

Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan

Ángeles Suhgey Garay Jacome
Ramón Valdivia Alcalá[§]
Juan Hernández Ortiz
Fermín Sandoval Romero

Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (anllely0608@gmail.com; jhdzo@yahoo.com.mx; fsandoval.romero@gmail.com).

[§]Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com.

Resumen

En el mundo y en México la agricultura usa aproximadamente 75% del agua fresca. La escasez del agua a nivel mundial obliga que cada vez se utilicen técnicas ahorradoras de agua en el sector agropecuario, ya que tiene valor económico. Un concepto importante que ayuda a conocer la cantidad de agua utilizada en la producción y el consumo es la huella hídrica. El objetivo de esta investigación es estimar la huella hídrica para el cultivo de caña de azúcar de la cuenca Papaloapan para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua en este cultivo. Para esta investigación se calculó de la huella hídrica de los 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan, se realizó siguiendo el procedimiento de Allen *et al.* (2006); FAO (2006); Haro *et al.* (2014). La mayor huella hídrica se registra en las áreas que abastecen de caña a los ingenios de El Carmen ($328 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de caña), el de San Nicolás ($313 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de caña) y el de San José de Abajo (309 m^3), mientras que el Ingenio de San Pedro registró la menor huella hídrica ($239 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$). Por hectárea las superficies que suministran caña para El Carmen tienen el valor más alto con $21\,301 \text{ m}^3$, seguidas por San Nicolás con $21\,221 \text{ m}^3$ y por San Miguelito con $20\,923 \text{ m}^3$. En estas zonas es posible reducir la huella hídrica haciendo un mejor manejo del cultivo y usando variedades con más productividad.

Palabras clave: caña de azúcar, eficiencia, escasez de agua, huella hídrica.

Recibido: octubre de 2021

Aceptado: enero de 2022

Introducción

El agua es un recurso finito indispensable para la vida, la salud pública, los ecosistemas, la biodiversidad, la producción de alimentos, la higiene, la industria, la energía y el desarrollo económico. Tiene connotaciones culturales, sociales, religiosas y económicas importantes que en ocasiones complican su uso eficiente. El uso indiscriminado que se ha hecho del recurso, aunado a la falta de cuidado para evitar la contaminación de depósitos superficiales y subterráneos, provoca un tipo de escasez que puede causar limitaciones importantes para su uso.

En la actualidad la aparición de las consecuencias del cambio climático que se expresan como lluvias torrenciales atípicas y sequías prolongadas, así como las acciones humanas que derivan en contaminación excesiva de aguas superficiales y subterráneas, obligan a que los temas relacionados con el agua sean tratados con mucha atención por parte del gobierno, el sector académico y la sociedad en general.

En este contexto de polémica con respecto a las características del agua se tiene que, en la Declaración de Dublín en 1992, se establecen varios principios. El siguiente principio es relevante para lo que se quiere resaltar en esta investigación: principio No. 4 el agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico (WMO, 1992).

Las deficiencias en la administración del agua han provocado que, de las 731 cuencas hidrológicas definidas en el país, 104 presentan problemas de disponibilidad (SEMARNAT, 2014). En el mundo la agricultura y ganadería demandan un poco más de 70% del total del uso de agua dulce; diversas acciones han conducido al deterioro y contaminación del recurso hídrico. Se prevé que para el año 2025, aproximadamente 1 800 millones de personas en el mundo, se enfrenten a condiciones de escasez absoluta de agua (FAO, 2013). Ante este panorama es necesario contar en la agricultura, con sistemas de riego y abastecimiento cada vez más eficientes que permitan el máximo ahorro posible de agua, con el objetivo de asegurar el recurso para las futuras generaciones.

La SEMARNAT (2014) menciona que, del total de agua dulce en el país, 77% se destina a la agricultura, 14% a uso público urbano y 9% para industrias y termoeléctricas, el agua es un recurso que puede ser usado en prácticamente todas las actividades económicas, por lo que su asignación debería fluir hacia las actividades que mejor uso hacen de este recurso.

En los últimos años México ha avanzado en algunos aspectos como la aplicación de un sistema legislativo mediante la Ley de Aguas Nacionales (que incluye la definición de los derechos de agua, el registro público de los mismos y la posibilidad de realizar transferencias de derechos entre usuarios) y la creación y funcionamiento de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), pero aún se enfrenta a grandes problemas en materia de sostenibilidad, eficiencia económica, equidad, sobreexplotación, contaminación, fallas del mercado y falta de regulaciones, por mencionar los más evidentes, que se pueden englobar en temas de gobernanza.

Ante este escenario se requiere contar con políticas que contribuyan a la gestión eficiente del agua en general y en particular para uso agrícola. Políticas que permitan una coordinación entre los diferentes niveles de gestión desde usuarios a autoridades y se promueva una asignación del recurso de manera eficiente, que sea flexible ante las condiciones climáticas futuras y se use el recurso de forma sostenible.

Para apoyar la mejora en la asignación del agua en las diversas actividades económicas se han construido algunos indicadores entre los que sobresale el de la huella hídrica. El estudio de los impactos del hombre sobre el medio ambiente ha generado conceptos como huella ecológica, huella de carbono y más recientemente el de huella hídrica.

El objetivo de la investigación fue estimar la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en los ingenios de la cuenca Papaloapan. Se parte de la hipótesis de que la caña de azúcar registra una huella hídrica más alta que la que tienen otros cultivos en México y que no en todos los sitios en los que se siembra la caña de azúcar en la zona de estudio se presenta el mismo valor para la huella hídrica. El concepto de huella hídrica se muestra como un indicador de sostenibilidad que permite identificar relaciones causa efecto a nivel socioambiental, siendo las actividades socioeconómicas el factor de presión sobre el agua. Establece una relación directa entre los sistemas hídricos y el consumo humano. Esta relación puede ayudar a determinar factores que explican tanto la escasez como la contaminación del agua, pero permitir la mejora del uso del agua en la producción agrícola.

Según AGRODER (2012), la huella hídrica es una herramienta de planeación del manejo del recurso hídrico, que junto a otros indicadores brinda una visión integral del impacto que tiene la población humana en el ambiente y en los ecosistemas. La caña de azúcar requiere grandes cantidades del recurso hídrico para su desarrollo, es por esto y por la concentración de este cultivo en la región de estudio, que se seleccionó a la cuenca del Papaloapan que históricamente ha sido una zona cañera con un número importante de ingenios en tres estados de la República Mexicana. La huella hídrica puede estimarse para todas las actividades en las que se use este recurso. Hoekstra y Mekonnen (2011) calcularon la huella hídrica para la humanidad, lo hicieron por nación desde una perspectiva de producción y consumo.

Estimaron la huella verde, la azul y la gris. Algunos autores han medido los efectos de la variabilidad interanual del consumo, la producción, el comercio y el clima sobre los cultivos y su relación con la huella hídrica verde y azul y el comercio virtual de agua interregional (Zhuo *et al.*, 2016). Los pronósticos para el futuro, también se han considerado, presentando diferentes estimaciones de la huella hídrica considerando el crecimiento de la población, el crecimiento económico, los diferentes patrones de producción/comercio, patrones de consumo y el desarrollo de tecnologías (Ercin y Hoekstra, 2014).

La estimación de la huella hídrica se ha hecho para varios cultivos y con diferentes objetivos. Se tiene que Haro *et al.* (2014) estimaron la huella hídrica para la caña de azúcar cultivada para utilizarla en la producción de etanol; es decir, como fuente de energía y reducir las emisiones de combustibles fósiles en el transporte, por lo que analizan el impacto de una política para elaborar etanol sobre el recurso agua. En las actividades pecuarias se ha estimado la huella hídrica para la producción de pollo, puerco y becerros en diferentes países y sistemas de producción (Gerbens-Leenes *et al.*, 2013). También se calculó para el ganado estabulado (Navarrete-Molina, 2016), que lo hicieron en la Comarca Lagunera, México.

Al comparar algunos estudios sobre la huella hídrica en el cultivo de caña de otros países, se llega a la conclusión de que la huella hídrica es uno de los indicadores más extendidos, actualizados y utilizados para evaluar el uso y consumo de agua asociado a un producto, actividad o cuenca hidrográfica. Para Brasil la huella de agua gris en el rendimiento del cultivo de caña de azúcar se estimó y fue considerado un valor alto y así demostró cuánto puede demandar este cultivo en recursos hídricos para diluir su carga de contaminantes (Lins *et al.*, 2019).

En Argentina se construyó un mapa regional de la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar (Jorrat *et al.*, 2018). La huella hídrica ha sido utilizada para conocer la cantidad del recurso hídrico que se importa o se exporta. Un caso es lo estimado para Marruecos por Schyns y Hoekstra (2014). En la estimación de la huella hídrica se han aplicado metodologías alternativas, se tiene el caso del estudio Lamastra *et al.* (2014); Haro *et al.* (2014); Allen *et al.* (2006); FAO (2006) y los realizados con la propuesta de Hoekstra *et al.* (2011).

Materiales y métodos

En México, para la gestión de las aguas subterráneas se han definido 653 acuíferos los cuales suministran gran parte de las demandas de agua de los desarrollos industriales y cerca de 65% del volumen de agua que demandan las ciudades donde se concentran unos sesenta millones de habitantes. Además, estos acuíferos constituyen la principal fuente de abastecimiento de la población rural y aportan el agua para el riego de aproximadamente dos millones de hectáreas, eso equivale al 35% de la superficie de riego en el país (SEMARNAT, 2013).

El Río Papaloapan es la segunda cuenca hidrográfica más importante de México, posee una longitud de 354 km, nace en la confluencia de los Ríos Valle Nacional y Santo Domingo y desemboca en el golfo de México en Alvarado, Veracruz. Pasa por los estados Oaxaca, Puebla y Veracruz. Gracias a esa longitud de la cuenca ayuda varios ingenios a adquirir su producción. Para esta investigación se llevó a cabo el cálculo de la huella hídrica de 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan. La ubicación de estos ingenios son los siguientes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación de los ingenios analizados.

Ingenio	Ubicación
La margarita	Tramo del ferrocarril Córdoba-Tierra Blanca, Veracruz, km 69 de la Estación de bandera denominada Vicente, Oax. Carretera Córdoba Veracruz (camino Federal 150) a la altura del entronque 'La Tinaja'.
El Refugio	Estación El Refugio, perteneciente al municipio de Cosolapa
Constancia	Tezoanapa, Veracruz
Motzorongo	Motzorongo, perteneciente al municipio de Tezonapa, Veracruz
El Carmen	localizado en la zona centro del estado de Veracruz
La Providencia	Se ubica en Cerrada Constitución, Providencia, Cuichapa, Veracruz
San Nicolás	Se ubica en el estado de Veracruz, Carretera Amatlan s/n, Congregación Gobos García, municipio de Cuichapa
San Cristóbal	Nicolás Bravo # 5, Carlos A. Carrillo, Veracruz
San Pedro	Camino vecinal Lerdo-Saltabarranca s/n, Cd. Lerdo de Tejada, Veracruz
San José de Abajo	Domicilio Conocido s/n Calle Principal Localidad Ignacio Vallarta municipio de Cuitlahuac, Veracruz
San Miguelito	Carretera Córdoba-Amatlán km 2 Col. Buena Vista, Córdoba, Veracruz
Tres Valles	Ciudad de Tres Valles, Veracruz

El cálculo de la huella hídrica para la superficie que abastece de caña de azúcar a los 12 ingenios azucareros de la cuenca del Papaloapan se realizó siguiendo el procedimiento de Haro *et al.* (2014); Allen *et al.* (2006); FAO (2006). El proceso para determinar la huella hídrica incluyó varios pasos los cuales se describen a continuación: en primer lugar, se georreferenciaron los ingenios azucareros tomando las coordenadas decimales de latitud norte y longitud oeste de SAGARPA-SIAP-CONADESUCA (2014). La altitud de los ingenios azucareros se tomó la reportada como altura sobre el nivel del mar promedio del municipio.

Después se procedió a ubicar las estaciones meteorológicas más cercanas a los ingenios azucareros. Para tal propósito se tomaron las coordenadas decimales de las estaciones meteorológicas disponibles por entidad en el microsítio del sistema CLICOM del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE, 2020).

Al comparar la georreferenciación de los ingenios azucareros y las estaciones meteorológicas se eligió la estación meteorológica cuyas coordenadas decimales de latitud y longitud fueran iguales o muy similares a las de los ingenios azucareros. Como tercer paso se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) como el parámetro principal a partir del cual se cuantifica la huella hídrica de la caña de azúcar. Para el referido cálculo se utilizó la calculadora de la evapotranspiración de referencia de la FAO (Raes, 2012). La calculadora ET_o reduce considerablemente la demanda de información requerida para la estimación de la ET_o. La información mínima requerida por dicho software son las coordenadas de latitud y longitud de la respectiva estación meteorológica, la altitud sobre el nivel del mar, la temperatura máxima y la temperatura mínima.

Los datos meteorológicos se declararon que corresponden a datos mensuales. Además, se seleccionó la opción de que los datos de temperatura no estén atados a un año específico además de que los datos corresponden a los meses de enero a diciembre. El programa utiliza los datos calibrados de antemano para la ubicación, en este caso, del ingenio azucarero. De esta manera la calculadora ET_o considerará la localización del ingenio. También se considerará que el ingenio azucarero se localiza en un área semi húmeda o húmeda. Se deja también la opción de que el área donde se localiza el ingenio azucarero se ubica es un área con vientos ligeros a medios. Los datos introducidos en la interfaz corresponden al ingenio azucarero La Margarita, ubicado en Oaxaca.

Después de introducir la información requerida en la interfaz se procede a crear el archivo por lo que aparece una nueva interfaz a caja de dialogo. En dicha información se tiene como opción declarar información sobre la temperatura del aire, la humedad del aire, la velocidad del viento, la luz del sol y la radiación.

Para ejemplificar se muestra el caso del ingenio La Margarita (Cuadro 2). Se captura la temperatura máxima y la temperatura mínima de la estación San Juan Bautista Tuxtepec, con las coordenadas y la altura sobre el nivel del mar, correspondientes al ingenio La Margarita y las opciones que por default utiliza la calculadora ET_o de la FAO, va a proporcionar la evapotranspiración de referencia (ET_o) para el cálculo de la huella hídrica de la caña de azúcar. Por ejemplo, al declarar que la temperatura máxima en marzo fue de 28.9 °C y la temperatura mínima de 18.3 °C, la calculadora automáticamente mostrará que la evapotranspiración de ese mes fue de 4.1 mm por día. La ET_o se calcula automáticamente al terminar de introducir ambas temperaturas.

Cuadro 2. Temperatura y precipitación del ingenio La margarita.

Mes	Temp máxima (°C)	Temp mínima (°C)	Temp promedio (°C)	Precipitación (mm)	ET _o (mm día ⁻¹)	K _c	ET _o *K _c	Días/mes	ET _o total/mes
Enero	23.2	16.2	19.7	28.9	2.4	0.6	1.32	31	40.9
Febrero	24.5	16.7	20.6	16.1	2.9	0.4	1.1	28	30.9
Marzo	28.9	18.3	23.6	16.5	4.1	1	3.9	31	120.7
Abril	33	20.8	26.9	41.7	5.1	0.8	3.93	30	117.8
Mayo	33.3	22.3	27.8	178.9	5	1.2	5.8	31	179.8
Junio	30.5	21.8	26.1	562.2	4.3	1.3	5.68	30	170.3
Julio	29.6	21.5	25.6	587.1	4	1.4	5.4	31	167.4
Agosto	30.4	21.4	25.9	465.3	4.2	1.2	4.91	31	152.3
Septiembre	28.6	21.6	25.1	598.1	3.4	1.3	4.45	30	133.6
Octubre	30.5	21.7	26.1	174.1	3.7	1.2	4.44	31	137.6
Noviembre	26.9	18.3	22.6	55.7	3	1.6	4.86	30	145.8
Diciembre	26.3	18.3	22.3	103	2.7	1.1	2.89	31	89.6
				2 828					1 487

Resultados y discusión

Para esta investigación se estimó la huella hídrica de la caña de azúcar cultivada en superficies que abastecen a los 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan, se aplicó la metodología usada por De Haro *et al.* (2014); Allen *et al.* (2006); FAO (2006), mismo que fue descrito en el apartado de metodología. Dado que los cultivos de caña en la cuenca en general se reportan en las estadísticas como de temporal, y aunque se conoce que reciben riegos de auxilio en algunos meses del año (dos o tres), la metodología usada considera el valor de la huella como huella verde y no fue posible hacer la distinción para la huella azul, aunque fuera mínima, así como tampoco obtener estimadores económicos con relación a la productividad del agua de riego.

Los resultados se presentan en dos partes: primero se muestran los resultados obtenidos para la huella hídrica de la caña de azúcar en las áreas que abastecen a los 12 ingenios azucareros que continúan funcionando en la cuenca del Papaloapan, así como datos de productividad en dichas áreas y después usando datos económicos analiza la magnitud de dicha huella en esos términos.

Resultados huella hídrica

Los resultados obtenidos de la huella hídrica para las superficies de caña de los ingenios analizados registran valores que van de los 239 m³ t⁻¹ a 328 m³ t⁻¹, una diferencia de 89 m³ t⁻¹, cantidad que es significativa (Figura 1). Para el cálculo de este concepto participan de manera importante el rendimiento de caña por hectárea y la evapotranspiración anual del cultivo. El promedio simple para la superficie estudiada asciende a 274 m³ t⁻¹. Mekonen y Hoekstra (2011) reportan una huella hídrica de 200 m³ t⁻¹ para cultivos azucareros en los que incluyen a la caña de azúcar, mientras que en Hoekstra y Champagne (2006) hacen estimaciones de agua virtual. Para el caso de Tailandia,

Kongboon y Sampattagul (2012), estimaron una huella hídrica total de $202 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, aunque incluyen la huella gris que en este trabajo no se consideró. En la cuenca del Papaloapan, se tienen huellas hídricas más altas, por una mayor evapotranspiración en combinación con rendimientos un poco menores.

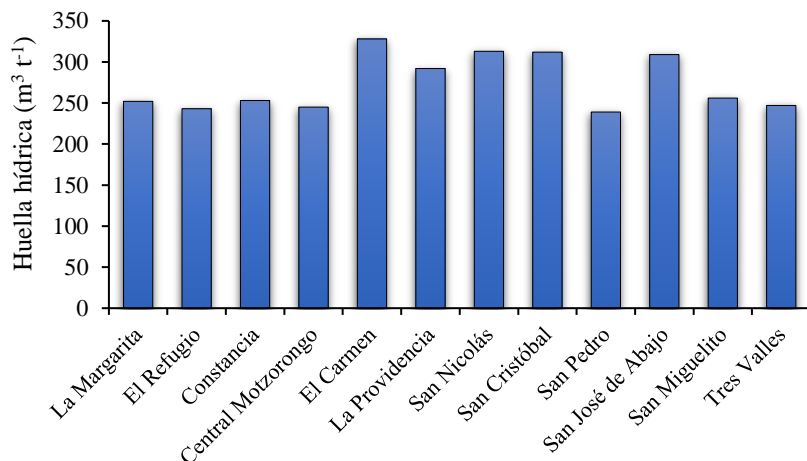


Figura 1. Huella hídrica estimada en la cuenca del Río Papaloapan.

La estimación de la evapotranspiración reporta valores de 1 487 mm y hasta 2 122 mm (Figura 2), lo que combinado con rendimientos bajos repercute en general, en los mayores valores para la huella hídrica. En la (Figura 2) se puede observar que los ingenios que presentan los mayores niveles de evapotranspiración son los que registran los mayores niveles de huella hídrica: El Carmen y San Nicolás.

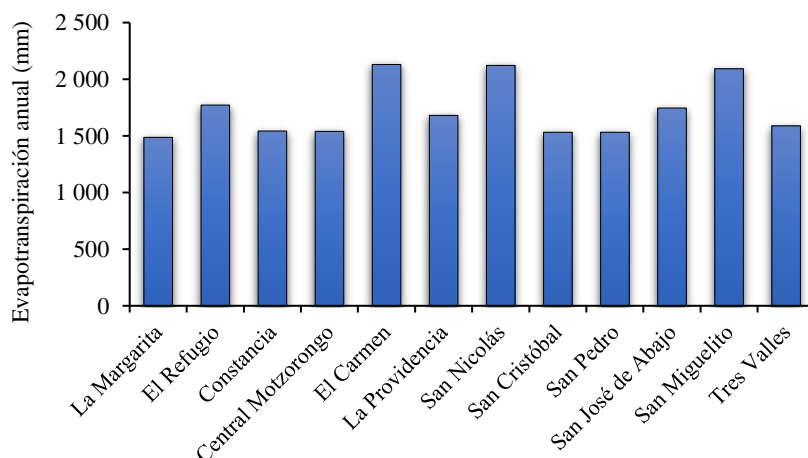


Figura 2. Evapotranspiración.

Huella hídrica en términos económicos

Dada la importancia económica y social de la actividad azucarera, desde mediados del siglo pasado se emitió un decreto, para que las superficies agrícolas en el área de influencia de los ingenios se prohibiera la siembra de cultivos diferentes a la caña de azúcar, con la excepción de actividades

ligadas a prácticas de rotación de cultivos. Después de eso, las diferentes decretos, normas y leyes que se han aprobado para normar la actividad azucarera, han resaltado la declaración de interés público de todas las actividades relacionadas con la industria, desde la siembra hasta la industrialización.

El rendimiento por hectárea es un indicador importante para cualquier cultivo, en el contexto del cálculo de la huella hídrica también tiene un papel relevante. Esta información se presenta en el Cuadro 3, donde se observó que las zonas que abastecen de caña a los ingenios que presentan los mayores rendimientos, también comprenden las menores superficies, por lo que es posible que en ellos se tenga un mayor control del proceso productivo: San Miguelito y el Refugio. Mientras que el ingenio del Carmen con la menor superficie registra un rendimiento intermedio (65 t ha^{-1}).

Cuadro 3. Rendimiento y superficie de caña de azúcar en el área de los ingenios del Papaloapan.

Ingenio	Estado	Caña molida bruta (t)	Superficie (ha)	Rendimiento (t ha^{-1})
La Margarita	Oaxaca	1 123 351	19 077	58.9
El Refugio	Oaxaca	471 423	6 456	73
Constancia	Veracruz	771 752	12 655	61
Central Motzorongo	Veracruz	1 338 219	21 267	62.9
El Carmen	Veracruz	242 071	3 724	65
La Providencia	Veracruz	864 446	15 005	57.6
San Nicolás	Veracruz	1 014 907	14 981	67.7
San Cristóbal	Veracruz	2 646 308	53 825	49.2
San Pedro	Veracruz	1 202 882	18 736	64.2
San José de Abajo	Veracruz	512 984	9 091	56.4
San Miguelito	Veracruz	485 674	5 931	81.9
Tres Valles	Veracruz	2 329 987	36 225	64.3

El primer hallazgo es que hay tres ingenios que superan los $20\,000 \text{ m}^3$ de huella por hectárea, más de $5\,000 \text{ m}^3$ que los que tienen los valores más pequeños (Figura 3). Dado que el agua tiene un valor, que puede en la mayoría de los casos ser expresado en unidades monetarias, eso habla de que se está perdiendo o dejando de usar en este cultivo un recurso valioso. También dice que hay un área de oportunidad para mejorar el manejo del cultivo de caña, usando mejores prácticas de cultivo, como el ahije después de la cosecha para retener humedad, mejorar la fertilización, la realización de control emergente y post emergente de malezas y de plagas como el barrenador o utilizando mejor plántula o semilla para que mejore el rendimiento y así se reduzca la huella hídrica que es una pérdida del agua de la cuenca.

En otros estudios como realizado en una región de jalisco en el que se obtuvo un valor para la huella hídrica de $104.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, bajo condiciones de estrés hídrico, muestran una gran diferencia (Shao y Halpin, 1995; Haro *et al.*, 2014). Por lo general las explicaciones económicas que tienen que ver con los insumos agrícolas, una vez seleccionada la tecnología a usar en la producción, se refieren a las distintas cantidades del insumo en cuestión que resultan óptimas tanto desde el punto de vista técnico, como desde el punto de vista económico; es decir, cuánto se recomienda usar del

insumo en cuestión para que económicamente resulte ventajoso. Si el productor no cuenta con los recursos económicos que permitan adquirir la cantidad de insumo recomendado, esa información permite conocer el aporte en unidades monetarias de la última unidad aplicada del insumo variable en cuestión; es decir, el valor de la productividad marginal del insumo.

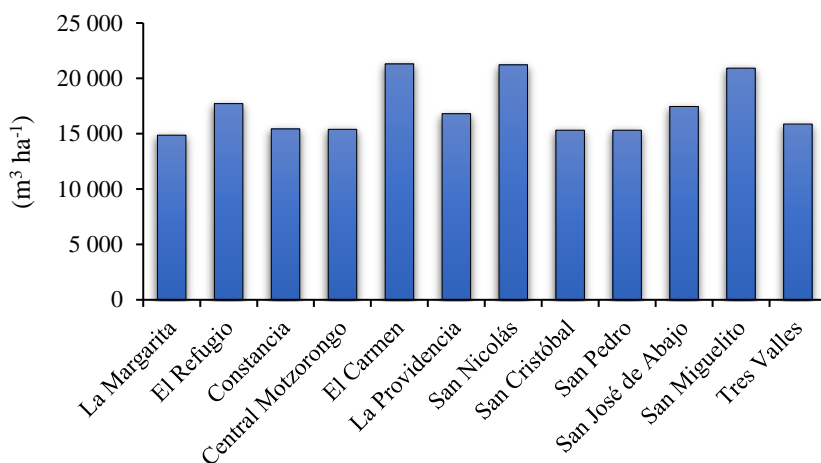


Figura 3. Huella hídrica por hectárea.

En el caso de la huella hídrica, se habla del valor expresado en unidades monetarias, de unidades de un recurso que se pierden en el proceso, no lo que aporta, la huella hídrica es una cantidad de agua por tonelada de caña de azúcar que se pierde de la cuenca y que no estará disponible más, para ese cultivo o para otro. Con relación al ingreso por tonelada de caña por m³ de huella, los mayores valores se tienen para la Margarita, San Cristóbal, San Pedro y la Constanacia (Figura 4).

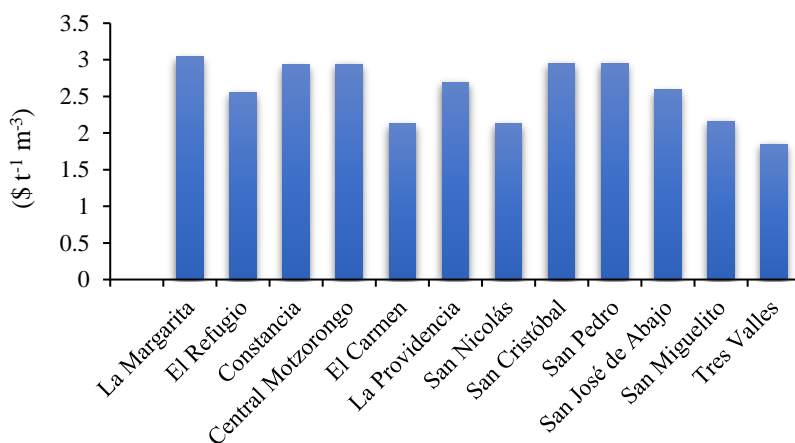


Figura 4. Estimación monetaria de la huella hídrica por tonelada.

También se calculó esta magnitud para el caso del valor de la producción, mismo que esta expresado por hectárea. Se observa que cuando la huella hídrica por hectárea se expresa con respecto al valor de la producción que se tienen en San Cristóbal y Tres Valles los mayores valores (Figura 5). En el estudio no se calculó el valor del agua, tampoco su productividad marginal, pero puede observarse que el concepto de huella hídrica constituye un indicador que puede dar

información con respecto a la manera en que se está utilizando el recurso hídrico de la cuenca y de la necesidad de mejorar el manejo de este o tal vez de la utilización del recurso en otros cultivos o actividades económicas. La información presentada en la Figura 5, corresponde al valor monetario de la salida del agua de cuenca en cada zona productora de caña de azúcar por hectárea.

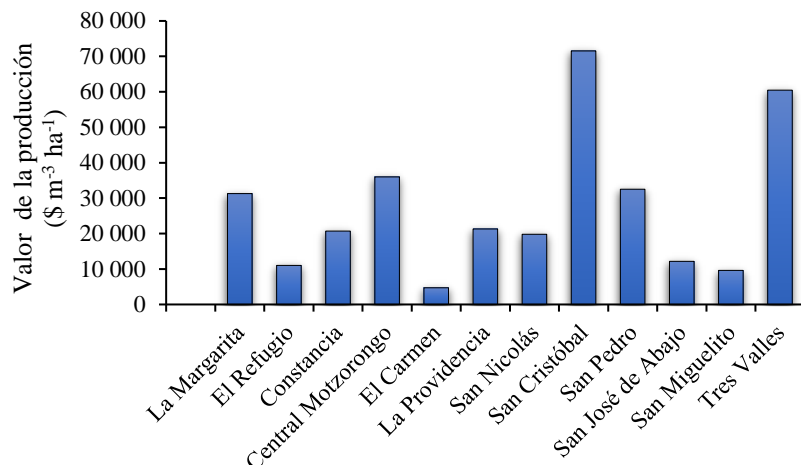


Figura 51. Estimación monetaria de la huella hídrica por hectárea.

Conclusiones

La huella hídrica de la caña de azúcar es mayor en comparación con otros cultivos del país para los que se tienen datos. En la zona se registran variaciones importantes con una diferencia de 89 m³ t⁻¹, entre el valor mínimo y el máximo, lo que habla de un área de oportunidad. La huella hídrica de la caña de azúcar cultivada en las áreas que abastecen a los ingenios ubicados en esta cuenca se explica en mayor medida por la evapotranspiración y por el rendimiento. entonces el incremento de la productividad abre la posibilidad para reducir este indicador.

Entre las actividades culturales que se pueden mejorar están: el ahije después de la cosecha para retener humedad, mejorar la fertilización, la realización de control emergente y post emergente de malezas y de plagas como el barrenador. Con respecto a la huella hídrica en la zona, se concluye que los ingenios con mayores superficies tienen menor control de los procesos de producción, lo cual se refleja en los rendimientos. Para este caso se puede decir que hay deseconomías a escala.

Literatura citada

- AgroDer. 2012. Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer. DF, México.
- CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). 2020. Base de datos climatológica nacional (sistema CLICOM). <http://clicom-mex.cicese.mx>.
- Ercin, A. E. and Hoeskstra, A. Y. 2014. Water footprint scenarios for 2050: a global analysis. *Environment International*. 64:71-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>.
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie de Riego y Drenaje FAO No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 322 p.

- FAO. 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe Sobre Temas Hídricos No. 38. 97 p. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>.
- Gerbens-Leens, P. W. Van Lienden, A. R.; Hoekstra, A. Y. and Van der Meer, T. H. 2012. Biofuel scenarios in a water perspective: the global blue and green water footprint of road transport in 2030. *Global Environmental Change*. 22:764-775. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.04.001>.
- Haro, M. E.; Navarro, I.; Thompson, R. and Jiménez, B. 2014. Estimation of the water footprint of sugarcane in Mexico is ethanol production an environmentally feasible fuel option? *J. Water Climate Change*. 05.1:70-85. doi:102166/wcc.2013.056.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A. K. 2006. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manage*. Doi:10.1007/s11269-006-9039-x.
- Hoekstra, A. Y.; Champagain, A. K.; Aldaya, M. M. and Mekonnen, M. M. 2011. The water footprint assessment manual. Setting the Global Estándar. Water Footprint Network. 228 p.
- Jorrat, M.; Araujo, P. and Mele, F. 2018. Sugarcane water footprint in the province of Tucuman, Argentina. Comparison between different management practices. *J. Cleaner Produc*. 188:521-529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.242>.
- Kongboon, R. and Sampattagul, S. 2012. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. *Social and Behavioral Sciences*. 40:451-460. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.215>.
- Lamastra, L.; Alina, N.; Novelli, E. and Trevisan, M. 2014. A new approach to assessing the water footprint of wine: an Italian case study. *Science of the total Environment*. 490:48-756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.063>.
- Lins, R.; Maciel, A.; Toribio, B.; Paes, M. and Siqueira, J. 2019. Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. *J. Cleaner Produc*. 234:925-932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.282>.
- Navarrete, M. C. 2016. Impacto ambiental y económico debido a la huella hídrica y de carbono del sistema bobino de engorda en la Comarca Lagunera, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo. Estado de México.
- Raes, D. 2012. The ETo calculator. Evapotranspiration from a reference surface. Reference manual. Version 3.2. Rome. 38 p.
- SEMARNAT. 2014. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. DF, México. 139 p.
- Shao, G. and Halpin, P. N. 1995. Climatic controls of eastern north American coastal tree and shrub distributions. *USA. J. Biogeogr*. 22(6):1083-1089.
- Schyns, J. F. and Hoekstra, A. Y. 2014. The water footprint in Morocco: the added value of water footprint assessment for national water policy, value of water research report series No. 67, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. 106 p.
- WMO (World Meteorological Organization-Geneva, CH). 1992. International conference on water and the environment: development issues for the 21st century, Dublin, Ireland: the Dublin statement and report of the conference. 64 p. <https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>.
- Zhuo, L.; Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2016. Water footprint and virtual water trade of China: past and future, value of water research report series No. 69. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. 70 p.