

# USO DE INDICADORES VERDES PARA EVALUAR CUÁN LIMPIO ES UN PROCESO EN SU SÍNTESIS TRADICIONAL VS LA SÍNTESIS TRIBOQUÍMICA Y EN MICROESCALA

## USE OF INDICATORS GREEN TO EVALUATE HOW CLEAN IS A PROCESS IN TRADITIONAL SYNTHESIS VS TRIBOCHEMICAL SYNTHESIS IN MICROSCALE

**Lilia Fernández-Sánchez<sup>1\*</sup>, María de la Luz Soto-Téllez<sup>1</sup>, Leonardo Hernández-Martínez<sup>1</sup>**

1) Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas, Departamento de Ciencias Básicas, Área de Química Aplicada, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, 02200 México, D.F. - México

\*autor de contacto (lfs@correo.azc.uam.mx)

*Recibido: 07/08/2012 - Evaluado: 03/10/2012 - Aceptado: 08/11/2012*

### RESUMEN

El problema ambiental debido al desarrollo no sostenible lleva a los docentes a educar en la construcción de la sostenibilidad, con el fin de formar profesionales comprometidos con su medio y la sociedad. La literatura reporta una herramienta útil para este propósito, se vale de los principios de la química verde que aplicable a un proceso, le dan categoría de qué tan verde es. Este trabajo analiza un clásico de química orgánica, la reacción de Cannizzaro: en A) su proceso tradicional y en B) triboquímicamente, en microescala y con una química analítica verde. La evaluación se realizó con la suma de las categorías numéricas de los principios verdes de cada paso de su diagrama de flujo entre el número de principios analizados, dando como resultado que el proceso A) esté en una categoría de transición gris a verde y el proceso triboquímico B) esté en una categoría de un gran acercamiento verde.

### ABSTRACT

The environmental problem due to unsustainable development leads teachers to educate in developing sustainability and to prepare professionals involved with the environment and society. The literature reports a useful tool for this purpose, uses the principles of green chemistry, which apply to a process, gives category of how green this is. This paper analyzes a classic organic chemistry, the Cannizzaro reaction: in A) the traditional process and in B) tribochemically, in microscale and with a green analytical chemistry. The evaluation was made with the sum of numerical categories from green principles of each step of the flowchart, between the number of principles discussed, with the result that the process A) is in a category of transition gray to green and tribochemical process B) is in a category of a large green approach.

Palabras clave: educación; química analítica verde; triboquímica; microescala

Keywords: education; green analytical chemistry; tribochemical; microscale

## INTRODUCCIÓN

La emergencia ambiental tratada en diversos foros internacionales (Estocolmo, 1972; Belgrado, 1975; Tbilisi, 1977; Moscú, 1987; Río de Janeiro, 1992; Río+20, 2012), ha alertado al hombre para que tome medidas que remedien y eviten el desarrollo no sostenible. Dichos foros ven en la educación ambiental una herramienta para la construcción de la sostenibilidad. La educación según la UNESCO (Educación para la sostenibilidad, 2005) es el medio para lograrlo. Los gobiernos de todo el mundo deben incluir en sus sistemas educativos en todos los niveles y modalidades la educación ambiental integral. En el currículo de la química implica cambiar la forma de pensar y actuar de los docentes para educar en una química socialmente responsable (Reyes-Sánchez, 2012) que enseñe a los estudiantes futuros profesionales a realizar una química verde con el diseño de procesos limpios (Doria, 2009; Rodríguez & Govea, 2006) que respeten la vida en el planeta, y como a analizarlos de forma crítica todo proceso químico para a efecto de evaluar qué tanto lo son en realidad. Una forma eficaz de trabajar los principios de la Química Verde (Anastas & Warner 1998), mostrados en la Tabla 1, en la enseñanza de la Química, es a través del trabajo de laboratorio que realizan los estudiantes y una herramienta útil para este propósito es a través de la propuesta de índices basados en esta química verde publicada por Morales *et al.* (2011).

Tabla 1: Los 12 principios de la química verde

<b>1. Prevención</b> Es preferible evitar la producción de un residuo que reciclarlo, tratarlo o disponer de él una vez que se haya formado.
<b>2. Economía atómica</b> Los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera que se incorporen al máximo los reactivos en el producto final, minimizando la formación de subproductos.
<b>3. Uso de metodologías que generen productos con toxicidad reducida</b> Siempre que sea posible, los métodos de síntesis deberán diseñarse para utilizar y generar sustancias que tengan poca o ninguna toxicidad, tanto para el hombre como para el medio ambiente.
<b>4. Generar productos eficaces pero no tóxicos</b> Los productos químicos deberán ser diseñados de manera que mantengan la eficacia a la vez que reduzcan su toxicidad.
<b>5. Reducir el uso de sustancias auxiliares</b> Se evitará, en lo posible, el uso de sustancias que no sean imprescindibles (disolventes, reactivos para llevar a cabo separaciones, etc.) y en el caso de que se utilicen que sean lo más inocuos posible.
<b>6. Disminuir el consumo energético</b> Los requerimientos energéticos serán catalogados por su impacto medioambiental y económico, reduciéndose todo lo posible. Se intentará llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura y presión ambientes.
<b>7. Utilización de materias primas renovables</b> La materia prima ha de ser preferiblemente renovable en vez de agotable, siempre que sea técnica y económicamente viable.
<b>8. Evitar la derivatización innecesaria</b> Se evitará en lo posible la formación de derivados (grupos de bloqueo, de protección/desprotección, modificación temporal de procesos físicos/químicos).
<b>9. Potenciación de la catálisis</b> Se emplearán catalizadores (lo más selectivos posible), reutilizables en lo posible, en lugar de reactivos estequiométricos
<b>10. Generar productos biodegradables</b> Los productos químicos se diseñarán de tal manera que al finalizar su función no persistan en el medio ambiente sino que se transformen en productos de degradación inocuos.
<b>11. Desarrollar metodologías analíticas para la monitorización en tiempo real</b> Las metodologías analíticas serán desarrolladas posteriormente para permitir una monitorización y control en tiempo real del proceso, previo a la formación de productos secundarios.
<b>12. Minimizar el potencial de accidentes químicos</b> Se elegirán las sustancias empleadas en los procesos químicos de forma que se minimice el riesgo de accidentes químicos, incluidas las emanaciones, explosiones e incendios.

Se rediseñan las prácticas aplicando los 12 principios de la química verde, la técnica de la microescala, y en la medida de lo posible las técnicas mecanoquímicas sin disolvente y a temperatura ambiente (Phonchaiya *et al.*, 2009; Melgar *et al.*, 2009). Así como la cultura de reducir, reusar y reciclar los residuos. Se analizan y evalúan con los índices verdes tanto las prácticas originales como las modificadas y se comparan las respectivas prácticas para conocer el grado de avance que se logró hacia un proceso más verde, y por lo que el objetivo de este trabajo es aplicar esta técnica: la propuesta metodológica y los índices de dichos autores a un clásico de química orgánica; la reacción de Cannizzaro en A) su técnica tradicional y B) utilizando la técnica triboquímica, en microescala y con un análisis químico verde en tiempo real. La evaluación total de ambas metodologías se comparará para conocer el grado de acercamiento verde alcanzado al modificar el proceso A) y realizarlo mediante el procedimiento B).

Para evaluar qué tan verde ha sido el proceso rediseñado, se aplicaron los índices de evaluación de qué tan verde es un proceso, mediante la metodología y con la escala propuesta por los autores antes mencionados, lo cual constituye una herramienta de análisis y evaluación de procesos químicos a través de una escala tipo Likert (Borda & Tuesca, 2009; Ortiz, 2004) que combina colores e índices numéricos que van del 1 al 10 según puede observarse en la Figura 1.

10	Totalmente verde	5	Transición café a verde
9	Gran acercamiento verde	4	Ligeramente café
8	Muy buen acercamiento verde	3	Medianamente café
7	Buen acercamiento verde	2	Muy café
6	Ligero acercamiento verde	1	Totalmente café

Fig. 1: Elemento tipo Likert: Código de color, escala numérica y categoría. Herramienta de análisis basada en los principios de la Química Verde.

De acuerdo a la propuesta, el análisis y evaluación del proceso químico incluye los pictogramas correspondientes a la toxicidad, inflamabilidad, corrosión y daño al medio ambiente, de las sustancias involucradas Figura 2 (Reglamento CE, 2008; CEP hazard symbols, 2009).



Fig. 2. Pictogramas de peligro para sustancias químicas según el Reglamento CE (nº) 1272/2008.

## METODOLOGÍA

La metodología de evaluación del acercamiento verde a través de los índices anteriores se describe a continuación: Se lee el documento a evaluar. Se escribe tal y como aparecen en la publicación, el título, autores, año, nombre de la revista, volumen, página inicial y resumen si los hay. Se elabora un resumen en el contexto verde del trabajo en cuestión. Se dibuja la reacción general del proceso. Se construye un diagrama de flujo del método experimental del proceso por evaluar asignándose a cada etapa una letra en minúscula en orden

alfabético consecutivo. Se coloca para cada etapa experimental un cuadro conteniendo un número que indique el principio que se abarca y evalúa, mediante el código de color propuesto y el grado de acercamiento verde que se complementa con la evaluación indicada entre paréntesis Figura 2. Para otorgar la calificación se debe tomar en cuenta la participación de lo que se está analizando en la reacción y cuál es el daño y/o riesgo que esto representa para el ambiente y/o la salud. Se incluyen los pictogramas correspondientes a la toxicidad, inflamabilidad, corrosión y daño al medio ambiente, de los reactivos, disolventes, productos y residuos generados. Se elabora una tabla mostrando el orden en el cual aparecen cada uno de los pasos experimentales en el diagrama de flujo y la evaluación justificada en los principios de la Química Verde que se hace para cada paso del proceso. Se realiza la evaluación global sumando la categoría numérica de cada principio (número entre paréntesis) dividida entre el número de ellos. Finalmente se presenta al pie del diagrama de flujo experimental, el resultado en la escala tipo Likert de asignación numérica y de color correspondiente.

A continuación se presenta la aplicación de la metodología de evaluación del acercamiento verde al proceso tradicional A) y del método triboquímico en microescala B), de la Reacción de Cannizzaro.

**PROCESO A)**

**Técnica:** Clásica  
 Escala convencional  
 10 mL de Benzaldehido (7)  
 7 g de NaOH

**Tiempo de reacción:** (6)  
 1 hora

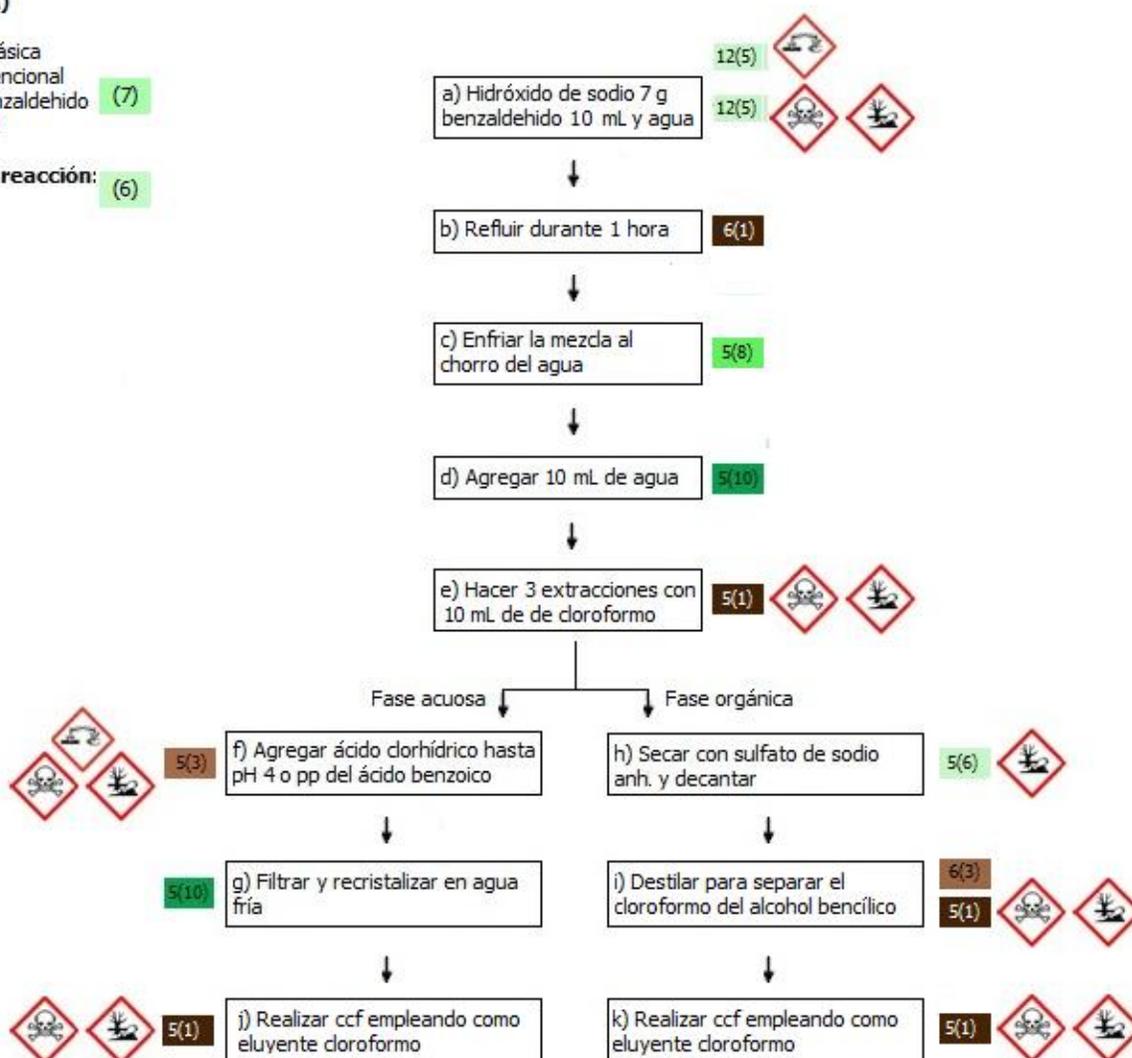


Fig. 3: Diagrama de flujo del proceso A)

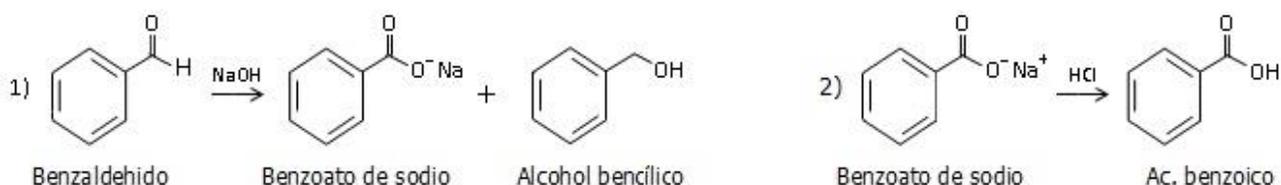
Proceso tradicional (A)

Título: "Práctica de laboratorio: Reacción de Cannizzaro"

Resumen: No contiene

Resumen en el contexto verde: Este proceso no indica ser verde. La práctica describe la reacción de auto oxidación del benzaldehído con una base fuerte.

Reacción:



La Figura 3 muestra el diagrama de Flujo del proceso A) y la Tabla 2 la evaluación de este proceso.

Tabla 2: Evaluación del proceso A)

Paso	Análisis y evaluación a través de los índices verdes.
a)	El empleo de hidróxido de sodio, sustancia cáustica, puede considerarse conforme al <b>principio 12</b> como una transición de café a verde <b>(5)</b> . El empleo de benzaldehído, sustancia nociva para la salud y a los organismos acuáticos puede considerarse conforme al <b>principio 12</b> como de transición de gris a café <b>(5)</b> . Al agua usada como disolvente (aunque verde) se le asignó una categoría de muy buen acercamiento verde <b>(8)</b> en el <b>principio 5</b> , ya que puede eliminarse. El empleo de cantidades convencionales de los reactivos merece una calificación de <b>(7)</b> .
b)	El reflujo se lleva a cabo empleando gas licuado por lo cual el acercamiento al <b>principio 6</b> se considera totalmente gris <b>(1)</b> . Deben preferirse otras fuentes de activación. El tiempo de reacción de 1 h merece una calificación de <b>(6)</b> .
c)	El enfriamiento de la mezcla de reacción se lleva a cabo con agua, por lo que este paso es adecuado evaluarlo con muy buen acercamiento verde <b>(8)</b> en cuanto al <b>principio 5</b> ya que se pueden utilizar otras formas de enfriamiento evitando el desperdicio de agua.
d)	Al agregar agua al producto de reacción y siendo un disolvente verde califica al <b>principio 5</b> con <b>(10)</b>
e)	En este paso se hacen extracciones con cloroformo el cual es nocivo a la salud y medio ambiente por lo que se le asigna en el <b>principio 5</b> , una categoría de <b>(1)</b> totalmente café.
f)	Se hace uso de HCl concentrado, corrosivo, tóxico y nocivo tanto para el hombre como para la naturaleza por lo que se da una evaluación de medianamente café <b>(3)</b> del <b>principio 5</b> .
g)	En la filtración y recristalización se emplea agua, disolvente verde, en consecuencia este paso es totalmente verde <b>(10)</b> en el <b>principio 5</b> .
h)	El sulfato de sodio anhidro en el suelo puede ocasionar daño a las plantas en consecuencia se califica el <b>principio 5</b> como con un ligero acercamiento verde <b>(6)</b> . La destilación del cloroformo nocivo para la salud y el medio ambiente hace a esta etapa totalmente café <b>(1)</b> en el <b>principio 5</b> .
i)	La destilación del cloroformo nocivo para la salud y el medio ambiente hace a esta etapa totalmente café <b>(1)</b> en el <b>principio 5</b> . La destilación del cloroforme consume energía se califica al <b>principio 6</b> con la categoría de medianamente café <b>(3)</b>
j)	El empleo de cloroformo como eluyente de la ccf hace a este paso totalmente café <b>(1)</b> en el <b>principio 5</b> .
k)	El empleo de cloroformo como eluyente de la ccf hace a este paso totalmente café <b>(1)</b> en el <b>principio 5</b> .

Proceso triboquímico de la síntesis de Cannizzaro (B)

Título: Gel obtenido triboquímicamente y elucidación de sus componentes. Fernández *et al.* (2012). *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3 (4).

Resumen (Abstract): El presente trabajo tiene como objetivo reportar un gel obtenido triboquímicamente en la reacción de Cannizzaro y la elucidación de sus componentes. La reacción entre benzaldehído e hidróxido de sodio llevada a cabo sin disolvente y agitando las fases (método triboquímico) forma una suspensión que reacciona rápidamente (1 minuto), produciendo un gel blanco, el análisis infrarrojo arroja alcohol bencílico y benzoato de sodio. La difracción de rayos X confirma la fase continua del gel como benzoato de sodio. El análisis micrográfico del gel muestra una fase amorfa correspondiente al benzoato de sodio. La técnica triboquímica es un proceso limpio acorde con los principios de la química verde. La espectroscopia en fase sólida y de los líquidos sin ningún tratamiento de disolución que consuma disolventes contribuye al desarrollo de una química analítica verde.

**PROCESO B)**

**Técnica:** Microescala  
 1 mL de Benzaldehído (10)  
 0.2 g de NaOH

**Tiempo de reacción:** (10)  
 1 minuto

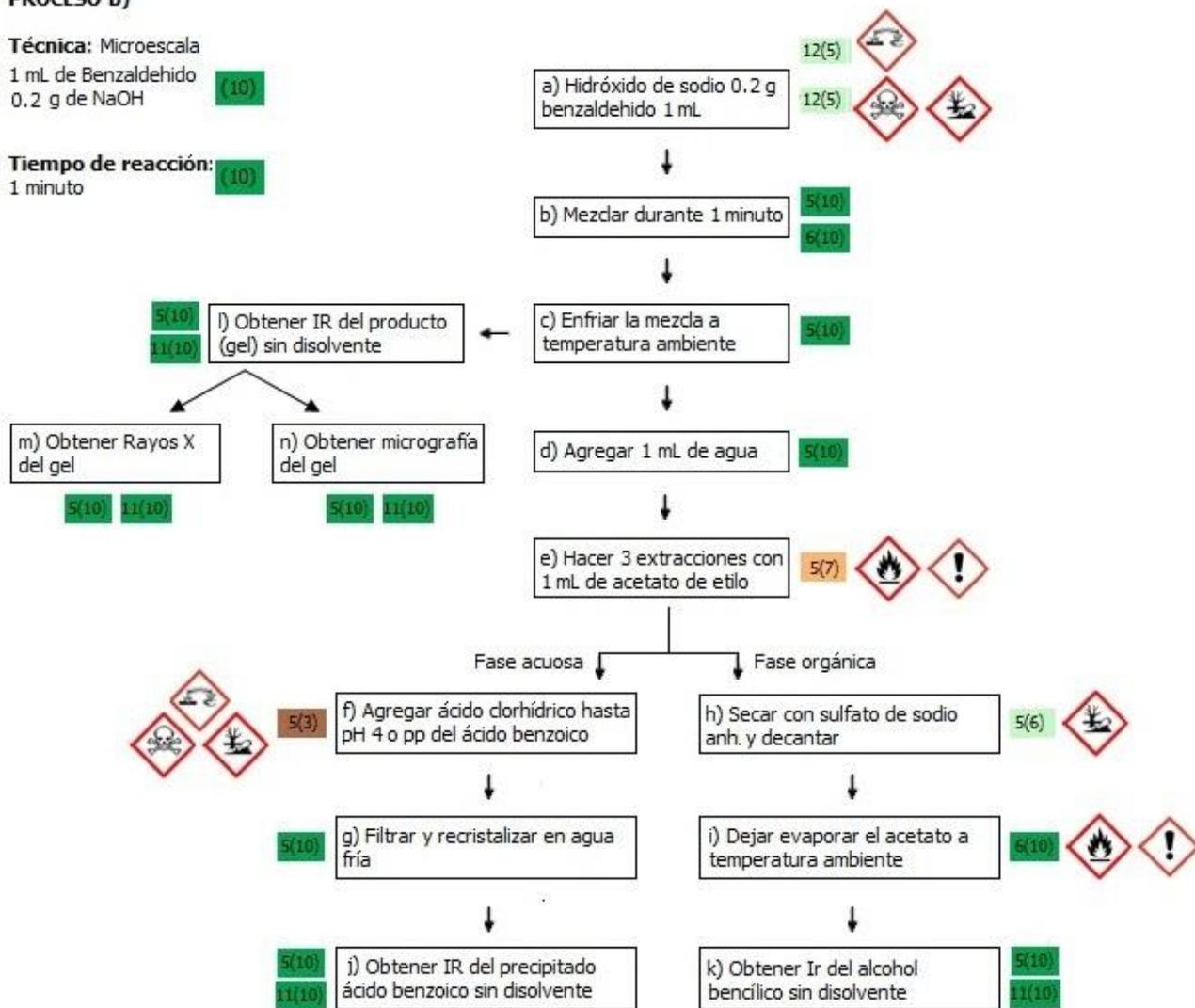


Fig. 4: Diagrama de flujo del proceso B)

Resumen en el contexto verde: Este proceso indica ser verde y utilizar una química analítica verde. La práctica describe la reacción de auto oxidación del benzaldehído con una base fuerte en microescala, mecanoquímicamente sin disolventes y con una química analítica verde en tiempo real. Se aplicaron 3 principios de la Química verde en la síntesis triboquímica de Cannizzaro: Principio 5 "Disolventes y auxiliares más seguros", Principio 6 "Diseño para la eficiencia energética", Principio 11 "Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación"

Reacción: Igual que la del proceso A)

El Diagrama de Flujo del proceso B) que corresponde al Método mecanoquímico se muestra en la Figura 4, y la evaluación del proceso se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3: Evaluación del proceso B)

Paso	Análisis y evaluación a través de los índices verdes.
a)	El empleo de hidróxido de sodio, sustancia cáustica, puede considerarse conforme al <b>principio 12</b> como una transición de café a verde <b>(5)</b> . El empleo de benzaldehído, sustancia nociva a la salud y a los organismos acuáticos puede considerarse conforme al <b>principio 12</b> como de transición de café a verde <b>(5)</b> . Las cantidades de reactivos corresponden a la técnica de la microescala por lo que se asigna una calificación de <b>(10)</b> .
b)	El mezclado del benzaldehído con el polvo de NaOH sin disolvente durante un minuto hace al <b>principio 5</b> totalmente verde <b>(10)</b> El mezclado no tiene gasto energético por lo que el <b>principio (6)</b> se considera totalmente verde <b>(10)</b> La reducción del tiempo de reacción de 1 h a 1 min puede considerarse como una categoría de <b>(10)</b>
c)	El enfriamiento de la mezcla de reacción se lleva a cabo a temperatura ambiente, por lo que este paso es adecuado evaluarlo como totalmente verde <b>(10)</b> en cuanto al <b>principio 5</b> .
d)	El uso de agua como disolvente el cual es considerado verde por Anastas y Warner, en consecuencia este paso es totalmente verde <b>(10)</b> respecto al <b>principio 5</b>
e)	En este paso se hacen extracciones con acetato de etilo el cual es inflamable e irritante por lo que se le asigna en el <b>principio 5</b> , una categoría de <b>(7)</b> buen acercamiento verde.
f)	Se precipita el ácido benzoico con HCl concentrado corrosivo, tóxico y nocivo tanto para el hombre como para la naturaleza por lo que se da una evaluación de medianamente café <b>(3)</b> del <b>principio 5</b> .
g)	En la filtración y recristalización del ácido benzoico se emplea agua, disolvente verde, en consecuencia este paso es totalmente verde <b>(10)</b> en el <b>principio 5</b> .
h)	El sulfato de sodio anhidro en el suelo puede ocasionar daño a las plantas en consecuencia se califica el <b>principio 5</b> como con un ligero acercamiento verde <b>(6)</b> .
i)	La evaporación del acetato de etilo a temperatura ambiente (no hay gasto energético) da al <b>principio 6</b> una calificación de <b>10</b>
j)	Se obtiene el IR del ácido benzoico en tiempo real tasando al <b>principio 11</b> como totalmente verde <b>(10)</b> , sin el uso de disolvente calificando al <b>principio 5</b> con una categoría de totalmente verde <b>(10)</b> .
k)	Se obtiene IR del alcohol bencílico en tiempo real tasando al <b>principio 11</b> como totalmente verde <b>(10)</b> , sin el uso de disolvente calificando al <b>principio 5</b> con una categoría de totalmente verde <b>(10)</b> .
l)	Se obtiene el espectro IR del gel en tiempo real calificando al <b>principio 11</b> como totalmente verde <b>(10)</b> ), sin el uso de disolvente calificando al <b>principio 5</b> con una categoría de totalmente verde <b>(10)</b> .
m)	Se obtiene el espectro de Rayos X del gel en tiempo real, se califica el <b>principio 11</b> como totalmente verde <b>(10)</b> . Sin uso de disolvente asignándose una evaluación de <b>(10)</b> en el <b>principio 5</b> .
n)	Se tienen las micrografías del gel en tiempo real, se califica el <b>principio 11</b> como totalmente verde <b>(10)</b> . Sin uso de disolvente asignándose una evaluación de <b>(10)</b> en el <b>principio 5</b> .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación a través de la suma de los números entre paréntesis entre la frecuencia de los principios verdes analizados de los diagramas de flujo de A) proceso clásico y B) proceso triboquímico en microescala, de la reacción de Cannizzaro se dan en la siguiente Tabla 4, no se consideran para esta evaluación los pasos j) y k) de ambos procesos ya que se reservan para la evaluación de la química analítica de ambas técnicas.

Tabla 4: Evaluación a través de los índices verdes de A) proceso clásico y B) proceso triboquímico en microescala de la reacción de Cannizzaro de los pasos a) hasta i)

Paso	A)		B)	
	Principios evaluados	Categoría	Principios evaluados	Categoría
a)	Masa convencional de reactivos	(7)	Cantidad de reactivos en microescala	(10)
	12	(5)	12	(5)
	12	(5)	12	(5)
	5	(8)		
b)	Tiempo de reacción 1 hora	(6)	Tiempo de reacción 1 minuto	(10)
	6	(1)	5	(10)
			6	(10)
c)	5	(8)	5	(10)
d)	5	(10)	5	(10)
e)	5	(1)	5	(7)
f)	5	(3)	5	(3)
g)	5	(10)	5	(10)
h)	5	(6)	5	(6)
i)	6	(3)	6	(10)
	5	(1)		
Suma de las categorías numéricas entre el número de principios: (74)/14 = 5.28. Transición café a verde			Suma de las categorías numéricas entre el número de principios: (106)/13 = 8.15. Muy buen acercamiento verde	
				

Las técnicas analíticas aplicadas a la síntesis triboquímica B): espectroscopia IR, Rayos X y la micrografía de barrido, no requieren disolvente, utilizan pequeñas cantidades de las sustancias y prácticamente se hacen en tiempo real, técnica acorde con la química verde (Molina-Díaz *et al.*, 2010). La Tabla 5 muestra el análisis y evaluación con los índices verdes de la química analítica de los productos en el proceso A) y en el proceso B).

Los espectros IR se obtuvieron en un Espectrofotómetro ALPHA FT-IR BRUKER. Configuración de la óptica: Sample Compartment with: MIR, KBr, RT-DLATGS Accesorio: ATR platinum Diamond. Programa OPUS para adquisición de espectros.

Las fotomicrografías se obtuvieron con la técnica microscopía electrónica de barrido en el Microscopio Electrónico de Barrido XL30 ESEM, Phillips, el cual trabaja en modo tradicional de alto vacío, así como en modo ambiental de bajo vacío; y cuenta con un detector de Si/Li para análisis elemental por espectroscopia de energía dispersiva. Rayos X, Scanning Electron Microscopy (SEM) y Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), SEM/EDS.

La Tabla 6 muestra la evaluación total (evaluación de cada tipo de síntesis Tabla 4 mas la evaluación correspondiente a las técnicas de elucidación de productos Tabla 5) para el proceso clásico A) y el triboquímico en microescala B).

El proceso clásico A) en su síntesis presenta una evaluación numérica de (5) y de categoría transición café a verde, y el triboquímico en microescala una evaluación de (8) con categoría de muy buen acercamiento verde como se observa en la Tabla 3, lo que indica una mejora de 3 puntos (30%) al aplicar: la técnica triboquímica, el cambio de disolvente de tóxico a menos tóxico, el ahorro energético, la eliminación del agua como disolvente en el paso inicial y el trabajo en microescala.

Tabla 5: Comparación de los índices verdes entre la cromatografía en capa fina del proceso A) y la técnica analítica verde del proceso B). Evaluación de los pasos j) hasta n)

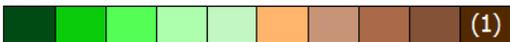
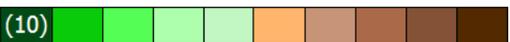
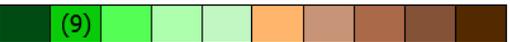
Paso	A)		B)	
	Cromatografía en capa fina	Principios evaluados y categorías asignadas	Técnica analítica Verde	Principios evaluados y categorías asignadas
j)	Ácido benzoico	5(1) eluyente tóxico Cloroformo	IR Ácido benzoico	11(10) análisis en tiempo real 5(10) sin disolvente
k)	Alcohol Bencílico	5(1) eluyente tóxico Cloroformo	IR Alcohol Bencílico	11(10) análisis en tiempo real 5(10) sin disolvente
l)			IR en tiempo real del "Gel" (benzoato de sodio y alcohol bencílico)	11(10) análisis en tiempo real 5(10) sin disolvente
m)			Rayos X del gel	11(10) análisis en tiempo real 5(10) sin disolvente
n)			Micrografía de barrido del gel	11(10) análisis en tiempo real 5(10) sin disolvente
Suma de las categorías numéricas entre el número de principios: (2)/2 = 1. Totalmente café			Suma de las categorías numéricas entre el número de principios: (10)/10 = 10. Totalmente verde	
				

Tabla 6: Evaluación global del proceso clásico A) y el proceso triboquímico B) de la reacción de Cannizzaro.

Proceso	Suma de índices numéricas/principios evaluados			Código de color y categoría
	Síntesis	Química analítica verde	Evaluación total	
A)	74/14 = 5.28	2/2 = 1	76/16 = 4.75	Transición café a verde 
B)	106/13 = 8.15	100/10 = 10	206/23 = 8.95	Gran acercamiento verde 

El empleo de una técnica analítica verde en la síntesis triboquímica, lleva al proceso tradicional A) al proceso B), de una evaluación de (1) que corresponde a una categoría de totalmente café a una evaluación numérica de (10) o totalmente verde indicando una mejora de 9 puntos (90%) como se observa en la Tabla 5.

La Tabla 6 recoge las evaluaciones resultantes de la aplicación de los índices verdes del proceso A) y del proceso B) en cuanto a su síntesis y en cuanto a la química de análisis de los productos, estas evaluaciones se suman respectivamente dando al proceso A) un valor global de (5) que corresponde a una categoría de transición de café a verde, y al proceso B) una evaluación global de (9) correspondiente a un gran acercamiento verde de acuerdo a la escala de análisis y evaluación dada en la Figura 1.

### Aproximación pedagógica

La técnica clásica de Cannizzaro es una práctica de laboratorio de química orgánica con una pedagogía tradicional en donde el profesor expone los conceptos a los alumnos y los alumnos trabajan la síntesis al pie de la letra del manual, con cantidades convencionales de reactivos, técnicas como el calentamiento con reflujo para obtener los productos y el seguimiento de la síntesis a través de la cromatografía de capa fina, proceso que concluye con un informe. El cambio a la técnica triboquímica, en microescala y con una química analítica verde no obstante de presentar por parte del docente los fundamentos teóricos y del trabajo de laboratorio de la misma manera tradicional, permite a los alumnos percibir que trabajan con más seguridad, con menos reactivos (cultura del ahora) disminuyendo los residuos y el tiempo de reacción lo que les permite una mejor discusión de sus resultados. Las técnicas analíticas son más limpias y certeras en la elucidación de los productos. La técnica de IR en tiempo real les permite en el momento contrastar los espectros adquiridos con los reportados en la literatura y confirmar el éxito o no de la síntesis. Los alumnos aprenden a preferir las técnicas limpias y los docentes los invitan a continuar con esta práctica en su vida profesional.

## CONCLUSIONES

En la síntesis tradicional de Cannizzaro A) el uso de cloroformo en la síntesis y en la identificación de los productos por cromatografía de capa fina ccf, el empleo de reactivos correspondientes a la escala tradicional, el gasto energético y un largo tiempo de reacción aleja a la reacción de un proceso verde (transición café a verde). En la síntesis triboquímica de Cannizzaro B) la técnica analítica químicamente verde en tiempo real, el proceso en microescala, la misma técnica mecanoquímica que reduce el tiempo de reacción de 1 hora a 1 minuto y la aplicación de los principios verdes lograron que la síntesis tuviera un gran acercamiento verde. El empleo de la herramienta metodológica semicuantitativa y cualitativa mediante un código de color y basada en los 12 principios de la química verde expuesta en este trabajo permite revisar que tan limpio es un proceso y actuar en consecuencia.

El trabajo de los alumnos en el aula experimental aplicando sus conocimientos sobre la química verde para llevar los procesos químicos a ser amigables con el medio ambiente, les proporciona un aprendizaje significativo. La evaluación de cuán verde es su proceso modificado y analizado con los índices verdes, escala numérica y de color hace que recuperen la actividad pedagógica lúdica perdida en la enseñanza tradicional que impone los conocimientos sin opción de razonarlos y modificarlos, además esta actividad de aprendizajes prácticos dan a los alumnos destrezas pre-profesionales para en el futuro enfrentar los retos del desarrollo no sostenible al tomar conciencia del medio ambiente y de la necesidad de protegerlo al mismo tiempo que como profesionales eduquen a su sociedad en la construcción de la sostenibilidad.

En cuanto a los docentes protagonistas del proceso enseñanza-aprendizaje, la educación ambiental busca cambiar su manera de pensar y actuar para que eduquen en la ética de la sostenibilidad, en donde la química verde forme parte de este rumbo y que plasmada en el currículo de la química experimental sea usada en su actividad didáctica como una herramienta para introducir en las prácticas de química las modificaciones necesarias para hacer de los procesos químicos más limpios, y más importante aun inspirando desde el aula y a través del continuo análisis y reflexión de la experiencia cotidiana, la construcción de los valores que les permitan hacer realidad este cambio cultural en beneficio de nuestro futuro común, la supervivencia en la tierra.

## REFERENCIAS

1. Anastas, P.T. & Warner J.C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice (p. 30). New York, U.S.A.: Oxford University Press.
2. Belgrado (1975). Seminario Internacional de Educación Ambiental. La Carta de Belgrado. Una Estructura Global para la Educación Ambiental. Realizado entre el 13 al 22 de octubre. Belgrado (Yugoslavia). <http://www.jmarcano.com/educa/docs/belgrado.html>
3. Borda, P.M. & Tuesca, M.R. (2009). Métodos Cualitativos. Herramientas para la investigación en salud, pp. 71-72. 2ª. Ed. Barranquilla (Colombia): Ediciones Uninorte
4. CEP hazard symbols (2009). penarth management. New Hazard Symbols (Pictograms) introduced under the CLP Regulations. <http://www.penarth.co.uk/about/Guides/CLP-Hazard-symbols-for-Resource.pdf>
5. Doria, S.M.C. (2009). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educ. quím.*, 20 (4), 412-420.
6. Educación para la sostenibilidad (2005). Década por una educación para la sostenibilidad. <http://www.oei.es/decada/compromiso.htm>
7. Estocolmo (1972). Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, [en línea]. Realizado entre el 5 al 16 de junio de 1972. Estocolmo (Suecia). <http://www.pnuma.org/docamb/mh1972.php>.
8. Fernández, L., Gutiérrez, M. & Martínez, L.E. (2012). Gel obtenido triboquímicamente y elucidación de sus componentes. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3 (4), 165-175.
9. Melgar, Á., Enríquez, C., Mendoza, G., Fernández, L. & Elorza, M.E. (2009). Un clásico de química orgánica en microescala y con fricción: la reacción de Cannizzaro. *Educ. quím.*, 21 (2), 178-182.
10. Molina-Díaz, A., García-Reyes, J.F. & Gilbert-López, B. (2010). Solid-phase spectroscopy from the point of view of green analytical chemistry. *TrAC-Trends in Analytical Chemistry*, 29 (7), 654-666.
11. Morales, M.L., Martínez, J.O., Reyes-Sánchez, L.B., Hernández, O.M., Arroyo, G.A., Obaya, A. *et al.* (2011) ¿Qué tan verde es un experimento? *Educ. quím.*, 22 (3), 240-248.
12. Moscú (1987). Moscú 87, Congreso Internacional sobre la Educación y la Formación Relativas al Medio Ambiente de la Unesco-PNUMA. *Contacto*, 12 (3), [en línea]. Realizado entre el 17 al 21 de agosto de 1987. Moscú (URSS). <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001535/153585sb.pdf>
13. Ortiz, U.F.G. (2004). Diccionario de Metodología de la investigación científica, pp. 57-58. México: Limusa.
14. Phonchaiya, S., Panijpan, B., Rajviroongit, S., Wright, T. & Blanchfield, J.T. (2009). A Facile Solvent-Free Cannizzaro Reaction. *J. Chem. Educ.*, 86 (1), 85-86
15. Reglamento CE (2008). NOTAS PRÁCTICAS. *Erga noticias/4*, número 108/2009.[http://www.uv.es/fqlabo/SEGURIDAD\\_2010/pictogramas.pdf](http://www.uv.es/fqlabo/SEGURIDAD_2010/pictogramas.pdf)
16. Reyes-Sánchez, L.B. (2012). Aportación de la química verde a la construcción de una ciencia socialmente responsable. *Educ. quím.*, 23 (2), 222-229.  
[http://www.exeedu.com/publishing.cl/av\\_cienc\\_ing/](http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/)

17. Río de Janeiro. (1992). Cumbre de la Tierra. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Agenda 21, Capítulo 36, [en línea]. Río de Janeiro (Brasil). <http://www2.medioambiente.gov.ar/acuerdos/convenciones/rio92/agenda21/age36.htm>
18. Río+20 (2012). Cumbre de la Tierra. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, [en línea]. Realizada entre el 20 al 22 de junio de 2012. Río de Janeiro (Brasil). <http://www.uncsd2012.org/content/documents/814UNCSD%20REPORT%20final%20revs.pdf>
19. Rodríguez, I. & Govea, H. (2006). El discurso del desarrollo sustentable en América Latina. *Revista Venezolana de Economía y Ciencias Sociales* [en línea], 12 (2), 37-63. [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S131564112006000200003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131564112006000200003&lng=es&nrm=iso)
20. Tbilisi (1978, abril). Informe Final de la Conferencia Intergubernamental sobre Educación Ambiental, organizada por la Unesco con la cooperación del PNUMA, [en línea]. Realizada entre el 14 al 26 de octubre de 1977. Tbilisi (URSS). Paris: Unesco. <http://unesdoc.unesco.org/images/0003/000327/032763sb.pdf>