presentado este episodio se alcanza 0.82 TCH más, 0.35 TCH

menos si se compara con el ENSO-Episodio cálido. Las tendencias positivas en los tres escenarios ENSO que se presentan refleja que el desarrollo tecnológico alcanzado en la década del 2000 ha sido importante para minimizar los efectos negativos del ENSO. En los últimos años han existido contrastes bien marcados, el período de cultivo 2009 (ENSO-Episodios cálidos, fuerte) con zafra récord de 103 TCH y el periodo de cultivo 2010 (ENSO-Episodios frío, fuerte) con una producción de 89 TCH, 14 por ciento menor que la obtenida en la zafra 2009/10. Es importante indicar que la cantidad de radiación global que se recibe principalmente en agosto es determinante en el comportamiento de la floración. En los episodios cálidos, la radiación global en promedio es mayor de 20 MJ/m²/día (mayor del 55 por ciento de brillo solar), mientras que en episodios fríos es menor de 18 MJ/m²/día (menor de 50 por ciento de brillo solar).

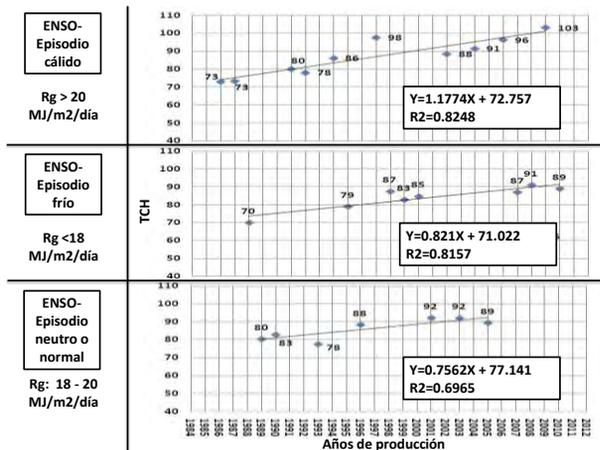


Figura 11. Análisis de los años de producción de la zona cañera de Guatemala en diferentes escenarios ENSO

Otra forma de analizar los efectos meteorológicos ocasionados por el ENSO es a través de la metodología de Mc Quigg (1975), con la cual se puede analizar la variabilidad de los efectos meteorológicos. Para tal fin, en la Figura 12, se observan valores positivos altos, donde sobresalen los efectos ENSO Episodio cálido, como los años 1997, 2006 y 2009, episodios clasificados como fuertes; por otro lado, los valores negativos en el que sobresalen los efectos ENSO Episodio frío clasificados como fuertes, como los años 1988, 2007 y 2010. Los efectos positivos son los más relevantes porque han contribuido al incremento de las TCH, como sucedió en el año 1997.

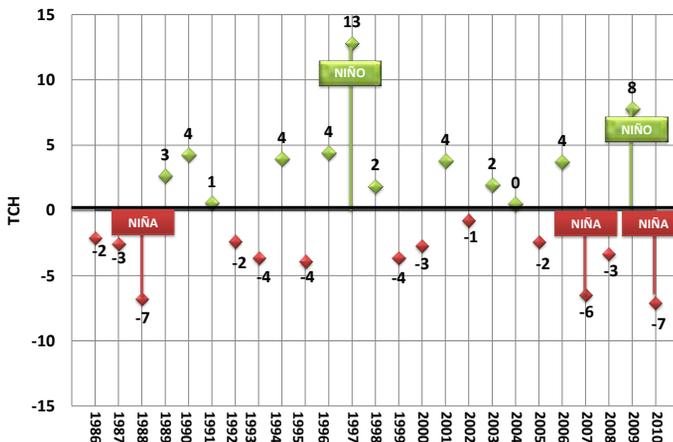


Figura 12. Efectos meteorológicos ocasionados por el ENSO a través de la metodología de Mc Quigg (1975)

Relación: ENSO – brillo solar – TCH: En la Figura 13 se visualiza un análisis gráfico de la relación: porcentajes de brillo solar de agosto, años ENSO en sus episodios frío (Niña), cálido (Niño), neutro (normal) e históricos de las TCH de la agroindustria azucarera. Ahí se observa que las caídas de las TCH están relacionadas con los bajos porcentajes de brillo solar (duración de la radiación solar directa) que se registran en agosto, estos bajos porcentajes a la vez se producen en años de ENSO-Episodios fríos, por el contrario se observa que el alza de las TCH se producen cuando el brillo solar de agosto es alto, condición que ocurre en ENSO-Episodio cálido (Niño).

Efectos del ENSO en la acumulación de azúcar

En los años cuando se presentan los fenómenos ENSO-Episodio cálido y ENSO-Episodio frío, las amplitudes térmicas tienen un comportamiento diferente a la condición normal, tal es el caso de lo ocurrido en el período de zafra 1999/2000, las amplitudes térmicas, fueron de 19.3 y 18.8°C para enero y febrero, respectivamente, mientras que en la zafra 2007/2008 para los mismos meses fueron 15.88 y 13.62°C (Estación Belén a 150 msnm, La Unión-Los Tarros). Los rendimientos de azúcar a nivel de la industria fueron de 230 y 217.5 libras de azúcar/TC para los periodos 1999/2000 y 2007/2008, respectivamente (CENGICAÑA, 2009).

Es importante considerar que cuando se presentan días despejados en el período de zafra, las amplitudes térmicas alcanzan valores de 18°C, mientras que en períodos de lluvia o días nublados, las amplitudes térmicas se reducen hasta 5°C. Debido a este comportamiento, la amplitud térmica se relaciona con el brillo solar, a mayor amplitud térmica mayor brillo solar o radiación global, en el cual se logra una mayor acumulación de sacarosa.

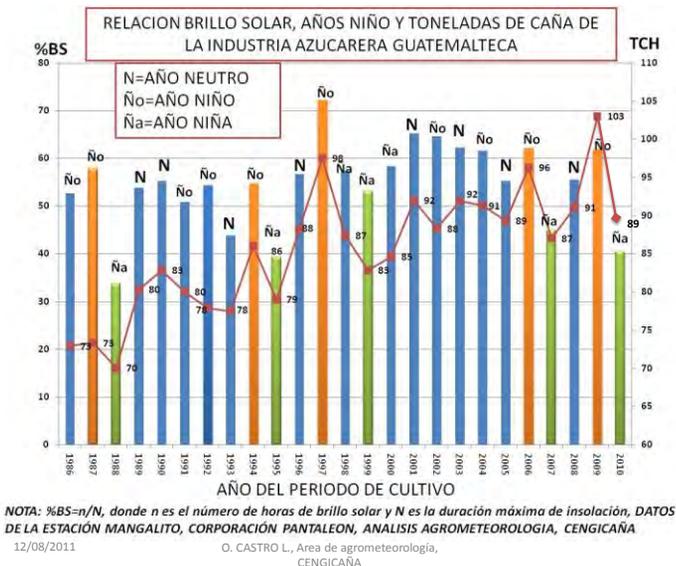
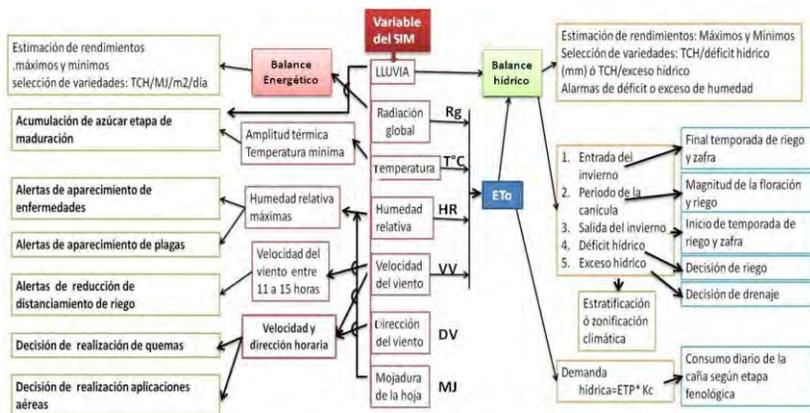


Figura 13. Análisis gráfico histórico de la relación horas luz de agosto (en barras) con el rendimiento en TCH (en líneas) para zona cañera de Guatemala
Fuente: CENGICAÑA, 2010

USO POTENCIAL E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LAS DECISIONES TÉCNICAS

Medir variables meteorológicas representa una herramienta muy valiosa para generar un proceso analítico importante en la toma de decisiones técnicas en caña de azúcar. En la Figura 14 se esquematiza la utilidad que puede representar cada valor de una variable meteorológica que se genera en una estación meteorológica. Se destacan los balances: Energético e hídrico, determinantes en la acumulación de biomasa y sacarosa de la caña de azúcar.



Nota: SIM= sistema de información meteorológica, ETo=Demanda climática obtenida a través del método Penman-Monteith.

Fuente: O. Castro, CENGICAÑA

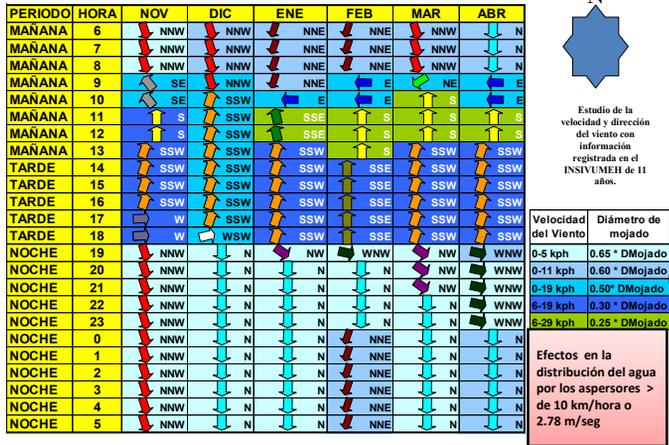
Figura 14. Uso potencial de la información meteorológica para la toma de decisiones tecnológicas en caña de azúcar

Interpretación de variables meteorológicas para decisiones técnicas importantes

En riego: Una de las variables meteorológicas que más afectan la eficiencia de distribución del agua de los aspersores es la **velocidad del viento**. Se ha establecido que velocidades del viento mayores de 10 km/hora empiezan a reducir significativamente la eficiencia de distribución de 75 por ciento (eficiencia normal en aspersores tipo cañón), principalmente, en el período cercano del mediodía. En la Figura 15 se aprecia el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en el período de zafra en la zona cañera de Guatemala.

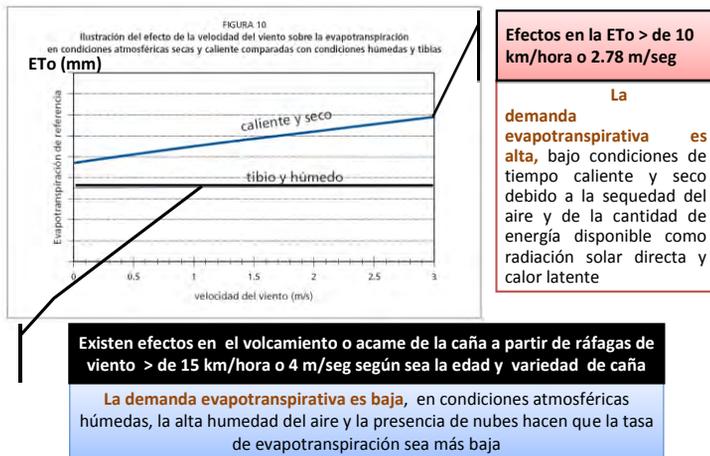
También **el viento** puede causar efectos de dos maneras, una cuando el viento es caliente y seco, y la otra en una condición de viento tibio y húmedo, de éstos, el viento caliente y seco causa el mayor efecto, principalmente, en la ETo (Figura 16).

Viento más frecuente en la época de zafra y la separación máxima de aspersores



NOTA: Resultados de investigación tesis Víctor Vásquez, asesoría Ing. O. Castro (CENGICAÑA) y M. Bautista (INSIVUMEH)

Figura 15. Matriz de comportamiento de la dirección y velocidad del viento en el



Fuente: Figura FAO, serie 56. Análisis O.R. Castro, CENGICAÑA

Figura 16. Efectos del viento en la ETo y volcamiento de la caña de azúcar. Zona cañera de Guatemala

En el período de zafra (de noviembre a mayo), el comportamiento de **la amplitud térmica** (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) es muy variable. Cuando se presentan días despejados las temperaturas mínimas son menores a 19°C y las temperaturas máximas alcanzan valores de 35°C. En días despejados la

amplitud térmica supera los 15°C, con lo que se favorece la acumulación de azúcar e intensidad de la fotosíntesis al incrementarse la ETo (demanda climática). En días nublados, se reduce la temperatura máxima y sube la temperatura mínima, la amplitud térmica puede llegar a valores cercanos a 5°C, condición que afecta la acumulación de azúcar y disminuye la ETo (Figura 17).

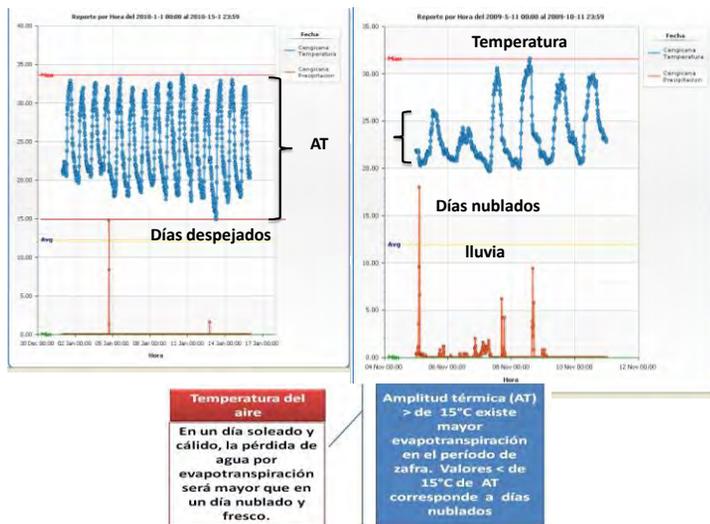
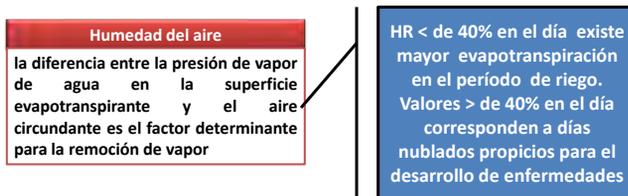


Figura 17. La amplitud térmica en días despejados y nublados, su efecto en la ETo

La variable **humedad del aire** es muy importante en el comportamiento de la ETo y desarrollo de enfermedades. En la Figura 18 se presenta una explicación sobre el efecto d cos.



Áreas bien regadas en regiones áridas secas y cálidas, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración. En este último caso, como el aire está ya cerca de saturación, puede absorber menos agua adicional y por lo tanto la tasa de evapotranspiración es más baja que en regiones áridas.

Figura 18. Efectos de la humedad del aire en la ETo

Vientos: El sistema de información meteorológica en tiempo real (SIM-TR) puede servir para detectar anomalías en la dirección y velocidad del viento. Los días normales en que se realiza la zafra (del 15 noviembre al 15 mayo) los vientos durante el día provienen del sur y durante la noche del norte (Figura 19), lo que permite la planificación de labores.

Procedencia del viento normal por hora

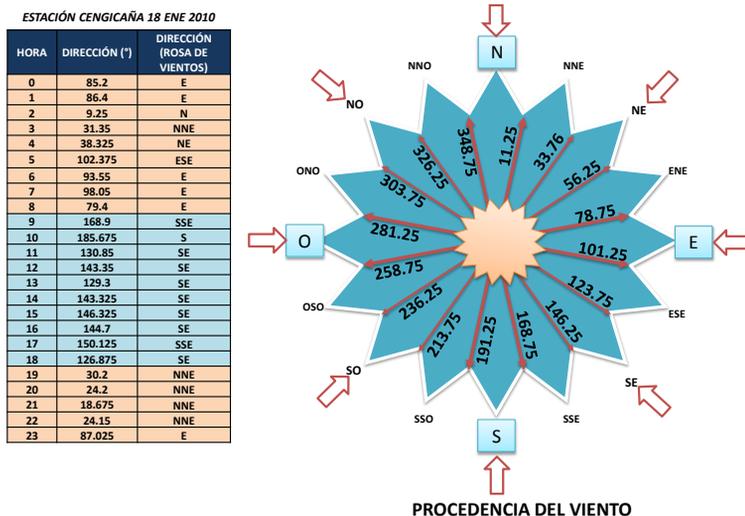


Figura 19. Comportamiento del viento por hora para un día normal en la zona cañera guatemalteca

El problema se presenta cuando en nuestra latitud inciden fenómenos meteorológicos, como los frentes fríos que provienen del norte, los cuales cambian drásticamente el comportamiento de dirección y velocidad del viento, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 20. En estas circunstancias, el despliegue gráfico del Sistema de Información Meteorológica en tiempo real (SIM-TR) puede servir para monitorear el comportamiento de la dirección y velocidad del viento.

HORA	GRADOS	DIRECCION	VELOCIDAD (km/h)
0	64.175	ENE	7.6
1	91.15	E	12.7
2	70.35	ENE	15.625
3	57.025	ENE	17.075
4	73.975	ENE	16.55
5	44.4	NE	31.075
6	89.75	E	27.375
7	73.65	ENE	27.475
8	60.125	ENE	16.65
9	71.75	ENE	29.6
10	63.975	ENE	63.775
11	68.675	ENE	44.35
12	64.65	ENE	61.025
13	73.575	ENE	62.225
14	68.7	ENE	49.225
15	66.65	ENE	36.85
16	67.875	ENE	38.9
17	69.325	ENE	30.775
18	78.175	E	40.675
19	74.55	ENE	45.425
20	95	E	65.825
21	103.175	ESE	68.4
22	90.65	E	65.625
23	100.475	E	63.4

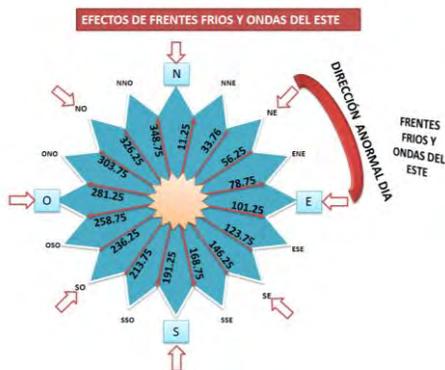


Figura 20. Comportamiento de la dirección y velocidad del viento cuando existe un frente frío en el periodo de zafra

En la Figura 21 se observa un ejemplo de la forma en que el despliegue gráfico del SIM-TR puede servir, por ejemplo, la última lectura que se visualiza está en la dirección normal de viento (de 90 a 270°). En caso de que la dirección del viento en el día esté fuera del rango normal se debe considerar y analizar, ya sea por el cambio en la dirección o por el aumento de la velocidad del viento.

En estas situaciones se recomienda:

- Consultar los avisos de entidades nacionales o internacionales sobre la presencia de fenómenos meteorológicos, los cuales serán útiles para tomar las medidas necesarias.

Es importante considerar que las incidencias mayores de frentes fríos se producen cuando incide “La Niña”, principalmente, de noviembre a enero, por lo que es importante monitorear la presencia de estos fenómenos.

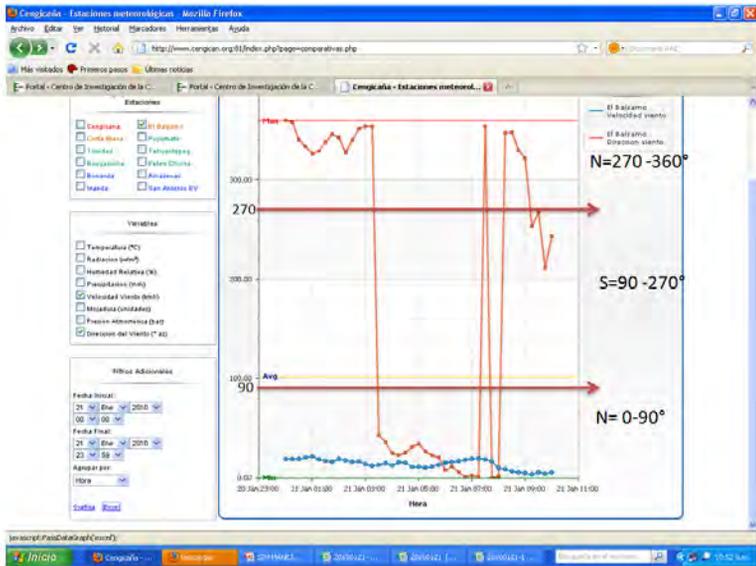


Figura 21. Ejemplo de despliegue gráfico del SIM-TR del día 21 de enero del 2010 donde se muestra la velocidad y dirección del viento cada 15 min.

Índices y seguimiento de expectativas de desarrollo del ENSO

Índices ENSO: Como se ha observado en capítulos anteriores, el ENSO tanto en sus episodios cálidos ó fríos es, sin duda, el fenómeno que más influye en los balances: Energético e hídrico. Su comportamiento en el tiempo debe ser monitoreado, para ello, es importante seleccionar índices meteorológicos y oceanográficos que permitan interpretar, cuantificar su desarrollo y prever expectativas a mediano plazo, con el fin de establecer planes de contingencia para minimizar sus efectos.

Una de las variables que permiten establecer el grado de desarrollo y comportamiento de este fenómeno es la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) del océano Pacífico ecuatorial (EQ). En la línea del Ecuador, los científicos de la NOAA y otras agencias utilizan una variedad de herramientas y técnicas para controlar y pronosticar los cambios en el océano Pacífico, así mismo, el impacto de esos cambios en los patrones del clima global. En la zona ecuatorial, el ENSO es detectado por diversos métodos, incluidos los satélites, boyas fijas, boyas a la deriva, análisis del nivel del mar, y otras boyas especiales. Mucho de estos sistemas de observación de los océanos eran parte de los Atmósfera Global de los

Océanos Tropicales (TOGA), y ahora se están convirtiendo en operaciones de El Niño / Oscilación Sur (ENSO) del sistema de observación. En la NOAA también opera un barco de investigación, el KA'IMIMOANA, que se dedica al servicio de la Atmósfera del Océano Tropical (TAO), componente de red boya del sistema de observación. La información oceanográfica derivada de estas herramientas y técnicas se utiliza en las grandes agencias informáticas del océano y atmósfera en el mundo, como los Centros Nacionales de NOAA para la Predicción de este fenómeno. También son utilizados por Geofísicos de la NOAA, en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos y otras instituciones no gubernamentales de investigación.

Desarrollo de expectativas para estimados de cosecha: El comportamiento del ENSO proporciona elementos técnicos claros sobre los efectos en la producción de caña; para un año con presencia de un ENSO-Episodio cálido, en el período de mayo a diciembre, deberá crearse expectativas positivas sobre la producción, especialmente cuando en agosto existe una cantidad de energía mayor a 20 MJ/m²/día. Caso contrario con un ENSO-Episodio frío, en el período de mayo a diciembre, deberá considerarse expectativas negativas sobre la producción. En ambos casos, la aplicación adecuada de tecnología permitirá minimizar los efectos, como ejemplo, el uso del balance hídrico en la tecnología del riego (años Niño) y el uso de la tecnología de drenaje en los períodos de excesos de agua (años Niña). Mientras que con un ENSO-Episodio neutro no se esperan condiciones extremas en cuanto a comportamiento de brillo solar y, por consiguiente, en la producción.

Con esta base, se puede considerar que el seguimiento de pronósticos a partir de mayo sobre el desarrollo del ENSO permitirá mejorar las expectativas para estimar producciones, actividad que normalmente, se inicia en mayo. Por ejemplo, La International Research Institute for Climate and Society (IRI) en sus boletines periódicos, analiza modelos dinámicos (alrededor de 14) y estadísticos de SST en la **región Niño 3.4** (alrededor de 8). Los pronósticos hechos para algunas épocas del año son mejores cuando se hacen entre junio y diciembre que cuando se realizan entre febrero y mayo. Por lo que es necesario que cada una de las expectativas emitidas por IRI debe de evaluarse mes a mes para un mejor resultado.

En la Figura 22 se muestra un análisis sobre el comportamiento del ENSO y efectos meteorológicos y fisiológicos en caña de azúcar en los últimos 7 años. También se observan los índices reales conocidos como ONI emitidos por CPC de NCEP (NOAA) y el desarrollo de expectativas a partir de resultados promedios de modelos dinámicos y estadísticos analizados por IRI (<http://iri.columbia.edu/>).

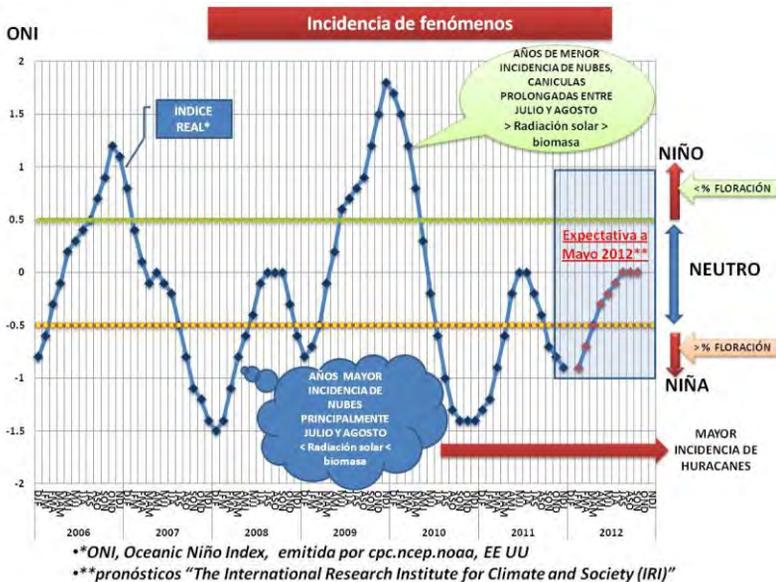


Figura 22. Desarrollo de expectativas climáticas a partir del análisis de IRI sobre el comportamiento del ENSO

ANEXOS

Conceptos importantes

Agrometeorología o meteorología agrícola: Es una ciencia aplicada que estudia la influencia del tiempo atmosférico y el clima sobre la productividad agrícola, la ganadería y la silvicultura. Esta ciencia trata de las acciones mutuas que se ejercen entre los factores meteorológicos e hidrológicos, por una parte, y la agricultura en su sentido más amplio, por la otra; establece las exigencias de los cultivos y de los animales de crianza hacia las condiciones climáticas mediante la aplicación de métodos estadísticos especiales. A partir de esas exigencias, expresadas en forma de modelos matemáticos, elabora métodos agrometeorológicos de pronósticos de fases fundamentales de desarrollo de los cultivos y de sus rendimientos y, además, lleva a cabo la zonificación agroclimática de un territorio, teniendo en cuenta la distribución espacio – temporal de los factores del clima que limitan la producción agropecuaria. El alcance de la meteorología agrícola se extiende desde la capa del suelo, donde se hallan las más profundas raíces de las plantas y árboles, pasando por la capa de aire próxima al suelo en la que los cultivos, árboles y animales viven, hasta alcanzar los más elevados

niveles de la atmósfera que interesan a la aerobiología, esta última capa es de gran interés para el transporte de semillas, esporas, polen e insectos. Además del clima natural y sus variaciones locales, la meteorología agrícola trata de las modificaciones del medio ambiente, como las producidas por las barreras rompevientos y la irrigación, de las condiciones climáticas durante el almacenamiento, tanto en el interior como sobre el terreno, de las condiciones ambientales en los alojamientos del ganado y en los edificios agrícolas y por último en el interior de los vehículos durante el transporte de los productos agrícolas. (www.ecured.cu/)

Brillo solar: Se refiere a la duración de la radiación solar directa en un día (n), es medida con el heliógrafo, cuando se expresa como duración de la radiación solar directa relativa es igual $(\%BS) = n/N$, donde N es igual a la duración máxima posible de la radiación solar.

Entrada del invierno: Se define como el período en el cual la cantidad de lluvia efectiva de inicios de abril a principios de junio es suficiente para satisfacer las necesidades hídricas de la caña de azúcar. Su efecto es variable según el estrato altitudinal, edad de la caña de azúcar y el tipo de suelo en el cual se sitúe la finca.

Canícula: Período entre julio y agosto en el cual la lluvia efectiva disminuye y provoca déficit hídrico a la caña de azúcar. La canícula es un fenómeno climático característico que ocurre en nuestra latitud año con año. Su efecto es variable según el estrato altitudinal, edad de la caña de azúcar y el tipo de suelo en el cual se sitúe la finca.

Salida del invierno: Período entre octubre y noviembre en el cual las cantidades de lluvia efectiva ya no son suficientes para cubrir las necesidades hídricas de la caña de azúcar y provocan déficit. Este período es variable según el estrato altitudinal, edad de la caña de azúcar y el tipo de suelo en el cual se sitúe la finca. Para determinar los períodos de entrada y salida del invierno, así como el período de canícula, se utiliza el análisis gráfico, se grafican las variables: Lluvia (barras) y Evapotranspiración potencial (ETo) estimada con Penman-Monteith (línea), se acumulan los valores de lluvia en pentadas (lluvia de cinco días) se considera que los valores de lluvia tienen que ser mayor a la ETo, en caso contrario causarán déficit hídrico. La interpretación según textura es el siguiente: Para un suelo arenoso, un período de dos pentadas con lluvias menores a la ETP significa déficit. Para un suelo franco, un período entre tres y cuatro pentadas y para un suelo franco limoso con aporte capilar, un período entre cuatro y cinco pentadas.

Dirección normal del viento en la latitud 14°

Durante el día: a medida que el sol asciende va calentando la tierra más rápidamente que el agua del mar. La tierra va calentando el aire en contacto con ella que asciende al aligerarse; su lugar la ocupa el aire del mar que está más frío. Es decir, se origina un gradiente térmico que, a su vez, origina un gradiente de presión que causa el desplazamiento del aire de la zona de mayor presión -la superficie del mar- al de menor presión -la superficie de la tierra-, generándose así un viento del mar hacia la tierra que se denomina brisa marina o virazón.

Durante la noche: Cuando la radiación solar desaparece, la superficie del mar conserva más tiempo el calor captado durante el día que la tierra, la cual se enfría con más rapidez. Se produce un gradiente térmico y de presión inverso al caso diurno: el aire más caliente del mar se eleva y su lugar pasa a ser ocupado por el aire más frío proveniente de la tierra. Se origina así la brisa terrestre o terral.

El frente frío. Es una franja de mal tiempo que ocurre cuando una masa de aire frío se acerca a una masa de aire caliente. El aire frío, por ser más denso, genera una "cuña" y se mete por debajo del aire cálido y menos denso. Los frentes fríos se mueven rápidamente, son fuertes y pueden causar perturbaciones atmosféricas tales como tormentas de truenos, chubascos, tornados, vientos fuertes. Su actividad en nuestra latitud se incrementa principalmente en los años ENSO-Episodios fríos.

¿Qué es El Niño?

El término El Niño se refiere al fenómeno climático de gran escala océano-atmósfera vinculada a un calentamiento periódico de las temperaturas superficiales del mar en la zona central y centro-este del Pacífico ecuatorial (aproximadamente entre la línea de fecha y 120° W). El Niño representa la fase cálida del [fenómeno El Niño / Oscilación del Sur](#) (ENSO) del ciclo, y se refiere a veces como un episodio caliente del Pacífico. El Niño se refería originalmente a un calentamiento anual de temperatura superficial del mar a lo largo de la costa oeste de América del Sur. El Centro NOAA de Predicción del Clima, que forma parte del Servicio Meteorológico Nacional, declara el inicio de un episodio de El Niño, cuando los tres meses de media la superficie del mar la salida la temperatura supera los 0,5 ° C en el Pacífico ecuatorial centro-este de [entre el 5 ° N-5 ° S y 170 ° W-120 ° W].

¿Qué es La Niña?

La Niña se refiere al enfriamiento periódico de las temperaturas superficiales del océano en la zona central y centro-este del Pacífico ecuatorial, que ocurre

cada tres a cinco años o menos. La Niña representa la fase fría del [fenómeno El Niño / Oscilación del Sur](#) (ENSO) del ciclo, y se refiere a veces como un episodio del Pacífico frío. La Niña se refería originalmente a un enfriamiento anual de las aguas oceánicas en la costa oeste de Perú y Ecuador.

ENSO-neutral

Se refiere a los períodos en los que ni El Niño ni La Niña están presentes. Estos períodos coinciden a menudo con la transición entre El Niño y La Niña. ENSO-neutral durante períodos de la temperatura de los océanos, los patrones de lluvia tropical, y los vientos atmosféricos sobre el océano Pacífico ecuatorial están cerca del promedio a largo plazo.

Con

Con

$$R_g = (0.26 + 0.48 (n/N)) * R_a$$

$$R^2 = 0.77$$

$$n = (-0.32 + 1.61 (R_g/R_a)) * N$$

$$R^2 = 0.77$$

Donde:

n = Brillo solar (horas y décimas)

R_g = Radiación global (MJ/m²/día)

n = Brillo solar en horas y décimas

R_a = Radiación solar al límite de la atmósfera en

R_g = Radiación global en (MJ/m²/día)

N = Duración máxima posible de la radiación

solar, latitud 14° (Tabla anexo b) (horas y

décimas) MJ/m²/día.

R_a = Radiación solar al límite de la atmósfera en la latitud 14° (ver Cuadro 3) en

N = Duración máxima posible de la radiación solar, latitud 14° (ver Cuadro 3) en

FUENTE: CENGICAÑA, 2009

Fuente: CENGICAÑA, 2009.

Cuadro 3. Información diaria sobre la duración máxima posible de la radiación solar, N (horas y décimas) y la radiación solar al límite de

DIA	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN		JUL		AGO		SEP		OCT		NOV		DIC	
	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra	N	Ra
1	11.176	28.990	11.390	31.372	11.721	34.588	12.140	37.390	12.519	38.396	12.787	38.273	12.828	38.105	12.621	38.122	12.255	37.426	11.850	35.222	11.462	31.851	11.210	29.273
2	11.180	29.030	11.400	31.480	11.734	34.700	12.153	37.452	12.530	38.405	12.793	38.264	12.825	38.105	12.611	38.118	12.242	37.379	11.837	35.124	11.452	31.743	11.205	29.219
3	11.183	29.072	11.413	31.589	11.747	34.811	12.166	37.511	12.541	38.411	12.798	38.254	12.822	38.105	12.601	38.112	12.229	37.329	11.824	35.024	11.441	31.636	11.200	29.169
4	11.187	29.117	11.421	31.699	11.760	34.921	12.180	37.568	12.552	38.417	12.802	38.245	12.819	38.106	12.590	38.106	12.216	37.279	11.810	34.922	11.430	31.529	11.195	29.121
5	11.191	29.165	11.432	31.810	11.773	35.030	12.193	37.623	12.563	38.421	12.807	38.236	12.815	38.106	12.580	38.099	12.202	37.226	11.797	34.820	11.419	31.424	11.191	29.076
6	11.195	29.216	11.442	31.922	11.787	35.138	12.207	37.676	12.574	38.425	12.811	38.227	12.811	38.107	12.569	38.091	12.189	37.171	11.784	34.717	11.409	31.320	11.187	29.034
7	11.200	29.269	11.453	32.035	11.800	35.244	12.220	37.727	12.584	38.427	12.815	38.218	12.807	38.109	12.559	38.081	12.176	37.115	11.770	34.612	11.399	31.217	11.183	28.995
8	11.205	29.325	11.464	32.149	11.813	35.350	12.233	37.776	12.595	38.428	12.819	38.209	12.802	38.110	12.548	38.071	12.162	37.056	11.757	34.507	11.389	31.115	11.179	28.958
9	11.210	29.384	11.476	32.264	11.827	35.454	12.246	37.823	12.605	38.428	12.822	38.201	12.797	38.112	12.537	38.060	12.149	36.996	11.744	34.400	11.379	31.015	11.176	28.925
10	11.216	29.446	11.487	32.379	11.840	35.557	12.260	37.868	12.615	38.428	12.825	38.193	12.792	38.113	12.526	38.048	12.135	36.934	11.731	34.293	11.369	30.915	11.173	28.894
11	11.221	29.510	11.498	32.495	11.854	35.658	12.273	37.911	12.625	38.426	12.828	38.185	12.787	38.115	12.514	38.035	12.122	36.870	11.718	34.185	11.359	30.831	11.170	28.867
12	11.227	29.577	11.510	32.611	11.867	35.758	12.286	37.953	12.634	38.424	12.831	38.178	12.782	38.117	12.503	38.020	12.108	36.804	11.705	34.076	11.350	30.734	11.168	28.842
13	11.233	29.646	11.522	32.728	11.881	35.857	12.299	37.992	12.644	38.421	12.833	38.171	12.776	38.119	12.492	38.004	12.095	36.736	11.692	33.967	11.341	30.609	11.165	28.820
14	11.240	29.718	11.533	32.845	11.894	35.953	12.312	38.029	12.653	38.417	12.835	38.164	12.770	38.122	12.480	37.987	12.081	36.667	11.679	33.857	11.332	30.546	11.164	28.802
15	11.246	29.793	11.545	32.962	11.908	36.049	12.325	38.064	12.663	38.412	12.837	38.157	12.764	38.124	12.468	37.969	12.068	36.596	11.666	33.746	11.323	30.454	11.162	28.786
16	11.253	29.869	11.557	33.080	11.922	36.142	12.337	38.098	12.672	38.407	12.839	38.151	12.757	38.126	12.456	37.950	12.054	36.522	11.653	33.635	11.314	30.364	11.161	28.774
17	11.260	29.948	11.569	33.197	11.935	36.234	12.350	38.129	12.680	38.401	12.840	38.145	12.750	38.128	12.445	37.929	12.040	36.447	11.641	33.523	11.306	30.276	11.159	28.764
18	11.267	30.030	11.581	33.315	11.949	36.325	12.363	38.159	12.689	38.395	12.841	38.140	12.744	38.130	12.433	37.906	12.027	36.371	11.628	33.412	11.298	30.191	11.159	28.758
19	11.275	30.113	11.594	33.432	11.962	36.413	12.375	38.187	12.697	38.388	12.842	38.135	12.736	38.131	12.420	37.882	12.013	36.292	11.616	33.299	11.289	30.106	11.158	28.754
20	11.282	30.199	11.606	33.550	11.976	36.500	12.388	38.214	12.706	38.381	12.843	38.130	12.729	38.133	12.408	37.857	12.000	36.212	11.603	33.187	11.282	30.024	11.158	28.754
21	11.290	30.287	11.618	33.667	11.990	36.585	12.400	38.238	12.714	38.373	12.842	38.126	12.721	38.134	12.396	37.830	11.986	36.130	11.591	33.075	11.274	29.944	11.158	28.757
22	11.299	30.376	11.631	33.784	12.003	36.668	12.413	38.261	12.721	38.365	12.842	38.122	12.714	38.136	12.383	37.802	11.972	36.046	11.579	32.962	11.266	29.866	11.158	28.763
23	11.307	30.468	11.644	33.900	12.017	36.749	12.425	38.282	12.729	38.357	12.842	38.119	12.706	38.136	12.371	37.772	11.959	35.961	11.567	32.850	11.259	29.791	11.159	28.772
24	11.315	30.562	11.656	34.016	12.031	36.828	12.437	38.302	12.736	38.348	12.841	38.116	12.697	38.137	12.358	37.740	11.945	35.874	11.555	32.737	11.252	29.717	11.159	28.784
25	11.324	30.657	11.669	34.132	12.044	36.905	12.449	38.320	12.744	38.339	12.840	38.113	12.689	38.137	12.346	37.707	11.932	35.785	11.543	32.625	11.245	29.647	11.161	28.794
26	11.333	30.755	11.682	34.247	12.058	36.980	12.461	38.336	12.751	38.330	12.839	38.111	12.680	38.137	12.333	37.672	11.918	35.695	11.531	32.513	11.239	29.578	11.162	28.818
27	11.342	30.854	11.695	34.361	12.072	37.054	12.473	38.351	12.757	38.321	12.837	38.109	12.671	38.136	12.320	37.635	11.904	35.603	11.519	32.401	11.233	29.512	11.164	28.839
28	11.351	30.955	11.708	34.475	12.085	37.125	12.485	38.364	12.764	38.311	12.835	38.108	12.662	38.135	12.307	37.597	11.891	35.510	11.508	32.290	11.226	29.448	11.166	28.863
29	11.361	31.057	11.714	34.531	12.099	37.194	12.496	38.377	12.770	38.302	12.833	38.106	12.653	38.133	12.294	37.557	11.877	35.416	11.496	32.179	11.221	29.387	11.168	28.891
30	11.370	31.161			12.112	37.262	12.508	38.387	12.776	38.292	12.831	38.106	12.644	38.131	12.281	37.515	11.864	35.320	11.485	32.069	11.215	29.329	11.170	28.921
31	11.380	31.266			12.126	37.327			12.782	38.283			12.634	38.128	12.268	37.471			11.474	31.960			11.173	28.954
Total general	349.12	928.81	334.90	956.03	369.58	1118.35	369.85	1140.36	392.58	1189.87	384.83	1145.01	395.18	1181.80	386.01	1174.74	361.81	1094.76	361.35	1042.19	339.77	914.14	346.31	895.74

BIBLIOGRAFÍA

1. Castro, O. 2010. La variabilidad de la radiación solar en la superficie terrestre y sus efectos en la producción de caña de azúcar en Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 281-287.
2. Castro, O.; Suárez, A.; Ramírez, C. 2010. Estudio de las relaciones entre duración de radiación solar y radiación global para la latitud 14°N de la zona cañera guatemalteca. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 288-293.
3. Climate Prediction Center of The National Centers for Environmental Prediction. Cold & Warm Episodes by Season, ONI, Oceanic Niño Index. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
4. FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio serie Riego y drenaje No. 56. 298 p.
5. ICC, 2011. Base de datos de variables meteorológicas de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona cañera de Guatemala, años 2007-mayo 2011. ICC. Archivo electrónico.
6. International Research Institute for Climate and Society (IRI). Probabilidades de comportamiento ONI (Oceanic Niño Index). <http://iri.columbia.edu/>
7. LA UNIÓN-LOS TARROS, 2009. Base de datos de temperatura y lluvia, estación meteorológica “Belén” ubicada en la finca Belén.
8. Meneses, A.; Melgar, M. 2009. Series históricas de producción, exportación y consumo de azúcar en Guatemala. Boletín estadístico, año 10, No. 1. Guatemala, CENGICAÑA. 8p.
9. Ortiz, Carlos. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. 3ª edición. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo, México. Páginas consultadas 18-53 y 306-321.
10. PANTALEÓN, LA UNIÓN-LOS TARROS, MAGDALENA. 2009. Base de datos de brillo solar años 2007, 2008 y 2009.
11. PANTALEÓN. 2011. Base de datos de variables meteorológicas de 1986 a la fecha. Departamento de Investigación. Archivo electrónico.

XVI. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Alex Guerra y Alejandra Hernández*

INTRODUCCIÓN

El cambio climático figura entre los retos de mayor envergadura para la humanidad en la actualidad. Existe evidencia científica sobre los cambios que se están manifestando y también sobre la relación entre éstos y las actividades humanas que los han ocasionado (IPCC, 2007). Las discusiones y debates internacionales se centran en cómo detener (o al menos desacelerar) el cambio climático futuro y, cada vez con mayor importancia, cómo lograr que la población se adapte a los cambios que se presenten. Es importante reconocer que el cambio climático no representa solamente un problema adicional para la humanidad, sino que éste confiere mayor grado de dificultad a los retos que ya existen. El presente capítulo tiene el objetivo de exponer brevemente el tema del cambio climático y su relación con el cultivo de la caña de azúcar. Aunque la investigación y capacitación de CENGICAÑA no ha abordado el tema deliberadamente, mucho de su trabajo sí tiene relación, como se indicará más adelante. Aparte de la relevancia general del tema, se incluye el capítulo especial porque la Agroindustria Azucarera Guatemalteca fundó una institución especializada en el cambio climático: el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Éste no sólo se creó con el objetivo de apoyar a la Agroindustria Azucarera a enfrentar el cambio climático, sino constituye un aporte al país, pues su trabajo también incluirá a otros gremios, comunidades y la infraestructura nacional.

Aparte de la introducción, el capítulo contiene tres partes principales. La primera esboza la relación general entre el clima y el cultivo de la caña de azúcar. En esa misma parte se presenta el conocimiento sobre el cambio climático en Guatemala, la cual se concluye con los posibles efectos en la producción de azúcar. La segunda parte aborda el tema de la mitigación del cambio climático y el cultivo de la caña de azúcar, presentando en su inicio el contexto de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en Guatemala y luego indicando oportunidades de acción. La tercera parte trata el tema de la adaptación al cambio climático. En ésta se empieza con una introducción general a la adaptación para después enfocarse en el caso del cultivo de la caña

* Alex Guerra es Ing. Forestal, Ph.D. Director General del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático ICC; Alejandra Hernández es Ing. Forestal M.Sc., Coordinadora del Programa de Investigación sobre Ecosistemas del ICC. www.icc.org.gt

de azúcar. Para finalizar, se presenta al ICC y sus principales líneas de investigación y de acción, haciendo énfasis en la oportunidad que hay de alcanzar beneficios para la Agroindustria Azucarera, las comunidades y el país, contribuyendo así con los esfuerzos globales.

EL CAMBIO CLIMÁTICO

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define al cambio climático como “el cambio de clima atribuible directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.”(IPCC, 2007). El objetivo de dicha convención consiste en estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, a un nivel que impida las interferencias antropogénicas peligrosas con el sistema climático global y que debería lograrse en un plazo que permita la adaptación natural de los ecosistemas al cambio climático, asegurando la producción de alimentos y el desarrollo económico sostenible.

A principios del siglo XIX, ya se había dado inicio con la investigación sobre los gases que componían la atmósfera y su capacidad de retener calor. Al momento de realizar la Primera Conferencia Mundial sobre Clima en Ginebra, en 1979, el tema tomó mayor auge. En 1989, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) que tiene como función analizar en forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, toda la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender el fenómeno del cambio climático. Hasta la fecha, el IPCC ha generado cuatro informes generales (1990, 1995, 2001 y 2007), los cuales han sido determinantes para seguir avanzando en las negociaciones internacionales sobre el cambio climático. El último de ellos, presentado en 2007, permitió trazar una ruta para revisar los acuerdos internacionales sobre las acciones requeridas para realizarlas después del 2012.

Uno de los logros de las negociaciones internacionales es la existencia de compromisos vinculantes, adquiridos a través del Protocolo de Kioto, instrumento elaborado en 1997. Ahí se plasman las intenciones de reducción de las emisiones de los GEI y la creación de mecanismos de mercado para facilitar su cumplimiento. Del mismo modo, se fijan metas individuales (por país) de reducción o control de las emisiones de los GEI. Otro aspecto relevante fue la

elaboración de escenarios de emisiones que representan un futuro probable y, que a la vez, sirven de base para la elaboración de proyecciones climáticas.

Los resultados simulados mediante modelos y escenarios describen posibles efectos del cambio climático a nivel global y por sector, en caso de que no se tomen medidas de adaptación. A continuación se describen algunos efectos para el sector agrícola en general (Cuadro 1), especialmente aquellos que podrían afectar al cultivo de la caña en Guatemala.

Cuadro 1. Fenómenos y tendencias y sus efectos en la agricultura, silvicultura y ecosistemas

Fenómenos y orientación de las tendencias	Efectos en agricultura, silvicultura, ecosistemas
Menos días y noches más templados y más días y noches más cálidos y aumento de la frecuencia de períodos cálidos	Disminución del rendimiento en entornos más cálidos (estrés térmico) y aumento de plagas de insectos, así como de incendios incontrolados
Aumento de la frecuencia de lluvias intensas	Daños a los cultivos, erosión del suelo, imposibilidad de cultivar tierras por saturación hídrica de los suelos
Aumento de las áreas afectadas por la sequía	Degradación de la tierra, disminución de los rendimientos, daños e inhabilitación de cultivos, mayor riesgo de incendios incontrolados
Aumento de la actividad ciclónica tropical intensa	Daños a los cultivos
Mayor incidencia de niveles de mar extremadamente altos (excluidos los tsunamis)	Salinización del agua de riego, estuarios y sistemas de agua dulce

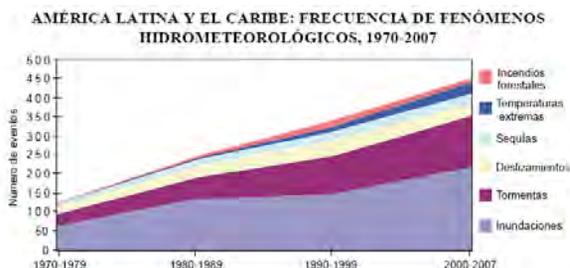
(CEPAL, 2009)

En América Latina se han observado los siguientes efectos (Cuadro 2):

Cuadro 2. Efectos de fenómenos en América Latina

Aumento de fenómenos meteorológicos extremos en los últimos 40 años en toda la región (episodios ENOS 1982-1983 y 1997-1998)
Incremento de la temperatura (América del Sur y el Caribe)
Aumento del proceso de degradación por cambio de uso del suelo (todos los países)
Incremento del porcentaje de desertificación (deforestación en Centroamérica)

(CEPAL, 2009)



Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), sobre la base de "EM-DAT: Emergency Events Database" [base de datos, en línea] <http://www.em-dat.net>.

Figura 1. Frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos en América Latina y el Caribe (1970-2007)
(Fuente: CEPAL, 2009)

La Figura 1 muestra la frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos que se han presentado en América Latina y el Caribe desde los años 1970 hasta 2007. Se puede apreciar que desde hace 37 años, todos los tipos de fenómenos que generalmente suceden en tierras latinoamericanas han aumentado. En 1970, se contabilizaban menos de 150 fenómenos, los cuales ya incluían incendios forestales, sequías, deslizamientos, tormentas e inundaciones. En 2007, estos incidentes casi se han triplicado.

RELACIÓN ENTRE EL CLIMA Y EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Condiciones climáticas para el cultivo de la caña de azúcar

El cultivo de la caña, al igual que todo cultivo, se desarrolla bajo determinadas condiciones climáticas y sólo en algunas su crecimiento resulta ser óptimo. Se conoce que la temperatura óptima para su desarrollo se encuentra en el rango de los 27°C a 33°C. Subirós (2000) menciona que a valores de 20°C, el crecimiento disminuye notoriamente y, si ésta desciende más, el crecimiento prácticamente se paraliza. Según Gawander (2007), las noches frías y madrugadas en que la temperatura no supere los 14°C en la época seca, o los 20°C en la época lluviosa, afectan en gran medida el proceso de fotosíntesis al día siguiente. Cuando la temperatura es mayor a los 35°C, aumenta la respiración y, como consecuencia, disminuye la tasa fotosintética, lo anterior conlleva a una reducción del crecimiento y de acumulación de materia seca. Mientras que los signos de marchitez se evidencian cuando la temperatura aumenta por arriba de los 36°C (Subirós, 2000). Si la temperatura es más alta, la tasa de crecimiento aumenta más que la fotosíntesis, lo cual perjudica la acumulación de sacarosa (Gawander, 2007).

En la actualidad, la red de 16 estaciones meteorológicas ubicadas en los cuatro estratos (alto, medio, bajo y litoral) del cultivo de la caña registra mediciones de la temperatura ambiente. La red permite contar con el rango de las temperaturas mínimas y máximas diarias y determinar así si éstas se encuentran en los valores óptimos para el desarrollo del cultivo. Durante enero 2010, por ejemplo, la temperatura mínima registrada fue de 14.1°C en la estación Puyumate, mientras que la máxima fue de 36.5°C en la estación Trinidad.

Tan importante como la temperatura aérea es la temperatura del suelo, la cual debe encontrarse alrededor de los 27°C para cumplir su papel en el desarrollo radical, la absorción de nutrientes y la actividad biológica. Por debajo de los 21°C, se convierte en un factor limitante para el desarrollo del cultivo y una temperatura de 24°C se considera como promedio adecuado (Subirós, 2000). En lo que respecta a esta variable, aún no se cuenta con mediciones realizadas de forma regular, por lo que podrían recomendarse con el fin de obtener una gama más amplia de datos que permitan caracterizar el desarrollo del cultivo con base en las condiciones climáticas.

También se sabe que durante la fase de maduración (4 a 6 semanas pre-cosecha), la variación de amplitud entre la temperatura diurna y nocturna tiende a favorecer considerablemente la maduración de la caña. Dicha variación se debería encontrar por encima de los 8°C (Díaz y Portocarrero, 2002). En el Cuadro 3, se puede observar el promedio de amplitud térmica durante septiembre 2010, para 13 estaciones en los diferentes estratos del cultivo de la caña. Para 11 de ellas, la amplitud térmica se mantuvo por encima de los 8°C. En el estrato litoral, dos estaciones registraron amplitudes menores a ese dato.

Cuadro 3. Amplitud térmica (septiembre 2010) en la zona cañera de la costa sur

Estrato¹	Estación	Amplitud térmica (en °C)
Alto	CENGICANA	9.6
Medio	Costa Brava	9.2
	El Bálsamo	8.4
Bajo	Bouganvilia	8.4
	Petén Oficina	9.3
	Puyumate	8.8
	Tehuantepec	8.2
	Trinidad	8.4
Litoral	Amazonas	10.8
	Bonanza	7.7
	Irlanda	9.5
	San Antonio del Valle	7.7
	San Rafael	8.7

¹ Ver las características climáticas de los estratos del cultivo de la caña de azúcar en la costa sur descritas en el Cuadro 1 del Capítulo 2.

La literatura muestra que, en promedio, se requieren de 1,200 a 1,500 mm de precipitación pluvial, distribuidos durante todo el período vegetativo (Subirós, 2000). La demanda de agua aumenta con el crecimiento de la planta, puesto que la transpiración se incrementa. De igual forma, si la temperatura es elevada, la demanda de agua es mayor (Ibid). Como se puede apreciar en el Cuadro 4, los datos de precipitación recabados en 12 estaciones indican que el requerimiento del cultivo se cumple. La estación Trinidad ubicada en el estrato bajo registró 1,610 mm mientras que estaciones del estrato medio sobrepasaron los 4,000 mm. A pesar de que en todos los estratos la precipitación es mayor a los 1,500 mm, existe una estación seca (mediados de octubre a mediados de abril) en la que llueve muy poco, por lo que hay necesidad de aplicar riego al cultivo, especialmente en los estratos bajo y litoral.

Cuadro 4. Precipitaciones (2009-2010) en la zona cañera de la costa sur

Estrato	Estación	Precipitación total (en mm)
Alto	CENGICAÑA	4569
Medio	Costa Brava	4087.3
	El Bálsamo	4633.6
Bajo	Bouganvilia	2585.6
	Petén Oficina	2768.8
	Puyumate	2304.6
	Tehuantepec	2576.2
	Trinidad	1610.4
Litoral	Amazonas	3141.5
	Bonanza	3021.8
	Irlanda	3741.2
	San Antonio del Valle	2811.3

Durante el período previo a la cosecha, se considera ideal la disminución de la humedad para reducir el crecimiento y favorecer la formación y concentración de azúcares. Los excesos de lluvia así como las sequías son perjudiciales para la caña (Subirós, 2000). Existen algunas variedades que son tolerantes a los excesos de humedad, pero la gran mayoría se ve afectada por inundaciones. Un estudio realizado con dos variedades Canal Point en Belle Glade, Florida, concluyó que las inundaciones dieron como resultado la reducción del 38 por ciento del peso de la hoja y un mayor desarrollo de raíces adventicias (entre 4 y 15 veces más) en detrimento de las raíces primarias (Gilbert *et al.*, 2007).

Otro factor que puede limitar el cultivo de la caña de azúcar es el viento, el cual puede dañar el follaje, aumentar la evapotranspiración, reducir el crecimiento, causar la ruptura de tallos e incluso de sus bases, si la velocidad del viento se

mantiene por debajo de los 40 Km/hora, no causará daños; sin embargo, si ésta excede este límite, reduce el rendimiento de la caña (Subirós, 2000). Las mediciones de viento de junio, julio y agosto 2010, por ejemplo, indicaron que en 52 días, la velocidad máxima del viento excedió los 40 km/hora, estos datos se registraron en su mayoría en los estratos bajo (52%) y litoral (27%). En caso de presencia de huracanes, el peso fresco de los tallos podría reducirse hasta en un 54 por ciento y su contenido de sacarosa disminuir alrededor de 34 por ciento en los tallos quebrados (Subirós, 2000).

Efecto de eventos extremos en la producción

Un evento extremo de lluvia puede ser definido climatológicamente como aquel que ocurre en uno de los extremos de la distribución de frecuencia climatológica, y la elección de un valor límite puede ser arbitraria y hasta subjetiva (Marengo *et al.*, 2004). De acuerdo con el glosario del IPCC (2001a), se llama evento extremo a un evento que es raro en un determinado lugar y estación (Ej. un evento extremo puede salir del percentil 10 ó 90). Los extremos varían de un lugar a otro, por lo que aquello que se define como extremo en un área específica, en otra puede ser común. Los eventos extremos no pueden atribuirse únicamente al cambio climático, ya que estos pueden ocurrir de forma natural, sin embargo, se espera que el cambio climático pueda incrementar su ocurrencia.

Unos estudios realizados en Australia han mostrado que a fuertes lluvias anómalas en determinada época del año les siguen rendimientos de caña de azúcar por debajo de lo normal en la siguiente cosecha (Kuhnel, 1993). En la isla de Viti Levu, los cambios en los regímenes de lluvias podrían conllevar a pérdidas agrícolas, valoradas en 14 millones de dólares. Lo anterior se debe a que la reducción en 8 por ciento de las lluvias afectaría a la mayoría de los cultivos de esa isla y especialmente a la caña de azúcar, que es muy sensible a las sequías. Tomando en cuenta el dato mencionado, se esperaría una caída en la producción de caña de azúcar de 9 por ciento aproximadamente para el año 2050, y a causa de fenómenos “El Niño”, se podría perder hasta el 50 por ciento de la producción cada cuatro años (Banco Mundial, 2000). Datos proporcionados por el ingenio Madre Tierra revelaron que las fuertes precipitaciones en la época lluviosa las cuales incluyen aquellas suscitadas por las tormentas Agatha, Alex y Matthew, durante la zafra 2010-2011, afectaron en gran medida la producción del cultivo de la caña. Para cinco zonas de producción, las lluvias de casi 2,000 mm que, en otras localidades rebasaron los 3,000 mm, provocaron la disminución en rendimiento del 10 por ciento al 28 por ciento comparado con la zafra 2009-2010 (ingenio Madre Tierra, 2011).

En 2005, la tormenta tropical Stan causó daños y pérdida en zonas agrícolas y ganaderas de 15 departamentos, entre los que se encuentran Retalhuleu y Escuintla. Además de las pérdidas económicas, se derivan daños de los fenómenos naturales en los activos ambientales como el suelo, la vegetación y el agua. Los primeros efectos resultan de los cambios en los servicios ambientales. Posteriormente, los efectos radican en la restauración o recuperación del capital natural para que el mismo vuelva a su estado original (o alguno que se le asemeje). Entre los que más pueden afectar el cultivo de la caña de forma directa o indirecta, se encuentran: la pérdida de suelos agrícolas por erosión hídrica, el arrastre de sedimentos, la alteración de los sistemas de drenaje natural. La pérdida de suelo por erosión debida al evento Stan correspondió a 12.7 por ciento de la erosión anual (CEPAL y Segeplan, 2005).

El clima futuro y el cultivo de la caña de azúcar

A nivel mundial, una de las incógnitas de mayor preocupación la constituye la forma en que el cambio climático se va a manifestar. Por una parte se encuentra el calentamiento global, que atañe al cambio en la temperatura media de todo el planeta, el cual se sabe que no acontece de igual forma en todas partes (IPCC, 2007). Se ha observado hasta la fecha un mayor incremento en la temperatura en las zonas polares (latitudes altas) y en la cima de las montañas (altitudes elevadas) y lo más probable es que esa tendencia continúe hacia el futuro (ibid.). Por otra parte, el cambio climático se manifiesta a través de otras variables tales como la precipitación, el viento, la radiación solar y la actividad eléctrica. La mayor preocupación radica en la precipitación por los cambios que puedan darse en las cantidades anuales, la intensidad y la temporalidad, entre otras variables.

El estudio del clima en el futuro se basa eminentemente en los modelos de simulación. La comprensión e información sobre el sistema climático global con que se cuenta han sido utilizadas para crear modelos en computadoras. Estos muestran los cambios en el sistema ante distintos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero, mismos que dependen de las fuentes de energía que se utilicen, las opciones tecnológicas que se creen, el manejo de la tierra y, en general, el modelo de desarrollo que la humanidad persiga. Es por eso que normalmente se presentan simultáneamente los resultados según distintos escenarios futuros. En cuanto a los modelos, la tendencia ha partido de los globales (Modelos de Circulación Global) a los regionales y los locales. Éstos últimos son los más difíciles de lograr y en donde mayores esfuerzos se están haciendo. Los modelos de circulación global más utilizados son 22.

A nivel de país se publicó la llamada *Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*, estudio que se inició en 1998 y que incluyó un análisis de escenarios climáticos, socioeconómicos y ambientales a futuro que luego permitieron evaluar la vulnerabilidad de varios sectores importantes del país ante el cambio climático (Castellanos y Guerra, 2009). Su elaboración fue un compromiso que el país adquirió por haber firmado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) al momento de su creación en 1992 y que se ratificó en 1995. Para el análisis climático histórico, el estudio tomó como base los registros de 1960 a 1990 de la red de estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Para describir el comportamiento futuro del clima en Guatemala, se utilizaron tres escenarios de emisiones de GEI elaborados por el IPCC (IS92a, IS92c y IS92e). Los tres escenarios fueron seleccionados porque consideran las sensibilidades climáticas media, baja y alta, respectivamente, y un rango amplio de predicciones de calentamiento global basadas en el incremento de los GEI (MARN, 2001). Para evaluar los impactos que pueden surgir por los cambios en el clima, se identificaron cinco escenarios que abarcan la gama de situaciones futuras posibles: un escenario húmedo de poco cambio; un escenario húmedo de mucho cambio; un escenario seco de poco cambio; un escenario seco de mucho cambio y un escenario sin cambios.²

Según el estudio, todos los escenarios son consistentes en indicar que la temperatura se elevará entre 0.5 y 4 grados para el año 2050. Se prevé que el aumento en temperatura se reflejará en todos los meses y no en unos más que otros. Para la precipitación, los escenarios indican que podría haber una disminución de la precipitación en el trimestre julio-septiembre, que implica una intensificación del veranillo o canícula (MARN, 2001).

Se han hecho algunos otros intentos de proyecciones futuras del clima en Guatemala, especialmente en cuanto a temperatura y precipitación. La debilidad que presentan, sin embargo, es que se basan en información cuya resolución no captura el nivel de detalle que exige la variabilidad climática del país resultante de su orografía accidentada. A pesar de lo anterior, representan puntos de partida sobre los cuales se pueden buscar mejoras. Las Figuras 2 a la 5 muestran uno de dichos ejercicios y se basan en 15 modelos climáticos de los 22 que compusieron el ensamble utilizado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático para el reporte de la Cuarta Evaluación (McSweeney *et al.*,

² Se recomienda consultar el documento de Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (MARN, 2001) para conocer el proceso de elaboración de los escenarios y los supuestos en que se basan.

2009). Los valores están expresados como anomalías a partir del clima promedio del período 1970-1999.

En cuanto a la precipitación anual, la tendencia es a una leve disminución hasta la década 2060 y sólo disminuiría alrededor del 20 por ciento a finales de siglo, especialmente en el nororiente del país (ver Figura 2). Estos resultados son similares a las proyecciones realizadas por Sáenz-Romero *et al.* (2010). La evaluación enfocada en trimestres aporta información más específica. En la Figura 3 se aprecia que en el trimestre marzo-mayo, que es clave porque es la temporada de mayor demanda de agua para riego, la disminución de la precipitación se acentúa. La Figura indica que podrían esperarse disminuciones cercanas al 40 por ciento en el nororiente y oriente de Guatemala. Los eventos extremos, ejemplificados con la Figura 4, muestran un leve aumento realmente insignificante comparado con la magnitud de los eventos máximos de precipitación en un día.

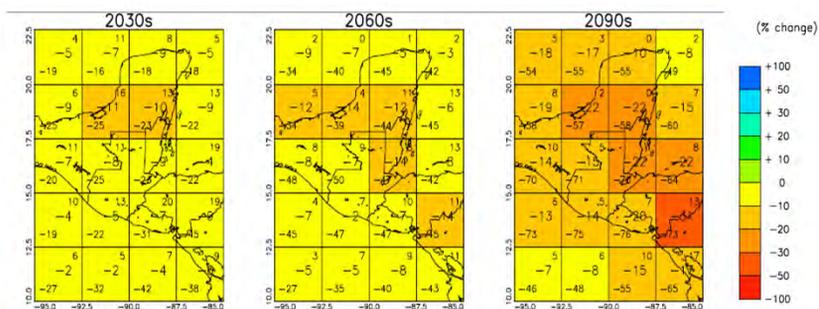


Figura 2. Cambios porcentuales de precipitación anual

(Fuente: McSweeney, 2010 en Guerra-Noriega, 2010).

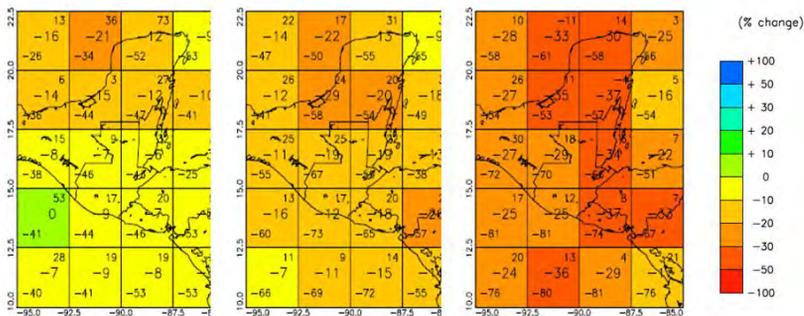


Figura 3. Cambios porcentuales de precipitación en el trimestre marzo-mayo

(Fuente: McSweeney, 2010 en Guerra-Noriega, 2010).

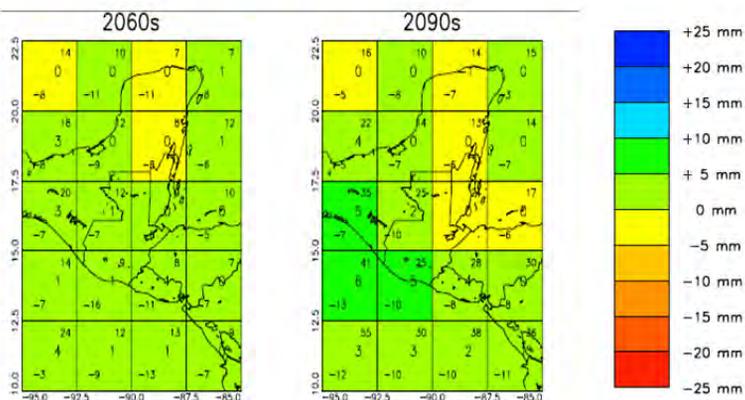


Figura 4. Aumento en la precipitación máxima anual en 24 horas

(Fuente: McSweeney, 2010 en Guerra-Noriega, 2010).

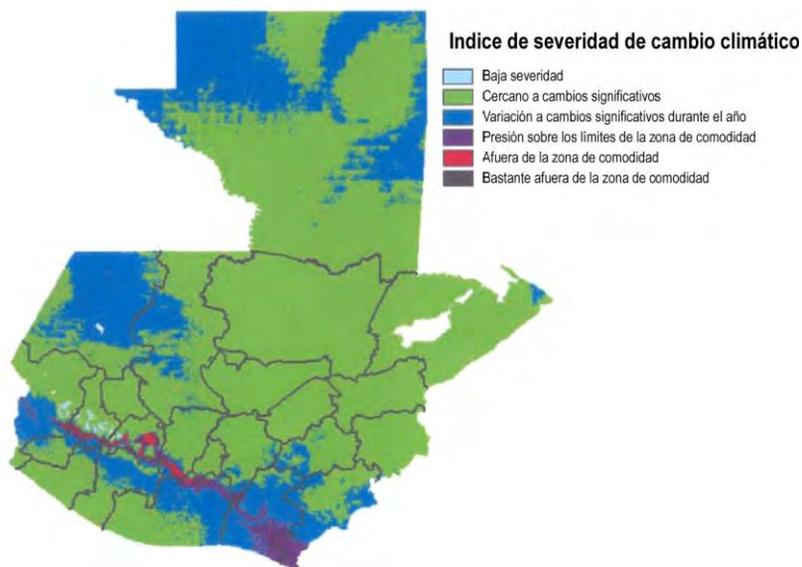


Figura 5. Índices de severidad del cambio climático hasta la década del 2020

(Fuente: Anderson *et al.*, 2008 citado en Ligorria, 2009).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) condujo una serie de estudios relacionados con la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Guatemala. En éstos se investigaron los comportamientos de la temperatura y precipitación centradas al año 2050 considerando los escenarios A2 (emisiones

media alta) y B2 (emisiones medias bajas) (MARN, 2007). Los estudios se enfocaron en las cuencas del río Naranjo en San Marcos y la subcuenca del río San José en Chiquimula y Jutiapa. Entre los hallazgos más relevantes están: 1) En la parte alta y media de la cuenca del río Naranjo, bajo ambos escenarios, la precipitación tiende a disminuir en los primeros meses de la época lluviosa y el mes de octubre se torna más lluvioso; 2) No hay tendencia definida en la parte baja de la cuenca del río Naranjo, pues sube en algunos meses y disminuye en otros; 3) La temperatura aumenta, en general, pero entre 0.3 y 0.8 grados tanto para la temperatura máxima como para la mínima. En el caso de la subcuenca del río San José, los hallazgos principales son: 1) Bajo ambos escenarios, la precipitación tiende a aumentar de mayo a julio y a disminuir en julio y septiembre en la parte media de la subcuenca; 2) En la parte alta de la subcuenca aumenta la precipitación en todos los meses en una localidad (La Ceibita), mientras en otra parte (Asunción Mita) se espera que suba de mayo a octubre bajo el escenario B2 (MARN, 2007a). Estos estudios de caso podrían indicar que es posible que el cambio en temperatura sea un poco mayor en áreas secas del país.

En la información presentada se evidencia la necesidad de realizar estudios a nivel regional y local sobre los cambios que se esperan en cuanto a temperatura y precipitación. Otra necesidad es mejorar los modelos existentes para tener una idea más clara de los cambios que se puedan presentar. Los estudios sugieren que la temperatura aumentará a lo largo del siglo, sin embargo, no se conoce la magnitud de dicho aumento. La precipitación podría aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones locales, lo más importante será conocer los cambios a lo largo del año ya que de eso podrían depender los posibles impactos.

Implicaciones de los cambios de las variables climáticas para el cultivo de la caña de azúcar

Aunque normalmente los estudios sobre el cambio climático toman en cuenta la temperatura y precipitación como variables principales, son numerosas las variables relacionadas con éstas. El cambio climático podría representarse en todas las variables, aunque probablemente sólo algunas constituyan amenazas para los ecosistemas, las poblaciones humanas y los bienes. El Cuadro 5 muestra la lista de variables climáticas y el Cuadro 6, las amenazas que podrían resultar de los cambios en las mismas, aunque hay que notar que algunas amenazas pueden resultar de un cambio o la combinación de cambios de dos o más variables. Lamentablemente no se tiene conocimiento sobre la trayectoria de la mayoría de variables puesto que no han sido medidas, por lo que predecir las condiciones futuras se hace extremadamente difícil.

Cuadro 5. Cambios potenciales en variables climáticas

Aumento o disminución en la cantidad anual de lluvia
Inicio temprano o tardío de la época lluviosa
Canícula más intensa o más larga
Lluvia extrema (más intensidad o mayor frecuencia)
Lluvias intensas en la época seca
Aumento en el promedio de temperatura anual
Aumento en la temperatura máxima diaria
Aumento en la temperatura mínima diaria
Aumento en los eventos de temperaturas extremas: mayor número de días con temperaturas máximas muy elevadas o temperaturas mínimas muy bajas
Aumento en la variación diaria o semanal de la temperatura
Descargas eléctricas (rayos) más intensas o frecuentes
Aumento en eventos de vientos fuertes o vientos con velocidades muy altas
Tormentas ciclónicas y huracanes más fuertes o más frecuentes
Cambio en el inicio y/o fin de la temporada de vientos fuertes
Granizo más grande o en lugares donde no es usual
Aumento en la evaporación y evapotranspiración
Aumento en el nivel del mar
Aumento en la intensidad del oleaje en las playas

Cuadro 6. Amenazas climáticas potenciales

Inundaciones
Desborde de ríos
Sequías
Escasez de agua para distintos usos
Deslizamientos y derrumbes
Proliferación de plagas y enfermedades que afectan cultivos
Proliferación de vectores que transmiten enfermedades a los humanos
Cambio en la distribución de vectores y de propagación de enfermedades
Heladas
Incendios forestales
Mareas de tempestades

La primera implicación de los cambios en el clima sobre la caña de azúcar es la distribución de áreas aptas para su cultivo. Las condiciones requeridas de temperatura y humedad antes mencionadas pueden encontrarse en distintos lugares del país, incluso en muchos más que las aproximadamente 230,000 hectáreas que entre 2010-2011 se emplearon para cultivar caña de azúcar (CENGICANA, 2011). Como se ha visto en otros capítulos de este libro, históricamente el cultivo se ha concentrado en la parte sur-central del país, por debajo de los 700 metros sobre el nivel del mar (msnm). Una temperatura más alta (en temperatura diaria mínima y máxima) haría posible que el cultivo se dé favorablemente en lugares de mayor altitud, incluso hasta los 800 msnm. Que

esto se haga realidad, por supuesto, depende de otras condiciones. Si los cambios en temperatura máxima fueran muy intensos (sobrepasando los 36°C), empezaría a limitar el desarrollo adecuado del cultivo en el estrato bajo y litoral, que es donde la temperatura es mayor.

El aumento en la temperatura hará que los requerimientos de riego sean mayores debido al aumento en la evapotranspiración. Si éstos se combinan con temporadas muy secas, la demanda de agua para riego crecería aún más. En el caso de Suazilandia, en África, se estimó que el requerimiento de agua del cultivo de caña de azúcar aumentará entre 11 por ciento y 14 por ciento y que combinado a la reducción en precipitación en el verano, el aumento promedio en necesidad de riego estará en el rango 20 por ciento a 22 por ciento (Knox *et al.*, 2010).

Los cambios en precipitación son mucho más inciertos. Tomando en cuenta que la precipitación actual es mucho mayor a la necesaria para el cultivo de la caña de azúcar, una disminución del 20 por ciento (que por ahora es el dato estimado de cambio para finales de siglo) no tendría un efecto significativo en la mayoría de zonas donde se ubican las plantaciones actuales. Debido al gradiente de precipitación que existe (de alrededor de 1000 mm en el litoral a más de 4000 mm en el estrato alto del cultivo- CENGICANA, 2007), las zonas que podrían carecer de agua para su desarrollo son los estratos bajo y litoral. Longitudinalmente, existe también un gradiente en el que la precipitación aumenta de suroriente a suroccidente, con lo cual el suroriente podría ser potencialmente afectado por la disminución general en la lluvia anual. Más relevante aún será cómo se presenten los cambios mes a mes. Aunque el panorama hasta ahora es todavía incierto, en algunos lugares estudiados, como se vio en los estudios del MARN (2007), la disminución en la precipitación pluvial podría ser más fuerte en el trimestre marzo-mayo, mientras en el trimestre septiembre-noviembre podría incluso haber un aumento.

Para el cultivo de la caña de azúcar en Belice, se hicieron algunas estimaciones del impacto en producción según posibles cambios en la precipitación. El cultivo de la caña de azúcar en Belice se realiza en el norte del país (Santos y García, 2008), donde el régimen de lluvias es parecido al régimen de los estratos bajo y litoral de la caña de azúcar en Guatemala. Se estimó que una reducción del 12 por ciento de la precipitación no incidiría en el rendimiento durante las tres primeras etapas de crecimiento. Sin embargo, para la cuarta etapa se estimó una reducción del 55 por ciento, lo cual causaría una disminución en la cosecha total del 11.9 por ciento (*ibid.*). Por otra parte, un aumento del 12 por ciento de la lluvia anual implicaría una baja del 4.5 por ciento en la cosecha. Con el 20 por ciento de disminución en la precipitación que se proyecta para el año 2050, la producción de caña de azúcar se reduciría en 17.4 por ciento (*ibid.*).

De la precipitación, un tema de preocupación lo constituyen los eventos extremos de lluvia. Estos pueden ocasionar daños graves a los cultivos, el transporte, el proceso y la comercialización del azúcar. Por ejemplo, la República de las Islas Fiji, un país que depende en gran medida del azúcar, ha sido afectada considerablemente por eventos climáticos. Las sequías y ciclones tropicales han ocasionado pérdidas de más del 50 por ciento de la producción en años como 1997, 1998 y 2003 (Gawander, 2007). Aunque hay incertidumbre en los escenarios, se ha mencionado que los eventos extremos de lluvia aumentarán (IPCC, 2000); (Jiménez y Girot, 2002) y para Centroamérica y el norte de Sudamérica ya se han registrado aumentos en los mismos (Aguilar *et al.*, 2005). Las proyecciones existentes, como ya se mostró, dicen muy poco sobre los eventos extremos y por ahora apuntan a incrementos mínimos.

Hay efectos combinados de las condiciones climáticas y atmosféricas futuras para la caña de azúcar. Los rendimientos pueden aumentar por las temperaturas más altas, por mayor radiación solar y también por una mayor concentración de CO₂ en la atmósfera. En el caso de Suazilandia las dos primeras son mínimas (menos del 5%) mientras el aumento, debido a la mayor concentración de CO₂ (en el escenario A2) se estimó en 15 por ciento de producción de sucrosa (Knox *et al.*, 2010). Según Downing *et al.* (1997) al duplicar la concentración de CO₂ en la atmósfera puede darse un aumento en la eficiencia en el uso de agua de hasta 50 por ciento, con mayores efectos en las plantas con vía metabólica C3. Para el caso de la caña se espera que dicho efecto sea menor por tratarse de una planta con vía metabólica C4, que son menos eficientes en el uso del agua (Knox *et al.*, 2010). El viento es otra variable que puede tener efectos adversos en el cultivo de la caña de azúcar, como se explicó con anterioridad.

EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR Y LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases atmosféricos que atrapan calor en la atmósfera baja y contribuyen al calentamiento global (IPCC, 2007). Algunos de ellos existen de forma natural, otros se producen únicamente por actividad humana y otros se producen por ambas vías: natural y antropogénica. El Protocolo de Kioto tiene como fin regular las emisiones de seis GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Bayon *et al.*, 2009).

El efecto invernadero resulta del hecho que algunos gases de la atmósfera terrestre absorben una buena parte de la radiación solar reflejada por la superficie del planeta. El efecto invernadero es algo natural que ha hecho posible que la Tierra sea habitable y tenga lo que se conoce. Sin embargo, por medio de

acciones humanas, éste se incrementa con la acumulación adicional de gases en la atmósfera y posteriormente se traduce en calentamiento global (MARN *et al.*, 2009). La mitigación del cambio climático consiste en la reducción de las emisiones de GEI o su extracción de la atmósfera para evitar el calentamiento global y el cambio climático (IPCC, 2007).

El estudio *Inventario de gases de efecto invernadero Año 2000* reporta que las emisiones totales de GEI para Guatemala fueron de 21,320.82 Gg de CO₂, de los cuales 50.4 por ciento correspondió al cambio de uso de la tierra y silvicultura (ver Figura 6).

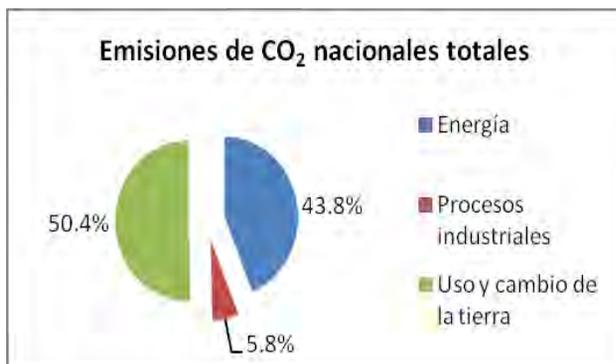


Figura 6. Emisiones de CO₂ nacionales totales
(Fuente propia con datos MARN, 2007)

Las emisiones totales de CH₄ fueron de 230.29 Gg, de las cuales el 56.7 por ciento corresponde al sector agrícola y particularmente a la fermentación entérica por ganado (98.72, o sea 42.9% del total a nivel nacional) (Figura 7).

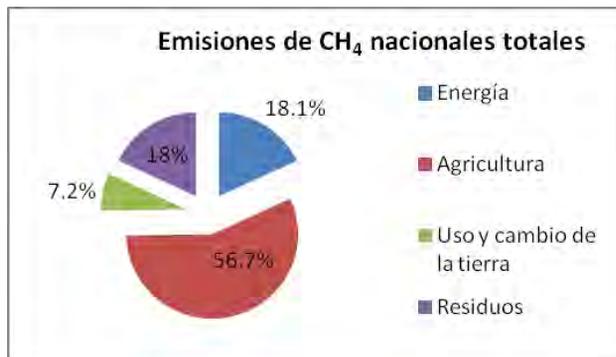


Figura 7. Emisiones de CH₄ nacionales totales
(Fuente propia con datos MARN, 2007)

Las emisiones de óxido nitroso ascendieron a 55.33 Gg, y el 97.5 por ciento es atribuido a la agricultura (emisiones por los suelos agrícolas y manejo de estiércol). Aquellas correspondientes al óxido de nitrógeno ascendieron a 89.72 Gg, y el sector agrícola, principalmente las rozas y las quemas de residuos agrícolas en el campo, contribuye en un 17.5 por ciento. En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono, éstas se encuentran en los 1651.45 Gg y un 29.7 por ciento corresponde al sector agricultura (rozas y quemas de residuos agrícolas en el campo).

Las absorciones también fueron contabilizadas: 37,460.17 Gg. Los datos presentados en este documento mostraron varios aumentos en comparación con datos de la primera comunicación nacional ante la CMNUCC (1990). Por el contrario, el dato de absorciones registró una disminución de 5,443.56 Gg con respecto a 1990.

De acuerdo con el estudio de Boshell (2011), las emisiones de óxido nitroso del subsector azucarero representan aproximadamente el 2.6 por ciento del total de emisiones del sector agropecuario nacional, mientras que las de metano equivalen tan sólo al 1 por ciento de las emisiones de todo el sector agropecuario del país. La emisión del suelo (incluye la emisión directa, la emisión indirecta por lixiviación/escurrimiento y la emisión indirecta por deposición atmosférica de N volatilizado) supera a la emisión por quemas para todos los ingenios. Los valores entre los que se encuentran las emisiones totales de cada uno de ellos varían en proporción con el área cultivada y cosechada, así como a la forma de cosecha (mecanizada) y al programa de fertilización: aproximadamente 400 t CO₂eq/año a casi 50,000 t CO₂eq/año. Las emisiones totales del subsector azucarero guatemalteco son menores a 1 Gg para el dióxido de nitrógeno y alrededor de 4 Gg para el metano, equivalentes a menos de 300,000 t CO₂eq/año.

La Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, ASOCAÑA, utiliza el dato siguiente: cada hectárea de tierra sembrada con caña de azúcar produce y libera a la atmósfera 40 toneladas de oxígeno y remueve 60 de dióxido de carbono. Tomando un área de 230,000 ha cultivadas con caña de azúcar en Guatemala, el subsector azucarero estaría liberando casi 9.2 millones de toneladas de oxígeno, removiendo a la vez 13.8 millones de toneladas de dióxido de carbono para una captura neta de 4.6 millones de toneladas. Este dato requiere de mayor investigación a través de mediciones específicas de emisiones de CO₂ tanto en el área de campo como en el proceso en fábrica, sin embargo, proporciona una base para afinar las cantidades exactas.

Oportunidades de mitigación del cambio climático

Entre las medidas propuestas para llevar a cabo acciones de mitigación de gases de efecto invernadero se encuentran las descritas en el Cuadro 7. Estas medidas podrían ser consideradas para acceder a diferentes mecanismos de financiamiento existentes en el mercado internacional de carbono, principalmente el voluntario, que se caracteriza por ser una alternativa a compradores voluntarios distintos de los compradores del mercado regulado (bajo las normas de la CMNUCC).

Entre las acciones para la Industria Azucarera están la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles (biodiésel y bioetanol) contemplando tanto su uso como su producción; la reducción del uso de fertilizantes minerales por un uso más eficiente y/o su sustitución por biofertilizantes (producidos internamente también); la gasificación de residuos de bagazo y caña de azúcar y una mayor generación de bioelectricidad (cogeneración) (Olivério *et al.*, 2010; Thomas y Davies, 2010). La captura de carbono también se puede realizar a través de la lignina y su mineral correspondiente lignita (Thomas y Davies, 2010). Cabe notar que muchas de las medidas ya han sido adoptadas dentro de la Agroindustria Azucarera a nivel mundial y en Guatemala.

Cuadro 7. Medidas de mitigación de GEI y sus efectos

Medida	Ejemplo	Efectos de mitigación		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Manejo de tierras de cultivo	Agronomía	Reducción de emisiones		Inciertos
	Manejo de nutrientes	Reducción de emisiones		Reducción de emisiones
	Gestión de residuos	Reducción de emisiones		Inciertos
	Gestión de recursos hídricos (riego y drenaje)	Inciertos		Reducción de emisiones
	Agrosilvicultura	Reducción de emisiones		Reducción de emisiones
	Manejo de nutrientes	Reducción de emisiones		Reducción de emisiones
Gestión de tierras (pastoreo, pastizales, otras)	Manejo de incendios forestales	Reducción de emisiones	Reducción de emisiones	Reducción de emisiones
	Control de la erosión, enmiendas orgánicas y de nutrientes	Reducción de emisiones		Inciertos

Continuación Cuadro 7.

Medida	Ejemplo	Efectos de mitigación		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Manejo de biosólidos	Uso más eficiente de nutrientes	Reducción de emisiones		Reducción de emisiones
	Mejora del manejo y almacenamiento		Reducción de emisiones	Inciertos
	Digestión anaeróbica		Reducción de emisiones	Inciertos
Bioenergía	Cultivos energéticos, sólidos, líquidos, biogás y residuos	Reducción de emisiones	Inciertos	Inciertos

(Modificado de CEPAL, 2009)

Entre las acciones que ya está efectuando la Agroindustria nacional se encuentra la utilización de la vinaza (residuo resultante de la fermentación y destilación de melazas con origen en la caña de azúcar, con concentraciones del 13 por ciento aproximadamente de sólidos totales) como fertilizante por algunos de los ingenios. A finales de los años 1990, el ingenio Santa Ana inició su uso. Posteriormente, en 2005, el ingenio Pantaleón comenzó a establecer áreas para la fertilización con dicho producto. Para el año 2011 contaba con un programa de 5,000 ha aproximadamente. El ingenio Tuluá experimenta con dicha técnica desde el 2008, mientras que el ingenio Magdalena empezó en 2010 (com. pers. O. Pérez, 2011). El empleo de la vinaza no sólo responde a una medida de mitigación, sino que también es un importante factor económico debido a los resultados positivos en el aumento de la producción de caña (Korndörfer *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2009). Su aplicación suple en buena medida los requerimientos nutricionales del cultivo. Además, desde 1994, se han llevado a cabo estudios para determinar las recomendaciones de la fertilización con diferentes nutrientes entre ellos el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Los resultados y análisis de estas investigaciones han permitido recomendar las dosis necesarias de nutrientes y, por ende, de fertilizantes para el las diferentes fases del cultivo de la caña de azúcar, lo cual ha influido en que disminuyan las cantidades de fertilizantes utilizadas (Pérez, 2002).

Varias pruebas realizadas en el campo han facilitado, entre otros aspectos, la validación de programas de riego bajo ciertas condiciones de suelo en la zona cañera de la costa sur (Castro *et al.*, 2009). También se han evaluado metodologías para medir la eficiencia energética bajo diferentes métodos de riego, situación que ha concluido en la determinación de una serie de

recomendaciones para la implementación en el campo (Castro y Sandoval, 2009). Así mismo resultados de otros estudios han revelado que los programas de riego son una herramienta para la planificación de esta actividad, puesto que estos varían dependiendo de la clase textural, la etapa fenológica y el tipo de sistema de riego utilizado (Castro *et al.*, 2010).

Resultados de investigaciones en Cuba han informado que la quema de 1 ha de caña de azúcar libera a la atmósfera 24.3 Mg de CO₂ al año y, si esto se compara con la capacidad de fijación del cultivo (definida en 60 Mg o t de CO₂ por ASOCAÑA) resulta ser no significativa (Cabrera y Zuaznábar, 2010). Se demostró, entonces, que la emisión de carbono a la atmósfera por efecto de la quema de una parte de la biomasa aérea es menor a la captura de carbono, por lo que se observa que el balance favorece la captura (*ibid.*). A pesar de lo anterior, se considera la cosecha mecanizada (en verde) como otra de las opciones para poder reducir las emisiones de CO₂. Esta técnica se adapta principalmente en pendientes menores a 12 por ciento. También se ha comprobado que el retorno de los residuos del cultivo en la superficie del suelo ha favorecido indirectamente la acumulación de materia orgánica y la reducción de emisión de gases cuando ésta se compara con las quemas (Cerri *et al.*, 2007). Hoy en día, la mayoría de los ingenios ha experimentado con esta técnica en un rango del 5 por ciento al 17 por ciento de la superficie del área cultivada. Durante la zafra 2006-2007, el ingenio Palo Gordo utilizó cosechadoras para trabajar en 16 por ciento del área mientras que el ingenio Tululá cosechó 17 por ciento. Los ingenios Santa Ana, La Unión-Los Tarros y Magdalena cosecharon 2099, 4000 y 8932 ha respectivamente (CENGICAÑA, 2008). Los datos más recientes indican que la cosecha mecanizada se encuentra entre el 10 por ciento y el 15 por ciento del área cultivada.

Desde 1994, se inició el proyecto de cogeneración empleando el bagazo de caña, mediante la suscripción de un contrato de suministro de energía y potencia que incluía a seis ingenios. Para satisfacer en forma permanente la demanda del sistema nacional interconectado, el bagazo se combina con el uso de combustibles fósiles (búnker) para producir energía en forma permanente (Vila, 2003). Con ello se ha evitado el vertido del bagazo de caña de azúcar en los cauces de ríos o su disposición a cielo abierto, a la vez que ha representado la disminución en el uso de combustibles fósiles. Durante las zafras 2007/2008 y 2008/2009, 97 por ciento de la energía fue producida a través de bagazo. El consumo de búnker pasó de casi 18900 galones en la zafra 1997/1998 a cerca de 3,700 galones en la zafra 2008/2009. La cogeneración de los ingenios ha aumentado en casi 6 por ciento la producción de energía en el Sistema Eléctrico Nacional, pasando de 14.54 por ciento en el período 2003/2004 a 20.59 por ciento en 2008/2009 (CENGICAÑA, 2009). Ahora surge el interés en investigar

sobre variedades de caña energética que conserven las propiedades de azúcar necesarias así como de fibra, para mantener e incluso incrementar áreas cultivadas con dicha variedad al igual que en otros países como Australia, Barbados y Estados Unidos (Falla y Melgar, 2010).

A la fecha, la agroindustria ha contribuido con más de 9,800 ha reforestadas con diferentes especies forestales (pinos, teca, eucaliptos, hule, caoba, cedro, árboles frutales y especies nativas entre otros) con diversos fines: energético, maderable, de producción de látex, como reserva natural, de protección de cuencas así como en ensayos para investigación (Com. pers. Manejo Ambiental ASAZGUA, 2011). Estas plantaciones forestales también han contribuido con el secuestro de carbono.

Una de las oportunidades puede surgir con el cambio del manejo de los suelos agrícolas, ya que se puede reducir y/o eliminar la liberación de carbono por pérdida de fertilidad, así como secuestrar carbono por el aumento de los niveles de materia orgánica y estimular un uso racional de fertilizantes. El cambio a sistemas de agricultura de conservación así como el manejo adecuado de fertilización traerán oportunidades de mitigación y adaptación ya que, en ambos casos, se optimiza el uso de insumos, se genera un ingreso adicional y se obtienen beneficios a mediano y largo plazo. Por ejemplo, en lo relacionado con la degradación de tierras y a la adaptabilidad de cultivos de cara a los cambios actuales (PNUD, 2009). En cuanto al uso de fertilizantes con menor potencial de emisión de gases de efecto invernadero, se debe investigar más. Hasta el momento se sabe que los inhibidores de la ureasa y de la nitrificación han demostrado potencial para incrementar la retención en el suelo y mejorar la recuperación por las plantas del N aplicado, pero se conoce poco sobre el impacto en la reducción de las emisiones totales de N_2O . Se ha demostrado que los fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizada reducen las pérdidas por drenaje y por emisiones atmosféricas, por lo que se podría sugerir que podrían ser efectivos para reducir emisiones de corto plazo. Sin embargo, es un reto crítico la falta de mediciones simultáneas de los tres gases de efecto invernadero durante períodos extensos de tiempo en los estudios agrícolas y ambientales. Una adecuada fertilización puede contribuir al incremento de la materia orgánica del suelo (MOS) o a reducir la tasa de pérdida de MOS. Factores como la implementación de estrategias de manejo de los residuos del cultivo minimizan el potencial de calentamiento global neto (Snyder *et al.*, 2008).

Otra oportunidad se presenta con los fitolitos, que son estructuras celulares epidérmicas silicificadas de la hoja y del tallo que ocluyen el carbono (Parr *et al.*, 2009). El contenido de carbono orgánico puede llegar a ser considerable: se ha podido extraer de 5 por ciento a 5.8 por ciento de contenido de carbono en hojuelas de avena (Parr y Sullivan, 2005). Medir la fracción del carbono ocluido

en estas estructuras permitiría cuantificar este elemento antes de que sea incorporado al suelo. Los fitolitos de las gramíneas son particularmente eficientes para ocluir el carbono y algunos estudios han demostrado que la caña de azúcar es particularmente eficiente para ello (Parr *et al.*, 2009). Otra de las ventajas que se ha comprobado es que el carbono ocluido en los fitolitos es muy resistente a la oxidación (Parr y Sullivan, 2005). En la caña de azúcar se ha observado un rango de carbono ocluido por fitolitos de entre 0.12 y 0.36 t e-CO₂ (ha-año)⁻¹ para determinadas condiciones ambientales (Parr *et al.*, 2009). Este carbono puede ser un componente clave del carbono orgánico del suelo y su acumulación constituiría entonces un proceso importante en la fijación terrestre del carbono del suelo (Parr y Sullivan, 2005). Con base en los hallazgos anteriores, se debería considerar la posibilidad de incluir en las combinaciones de las variedades de caña de azúcar el contenido de carbono ocluido en fitolitos como una característica deseable también (Parr *et al.*, 2009).

ADAPTACIÓN DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR AL CAMBIO CLIMÁTICO

La adaptación al cambio climático

El término *adaptación* puede entenderse como los arreglos que se dan en el comportamiento y características de un sistema que aumentan su habilidad para soportar presiones externas (Brooks, 2003). En el ámbito del cambio climático, la adaptación se ha definido como “un ajuste en los sistemas ecológicos, sociales o económicos en respuesta a cambios esperados u observados en el clima y sus efectos para aliviar el impacto adverso de dicho cambio o bien para aprovechar nuevas oportunidades” (Adger *et al.*, 2005); (IPCC, 2001b). Hacia finales del siglo XX, el tema de la adaptación no se tomó con mucha relevancia porque se pensaba que al enfocar atención y recursos en ella se estaba relegando la reducción de emisiones de los gases que causan el cambio climático (Pielke *et al.*, 2007). Sin embargo, la adaptación ha recobrado importancia y se ha puesto como alternativa o estrategia complementaria para mitigar ese cambio (Pielke *et al.*, 2007; Smit *et al.*, 2000).

Las distintas definiciones de adaptación tienen en común que mencionan los cambios en un sistema en respuesta a estímulos climáticos, sin embargo, también presentan variaciones. Éstas están relacionadas a la aplicación y contexto. Algunos, en cuanto a su aplicación, se refieren al cambio climático mientras otros a la variabilidad climática; la adaptación podría ser en respuesta a efectos adversos, a vulnerabilidades o a oportunidades. Hay variaciones también en cuanto a quién o qué se adapta, pues podrían ser sectores sociales y económicos, sistemas ecológicos sin o bajo manejo, o bien prácticas, procesos o

estructuras de sistemas. La adaptación también puede ser pasiva, reactiva o preventiva (Smit *et al.*, 2000).

Muchas sociedades, instituciones e individuos han modificado su comportamiento en respuesta a cambios en el clima que se han dado en el pasado y otras están contemplando adaptarse a las alteraciones climáticas futuras. Parte de esta adaptación es reactiva, puesto que responde a eventos pasados o actuales, pero también es preventiva porque se basa en las evaluaciones de las condiciones futuras. La adaptación se compone de acciones tomadas por individuos, grupos y gobiernos. Entre los factores que pueden motivar la adaptación están la protección del bienestar económico y el mejoramiento de la seguridad tanto de individuos como de comunidades (Adger *et al.*, 2005).

Se piensa a menudo que la población de países en vías de desarrollo no son víctimas pasivas, sino que en el pasado han demostrado la *resiliencia*³ más fuerte a sequías, inundaciones y otras catástrofes (Adger *et al.*, 2003). Una forma de buscar opciones de adaptación es tomar el enfoque análogo, que consiste en considerar estudios de caso de respuestas pasadas a la variabilidad y extremos climáticos (analogías temporales), o el comportamiento presente en regiones con condiciones climáticas similares a las que se puedan desarrollar en la región de interés (analogías espaciales) (Adger *et al.*, 2003). Mucha de la adaptación en países en vías de desarrollo va a depender de experiencias pasadas de cómo afrontar los riesgos relacionados al clima. Así, gran parte de la adaptación de los agricultores, pescadores, habitantes de las costas y residentes de grandes metrópolis será autónoma y facilitada por su propios recursos y capital social (Adger *et al.*, 2003).

Adaptación del cultivo de la caña de azúcar al cambio climático

Para la Industria Azucarera hay varias opciones de adaptación que se pueden considerar tanto en el campo como la fábrica. Sin embargo, la mayoría de impactos del clima podrían darse en el campo y éstos incidirían en una menor productividad, por lo que el mayor potencial de adaptación se encuentra ahí (SRDC, 2007). El Cuadro 8 muestra distintas medidas recomendadas de adaptación al cambio climático. Gran parte de ellas han sido realizadas o están en curso dentro de la Agroindustria Azucarera de Guatemala, aunque no necesariamente con el objetivo de afrontar el cambio climático, pero que indudablemente aumentan su *resiliencia*.

³ Resiliencia: Capacidad de los ecosistemas de absorber perturbaciones sin que se alteren significativamente las características de estructura y funcionalidad. Se define también como la aptitud que tienen los ecosistemas para poder retornar a su estado original después de que concluya la perturbación.

Cuadro 8. Opciones de adaptación para el cultivo de la caña de azúcar

Área de producción	Opciones de adaptación
Campo	<ul style="list-style-type: none"> • Adelantar la estación de siembra para acoplarse a los cambios en temperaturas mínimas • Implementar una zafra más larga para capitalizar los incrementos en temperaturas mínimas • Considerar la siembra de caña en otras épocas del año • Aumentar la existencia de agua para riego a través de: <ul style="list-style-type: none"> • Inversión en infraestructura de riego • Incremento en el uso de agua suplementaria por medio del riego • Instalación de obras de almacenamiento de agua dentro de las fincas • Uso y desarrollo de variedades de caña de azúcar que sean más eficientes en el uso del agua y que resistan mejor las sequías • Mayor eficiencia en las tecnologías de riego • Mayor utilización de otras tecnologías de riego (Ej. Pivotes centrales) • Variedades de caña de azúcar adaptadas a las condiciones locales • Considerar las estrategias de manejo de plagas en zonas con condiciones climáticas parecidas a las que probablemente se tengan en el futuro • Búsqueda de mayor eficiencia en las operaciones de corte • Aumentar la eficiencia en las operaciones de transporte • Mejora en el drenaje de los suelos en temporadas con lluvia intensa • Capacitación continua del personal para implementar los cambios en el manejo de los cultivos según los nuevos requerimientos • Conservación del suelo • Diversificación de cultivos • Seguros agrícolas • <u>Mejoramiento de información y pronósticos del clima</u>
Fábrica	<ul style="list-style-type: none"> • Continuar la mejora en eficiencia de la molienda • Eficiencia energética • Fuentes diversas o alternas de energía • Disminución en uso del agua • Reutilización del agua • Evaluación de riesgo de desastres en la fábrica y medidas para reducirlo • Planes de contingencia para el transporte de la caña hacia la <u>fábrica y luego del azúcar producido (incluyendo vías alternas)</u>

Fuente: Elaboración propia que incluye insumos de SRDC (2007), Santos y García (2008), CATHALAC/PNUD/GEF (2008) y Gbetibouo y Hassan (2005).

EL INSTITUTO PRIVADO DE INVESTIGACIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO (ICC): ciencia en acción para enfrentar el cambio climático

Es la institución fundada por el sector azucarero guatemalteco para afrontar los retos que representa el clima, tanto en el presente como en el futuro. Su finalidad es el desarrollo de programas de investigación y promoción de proyectos que contribuyan con la **reducción de la vulnerabilidad**, la **mitigación** y la **adaptación** al cambio climático en las comunidades, los sistemas productivos, la infraestructura y los servicios. Su fundación responde también a la necesidad identificada de que el país cuente con una institución que colabore en la generación de información esencial para las actividades de mitigación y adaptación al cambio climático. El área geográfica de acción del Instituto la constituye inicialmente la costa sur de Guatemala y las cuencas hidrográficas relacionadas, aunque luego podrá trabajar en otras áreas de Guatemala y Centroamérica según las necesidades y oportunidades que surjan.

El ICC busca trabajar en alianza a otras instituciones del sector público y privado para sumar esfuerzos que ayuden al país. Esto se visualiza tanto para la realización de investigaciones como para implementar acciones que contribuyan a mitigar y adaptarse al cambio climático. Un elemento esencial con el que el Instituto también quiere contribuir es el desarrollo de capacidades desde profesionales hasta el nivel comunitario. Gran parte del impacto que se logre dependerá del grado de internalización del conocimiento y destrezas de las personas ya sea dentro de empresas, instituciones o comunidades.

A pesar de ocupar solamente el 2.1 por ciento del territorio del país, las acciones del sector azucarero de Guatemala en materia de cambio climático pueden generar un impacto importante a nivel nacional. El Instituto persigue identificar acciones que ya se han realizado y que contribuyen directamente a la mitigación y adaptación al cambio climático para promoverlas dentro de la Agroindustria Azucarera y fuera de la misma. Aparte de eso, tiene la misión de crear e impulsar nuevas acciones que también se basen en lineamientos técnicos y científicos. Un ejemplo de acciones que han incidido en la mitigación del cambio climático es la reducción en la utilización de combustibles fósiles para producir electricidad, que ahora se produce ampliamente a partir del bagazo de la caña el que cubre no sólo las necesidades energéticas de los ingenios, sino aportando el excedente a la red nacional. Gran parte del trabajo de CENGICANA ha contribuido a que indirectamente se trabaje en mitigación y adaptación al cambio climático, y éste constituye un ejemplo de inversión que aporta a la sostenibilidad de la Agroindustria a largo plazo.

Líneas de investigación y de acción: oportunidades valiosas

Luego de revisar las condiciones existentes sobre el cambio climático en Guatemala y su relación con el cultivo de la caña de azúcar, se hace evidente la necesidad de realizar investigación según las condiciones nacionales y locales. Se requiere información y conocimiento básico sobre los sistemas climáticos del país, para comprender mejor su funcionamiento en el presente y como punto de partida para saber los posibles efectos del cambio climático futuro. Es por eso que se ha creado el Programa de Investigación en Clima e Hidrología, que está a cargo de generar más información, sobre todo, llevar a cabo análisis que proporcionen insumos para la planificación y puesta en marcha de acciones, especialmente de adaptación al cambio climático.

Uno de los retos de investigación es el desarrollo de modelos que simulen la influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo de la caña de azúcar. Ya se han llevado a cabo estudios con el modelo de zonas agroecológicas, el cual ha mostrado tener buena precisión para estimar la productividad potencial.

El Programa de Investigación sobre Ecosistemas aborda tanto la mitigación como la adaptación al cambio climático en los bosques y cultivos agrícolas. En el tema de mitigación, el Programa tiene la finalidad de estudiar acciones y tecnología para la reducción de emisiones de GEI, así como evaluar y crear estrategias para conservar la cobertura vegetal existente y recuperarla en lugares estratégicos. En este contexto, se abordará la estimación de las emisiones de CO₂ provenientes de las tierras agrícolas, por lo que se deberá investigar inicialmente sobre las reservas del carbono orgánico del suelo utilizando las siguientes variables: concentración de carbono, densidad aparente, vegetación autóctona y tipo de suelo. Estos estudios ayudarán a mejorar los inventarios de GEI del cultivo de la caña de azúcar. En el mediano plazo se tendrá un inventario de emisiones de toda la industria relacionada con la caña de azúcar, incluido su cultivo y también la producción de energía eléctrica (cogeneración con biomasa), producción de etanol, transporte de azúcar y otras actividades que no sólo están reduciendo la contaminación local, sino están haciendo aportes importantes en la mitigación del cambio climático.

Algunas de las investigaciones antes mencionadas se efectuarán de forma conjunta con el personal de los diferentes programas de CENGICAÑA. Uno de los proyectos potenciales es observar el comportamiento de las diferentes plagas y enfermedades que atacan el cultivo de la caña ante los efectos del cambio climático. También se podría iniciar un programa piloto de salud del suelo, con el fin de determinar la humedad y disponibilidad de agua y continuar así con la

agricultura de precisión, así como con otras mejoras para la eficiencia del uso del recurso hídrico y la tecnología de irrigación.

El ICC cuenta con dos programas destinados a la promoción e implementación de acciones que coadyuven a la mitigación y adaptación al cambio climático. Uno de ellos es el Programa de Manejo Integrado de Cuencas y el otro es el Programa de Gestión de Riesgo de Desastres. Ambos buscan incidir tanto dentro del sector azucarero como con otros actores prioritarios en el área de trabajo, tales como municipalidades y comunidades. El quinto programa del Instituto es más bien de carácter transversal a los otros cuatro puesto que se enfoca en el desarrollo de capacidades y divulgación. Estas actividades son esenciales para que se pongan en práctica las acciones impulsadas por el Instituto y que así su impacto sea significativo.

Específicamente para el caso del cultivo del azúcar y el cambio climático, los temas siguientes serán esenciales para trabajar en investigación y desarrollo (basado en SRDC, 2007), ya sea por el Instituto, CENGICAÑA o por los mismos ingenios, aunque idealmente por trabajo en conjunto entre todos:

- Salud del suelo (retención de humedad del suelo, erosividad reducida, retención de nutrientes)
- Agricultura de precisión
- Disponibilidad del agua (superficial y subterránea)
- Mejoramiento de la tecnología de riego y eficiencia en el uso del agua
- Oportunidades para mayor disponibilidad de agua (captación, almacenamiento, provisión y re-utilización)
- Implicaciones del aumento en el nivel del mar (para la zona litoral)
- Pronósticos estacionales y riesgo
- Oportunidades de biocombustibles a lo largo de la cadena de valor
- Huella de la industria (contabilizar las contribuciones de la Agroindustria Azucarera en emisiones de GEI)

Parte del trabajo del ICC será optimizar las acciones relacionadas con el cambio climático que ya se realizan y promoverlas en todos los ingenios. Estas acciones podrán convertirse en referente nacional, al propiciar que otras industrias y sectores sigan los mismos pasos. Hay un potencial muy grande de mejoras que beneficiarán al sector azucarero, las comunidades cercanas y las autoridades, como suma de los esfuerzos globales para lograr que los cambios en el clima no alcancen niveles peligrosos y perjudiquen en la menor medida posible a la población. Hay una oportunidad valiosa en poner manos a la obra y que la Agroindustria Azucarera Guatemalteca sea un ejemplo a nivel regional y mundial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adger, N.; Arnell, N. and Tompkins, E. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15 (2005) 77–86.
2. Adger, N.; Huq, S.; Brown, K.; Conway, D. and Hulme M. 2003. Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies* (3) pp.179–195.
3. Aguilar, E. *et al.* 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research* 110: 1-15.
4. Aguilar, J. *et al.* 2009. Boletín Estadístico. Recopilación de la información de los simposios de análisis de la zafra 1997/98-2008/09. Área de cogeneración. Año 10, No.2. Guatemala, CENGICAÑA.
5. Banco Mundial/ Unidad de País de Papuasias Nueva Guinea y las Islas del Pacífico. 2000. Impact of Climate Change on a High Island Viti Levu, Fiji (Chapter 3) *In Cities, Seas and Storms: Managing Change in Pacific Island economies*, Vol IV: Adapting to Climate Change. Washington, D.C., USA.
<http://siteresources.worldbank.org/INTPACIFICISLANDS/Resources/4-Chapter+3.pdf>
6. Bayon, R.; Hawn, A. and Hamilton, K. 2009. Voluntary Carbon Markets: An International Business Guide to What They Are and How They Work. 2a ed. Earthscan. Londres. 160p.
7. Boshell, J. F. 2011. Informe final del Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Subsector de la Caña de Azúcar de Guatemala. (Versión preliminar). Guatemala.
8. Brooks, N. 2003. Vulnerability, Risk and Adaptation: A conceptual framework. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 38.
9. Cabrera, J. A.; Zuaznábar R. 2010. Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. *Cultivos tropicales* 31(1); 5-13. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), La Habana, Cuba.

10. Castellanos, E.; Guerra, A. 2009. El cambio climático y sus efectos sobre el desarrollo humano en Guatemala. Cuadernos de desarrollo humano 2007/2008. Elaborado para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Guatemala. 51 p.
11. Castro Loarca, O. R.; Ramírez, C.; Martínez, A.; Sánchez, M.; Celada, C. 2009. Validación de Programas de Riego pre-corte en diferentes condiciones de suelo en la zona cañera de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 188-197.
12. Castro Loarca, O. R.; Sandoval, J. 2009. La medición de la eficiencia energética en el riego presurizado: una descripción de metodologías y recomendaciones para su implementación en el campo. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 198-206.
13. Castro Loarca, O. R.; Veliz, E.; Esquit V. 2010. Programación del riego según la relación: agua-suelo-caña de azúcar-clima. Una herramienta técnica para planificar el riego y responder a las interrogantes: ¿Cuánto y cuándo regar? En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 249-255.
14. CATHALAC/PNUD/GEF. 2008. Fomento de las capacidades para la etapa II de adaptación al cambio climático en Centroamérica, México y Cuba. Síntesis regional. Ciudad de Panamá. 36 p.
15. CENGICAÑA. 2010. Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. 442 p.
16. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Naciones Unidas, Santiago de Chile. 148 p.
17. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL. 2010. La economía del cambio climático. Síntesis 2010. Naciones Unidas, Santiago de Chile. 113 p.
18. Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL/Secretaría de Planificación y Programación –SEGEPLAN. 2005. Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan, Octubre de 2005. 212 p.

19. Downing, T. E.; Ringius, L.; Hulme, M. and Waughray, D. 1997. Adapting to climate change in Africa: prospects and guidelines. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2: 19–44.
20. Falla, C.; Melgar M. 2010. Situación actual de las investigaciones en caña energética a nivel mundial. En Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2009-2010. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 133-142.
21. Gawander, J. 2007. Las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de caña de azúcar en Fiji. *Boletín de la OMM* 65 (1): 34-39.
22. Gbetibouo, G. A.; Hassan R. M. 2005. Measuring the economic impact of climate change on major South African field crops: a Ricardian approach. *Global and Planetary Change* 47: 143–152.
23. Gilbert, R. A.; Rainbolt, C. R.; Morris, D. R.; Bennett A.C. 2007. Morphological responses of sugarcane to long-term flooding. *Agronomy Journal* 99: 1622-1628.
24. Gouvêa, J. R. F.; Sentelhas, P. C.; Gazzola, S. T.; Cabral Santos M. 2009. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 66 (5): 593-605.
25. Guerra-Noriega, A. 2010. Climate-related Disaster Risk in Mountain Areas: the Guatemalan highlands at the start of the 21st Century. Tesis doctoral, Universidad de Oxford, Inglaterra. 287 p.
26. Ingenio Madre Tierra. Comunicación personal y Presentaciones realizadas para reunión de Análisis de Merma de Producción 2010-2011. 29 de abril de 2011. Auditorio CENGICAÑA. Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.
27. IPCC. 2007. “Summary for Policymakers”. En “Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, eds.). Cambridge University Press, Cambridge y Nueva York.
28. IPCC. 2001a. Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I,II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Watson, R.T. Watson and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

29. IPCC. 2001b. Overview of Impacts, Adaptation and Vulnerability to Climate Change. En *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, editado por S. Schneider and J. Sarukhan: Intergovernmental Panel on Climate Change.
30. IPCC. 2000. América Latina. En *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad*, editado por O. Canziani y S. Díaz: Inter Governmental Panel on Climate Change.
31. Jiménez, A.; Girot, P. 2002. Marco de adaptación al cambio climático para los recursos hídricos en Centro América. San José: Sistema de Integración Centro Americana, Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza y Global Water Partnership.
32. Knox, J. W.; Rodríguez, Díaz, J. A.; Nixon, D. J.; Mkhwanazi, M. 2010. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems* 103: 63–72.
33. Korndörfer, G. H.; Nolla, A.; Gama, A. J. M. 2010. Manejo, aplicación y valor fertilizante de la vinaza para caña de azúcar y otros cultivos. 23-28 p. En www.tecnicana.org
34. Kuhnel, I. 1993. Impacts of extreme climatic conditions on sugar cane production in Northeastern Australia. *En Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993)* 213: 157-163.
35. Ligorria, J. P. 2009. Evaluación sobre el cambio climático y vulnerabilidad socioambiental de Guatemala. Insumo para el Informe del Estado Ambiental de Guatemala. 60 p.
36. Manejo Ambiental de ASAZGUA. 2011. Comunicación personal. Guatemala, C.A.
37. Marengo, J. A.; Menéndez, A.; Guetter, A.; Hogue, T.; Mechoso, C.R. 2004. Caracterización y evaluación de métodos de predicción de eventos extremos de clima y de la hidrología en la Cuenca del Plata. En: *Predicción Hidroclimática, Componente 2a: Definición del Sistema de Predicción Hidroclimática Subcomponente 2a4 Tema 3 Eventos Hidrometeorológicos Extremos*. FMAM/PNUMA/OEA/FONPLATA/OMM.
38. Meneses, A.; Melgar, M.; Posadas, W. 2008. Boletín Estadístico. Recopilación de la información de los simposios de análisis de la zafra 1990/91-2006/2007. Área de Campo. Año 9, No.2. Guatemala, CENGICANA.

39. Meneses, B. 2011. Comunicación personal. Guatemala, C.A.
40. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales-MARN/ Universidad Rafael Landívar –URL/ Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente –IARNA/ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – PNUMA. 2009. Informe Ambiental del Estado de Guatemala GEO Guatemala 2009. Guatemala. 277 p.
41. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales-MARN/Fondo para el Medio Ambiente Mundial -GEF/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo –PNUD. 2001. Inventario de Gases de Efecto Invernadero Año Base 1990. Guatemala. 10 p.
42. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales-MARN/Programa Nacional de Cambio Climático. 2007. Resumen Inventario de Gases de Efecto Invernadero año 2000 Versión Preliminar. Guatemala. 17 p.
43. Olivério, J. L.; Carmo, V. B.; Gurgel, M. A. 2010. The DSM –Dedini Sustainable Mill: A new concept in designing complete sugarcane mills. *In Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists – ISSCT*. Vol 27: 1-34.
44. Parr, J.; Sullivan, L.; Quirk, R. 2009. Sugarcane phytoliths: Encapsulation and sequestration of a long-lived carbon fraction. *Sugar Tech* 11(1); 17-21.
45. Parr, J. F.; Sullivan, L. A. 2005. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 117-124.
46. Pérez, O. 2002. Nutrición y fertilización de caña de azúcar en Guatemala. *Boletín Técnico Informativo*, año 10, No.1: 3-8. Guatemala.
47. Pérez, O. 2011. Comunicación personal. CENGICAÑA, Guatemala.
48. Pérez, O.; López, A.; Hernández, F.; Ralda, G. 2009. Evaluación de las aplicaciones continuadas de vinaza en el cultivo de caña de azúcar y su efecto en un suelo Andisol de Guatemala. En: Memoria. Presentación de resultados de investigación. Zafra 2008-2009. Guatemala, CENGICAÑA. pp. 173-181.
49. Pielke, R. Jr.; Prins, G.; Rayner, S. and Sarewitz, D. 2007. Lifting the taboo on adaptation. *Nature* 445 (2007) 597-598.

50. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 2009. Documento de Discusión Nacional acerca de los Asuntos Claves en el Análisis del Sector Agricultura (Mitigación). Bogotá, Colombia. http://www.pnud.org.co/img_upload/61626461626434343535373737353535/CAMBIOCLIMATICO/3.%20Memorias%20Di%C3%A1logo%20Nacional%20Interministerial%20sobre%20cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20el%20sector%20agropecuario/2DocdiscusionAgriculturayMitigacionColombia.pdf
51. Sáenz-Romero, C.; Rehfeldt, G. E.; Crookston, N. L.; Duval, P.; St-Amant R.; Beaulieu, J.; Richardson, B.A. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595–623.
52. Santos, C.; García, S. 2008. Climate Change Vulnerability and Adaptation Assessment for Sugarcane and Citrus. Belize Second National Communication Project, Final Report. City of Belmopan. 54 p.
53. Smit, B.; Burton, I.; Klein, R. J. T.; Wandel, J. 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change* 45: 223–251.
54. Snyder, C.; Bruulsema, T.; Jensen, T. 2008. Mejores prácticas de manejo para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de los fertilizantes. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 40: 7-10. Argentina.
55. SRDC. 2007. Climate Change and the Australian Sugarcane Industry: Impacts, adaptation and R&D opportunities. Sugar Research and Development Corporation, Australian Government. Brisbane. 45p.
56. Suárez, A.; Meneses, A.; Melgar, M. 2007. Evolución de la producción y productividad de la Agroindustria Azucarera y mapas generales de la zona cañera de la Costa Sur de la República de Guatemala. Guatemala. 20 p.
57. Subirós, F. 2000. El cultivo de la caña de azúcar. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.
58. Thomas, G.; Davies, W.A. 2010. Carbon captura with sugarcane technology. *In Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists – ASSCT*. Vol. 32: 588-599.
59. Vila, A. 2003. El impacto social de la Agroindustria Azucarera en Guatemala. Tesis Lic. Administración de Empresas. Universidad Francisco Marroquín, Guatemala. 46 p.

CENGICAÑA

Alcance del Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001:2008

“Investigación y Desarrollo de Variedades de Caña de Azúcar y Tecnologías en Manejo Integrado de Plagas, Fertilización, Riegos y Capacitación para la Agroindustria Azucarera”.

OTROS PROGRAMAS Y ÁREAS:

- Transferencia de Tecnología
- Análisis de Productividad (campo y fábrica)
- Programa de Investigación Industrial
- Malezas y Madurantes
- Biotecnología
- Detección de Patógenos en Semilleros
- Servicios Analíticos de Laboratorio
- Sistema de Información para Agricultura de Precisión
- Servicio de Información y Documentación de la Caña de Azúcar