



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Investigación en Cambio Climático

Edificio de Programas Universitarios, Planta Alta, Circuito de la Investigación Científica s/n

Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, C. P. 04510, México, D.F.

Tel.: (55) 5622 5219, Fax: (55) 5622 5221



EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y LOS COSTOS ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS PARA LA MANUFACTURA DE BIOCOMBUSTIBLES

INFORME FINAL

Dra. Blanca Jiménez

M. en C. Inés Navarro

M. en I. María Eugenia Haro

M. en I. Ralph Thompson

Grupo de Investigación: Reúso y Tratamiento
Instituto de Ingeniería, UNAM



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

SEPTIEMBRE 2012

INDICE

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y EL CONSUMO DE AGUA	2
3. HUELLA HÍDRICA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES	5
3.1 Estimación de la Huella Hídrica	8
3.2 Estimación de la Evapotranspiración de Referencia (ET_0)	9
4. REGIONES CAÑERAS EN MÉXICO Y LA DISPONIBILIDAD DE AGUA	12
5. ESTUDIO DE CASO: INGENIO TAMAZULA	16
5.1 Descripción del Sitio de Estudio	16
5.2 Resultados: Consumo de Agua para Producir Bioetanol	19
5.3 Estimación del Consumo de Agua para Escenarios de Cambio Climático	22
5.4 Discusión: Impacto en el Recurso Hídrico	23
6. REFLEXIÓN FINAL	25
REFERENCIAS	27

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación mundial por el cambio climático, sumado al aumento de la demanda de energía y la volatilidad de los precios del petróleo, han llevado a buscar fuentes alternativas de energía que sean a la vez económicamente eficientes y ambientalmente sustentables (PNUMA, 2009). A nivel mundial, aproximadamente el 80% de la energía consumida proviene de fuentes no renovables (Becerra, 2006). Ello es la causa de que los recursos fósiles se estén agotando aceleradamente, siendo su tasa de disminución cada vez mayor. Además, es importante mencionar que su uso produce dióxido de carbono durante la combustión el cual es uno de los compuestos responsables del efecto invernadero. Los gases de efecto invernadero reflejan la radiación infrarroja hacia la superficie de la Tierra, incrementando su temperatura. Lo anterior se conoce como calentamiento global de origen antropogénico y está asociado con el cambio climático.

El sector del transporte, en particular, consume cerca de 30% de la energía producida a nivel mundial. Ello representa 83.7 millones de barriles de petróleo al día y las estimaciones indican que esta cifra aumentará hasta los 112 millones de barriles diarios para 2020 (Castillo, 2009). Por ello, desde hace algunos años, distintas naciones buscan fuentes alternas de energía. Dentro de estas nuevas fuentes de energía, los biocombustibles han atraído atención a nivel mundial por ser una alternativa que ya se encuentra disponible y que a la vez permitiría el abastecimiento del sistema de transporte, contribuiría a mitigar el cambio climático, y promovería el desarrollo de las áreas rurales.

Los tipos de biocombustibles básicos, conocidos como de primera generación, son el bioetanol y biodiesel producidos a partir de cultivos comerciales. El etanol se produce a partir de azúcares y almidones, los cuales se extraen de biomasa de cultivos como el maíz, la caña de azúcar, yuca, sorgo y remolacha azucarera. El biodiesel se elabora a partir de aceites vegetales que se extraen de plantas oleaginosas como la palma, así como de grasas animales, aceites y grasas recicladas.

Las ventajas del uso de los biocombustibles en el transporte para la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (principalmente CO₂) y para reducir el alto consumo de combustibles fósiles, como parte de una estrategia de seguridad energética, han sido ampliamente documentadas. Los estudios disponibles hasta ahora, se han enfocado en su mayoría al balance neto de energía o en el impacto en el efecto invernadero neto. Sin embargo, desde el punto de vista de una estrategia de seguridad hídrica, los estudios aún muestran limitaciones en el conocimiento y discusión sobre el impacto de la producción de biocombustibles y la crisis del agua en muchas naciones.

En este sentido, los resultados de la investigación que se reporta y que forma parte del proyecto interdisciplinario "***Biocombustibles en México: una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y para la mitigación de los gases efecto invernadero***", busca contribuir al conocimiento y análisis de los posibles efectos en el recurso agua, en el contexto de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, en un país como México con baja disponibilidad de agua. Sin olvidar que a causa del impacto del cambio climático, esta disponibilidad se verá afectada así como en la

demanda de la misma (Bates *et al.*, 2008). Debido a ello, es crítico calcular el consumo de agua (huella hídrica) para la producción de biocombustibles en el momento actual y futuro con escenarios de cambio climático.

En la presente investigación se estimó la huella hídrica (consumo de agua de los recursos de agua superficial y subterránea) para la producción de etanol a partir de caña de azúcar, en particular para un ingenio azucarero ubicado en Tamazula, Jalisco, para evaluar el impacto en la disponibilidad futura de agua bajo diversos escenarios de cambio climático.

2. LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y EL CONSUMO DE AGUA

La producción de etanol combustible a partir de diversos cultivos ha crecido significativamente en los últimos años. Para 2007 se reportó una producción mundial total de 39 mil millones de litros (REN21, 2008), con una producción de los principales productores de etanol combustible en el mundo de 18.3 mil millones de litros en EUA y en Brasil de 17.5 mil millones de litros. Para el año 2011, la producción total se incrementó a 84.360 mil millones de litros (Maluenda, 2011), aproximadamente, con 21.637 mil millones en Brasil y 54.765 mil millones de litros en EUA (GRFA, 2011); la Unión Europea contribuyó con 4.429 mil millones de litros. En Europa Occidental, el etanol se produce en menor escala a partir de remolacha y trigo con un costo mayor, dos a cuatro veces más, que el costo del etanol brasileño (SENER, 2010).

Las diferencias entre los dos principales productores de bioetanol para el transporte, EUA y Brasil, además de producirlo a partir de maíz y caña de azúcar, respectivamente, Brasil tiene más plantas en operación (335 vs 97), rendimientos más altos (66.2 ton/ha vs 8.4 ton/ha) y mayor productividad (6,880 L/ha vs 3,000 L/ha). En 2006, Brasil destinó solo 1% de su área cultivable para producir etanol, mientras que Estados Unidos destinó un 3.7% del total de las tierras cultivables; además, el mayor porcentaje de la producción brasileña se destina para el transporte (40% vs 3.8%) y con menores costos de producción (0.22 dls/L vs 0.40 dls/L) (Jank *et al.*, 2007; Goettemoeller & Goettemoeller, 2007).

Esos datos ejemplifican que la estrategia actual de desarrollo de los biocombustibles se enfoca a una intensa explotación de monocultivos de granos comerciales como la caña de azúcar y el maíz. De hecho, uno de los argumentos que han apoyado el rápido crecimiento del sector de biocombustibles es que son una alternativa de energía renovable a la dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, los biocombustibles no son estrictamente renovables como lo son las fuentes de energía solar o eólica, ya que dependen para su producción de recursos finitos, en cantidad y calidad apta de tierra y agua. Además, la práctica agrícola del monocultivo lleva asociada el uso intensivo de pesticidas, fertilizantes y el uso de agua. De manera que el acelerado crecimiento de la producción de biocombustibles no sólo sugiere la posibilidad de futuros conflictos en la competencia por el uso de la tierra y el agua, sino que hay disponibles algunos estudios que analizan estos posibles eventos.

En este sentido, el estudio de Fresco (2007) discute principalmente el dilema entre la producción de biomasa para obtener alimentos o biocombustibles, sin embargo aborda brevemente las implicaciones en el recurso agua. No obstante, en otros estudios se reporta que actualmente la producción agrícola de biomasa para la alimentación requiere de cerca del 86% del agua dulce empleada a nivel mundial (Hoekstra, 2007). En muchas partes del mundo, este uso compite ya fuertemente con otros usos, como el abastecimiento urbano o el industrial. Un aumento en la demanda de agua para generar alimentos en combinación con un cambio de la energía fósil a energía de biomasa ejercerá una presión adicional sobre el recurso agua. Basado en esto, las Naciones Unidas señalan que para el año 2050 habrá motivos de preocupación por la falta de agua en varios países y regiones con recursos hídricos limitados (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009), y que esta situación se puede agravar a causa del uso de biocombustibles.

De acuerdo con un estudio reciente de la CEPAL (Saulino, 2011) el aumento en la producción de biocombustibles requerirá incrementar considerablemente la cantidad de biomasa producida a través de la intensificación del uso de la tierra y la expansión de las áreas cultivadas, y advierte que estos cambios en el uso de la tierra pueden tener un impacto significativo en los recursos hídricos. En ese estudio se señala que la producción de biocombustibles a base de cultivos bajo riego requiere mayores volúmenes de agua en comparación con la agricultura de temporal, cuya influencia en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel local y regional es normalmente mucho menor. Por ello recomienda que debiera evaluarse a nivel local, regional y de cuencas las diferencias en la demanda y productividad del agua entre las distintas combinaciones de cultivo, región geográfica y la tecnología utilizada en la producción de biocombustibles.

Sin embargo, en pocos estudios (Varghese, 2007; Hughes et al, 2007) se documentan los impactos por la producción de los biocombustibles en la disponibilidad de agua a nivel local o regional. Un ejemplo es el estudio realizado por la FAO para evaluar la viabilidad de la producción de biocombustibles en una región andina del Perú (Ramos, 2010); estudios similares se han realizado en Tailandia y Tanzania (Felix & Rosell, 2010).

En EUA se han realizado estudios para estimar las necesidades de agua para la producción primaria de energía, incluyendo estimaciones para carbón, petróleo, gas y biomasa (Elcock, 2008) e identifican a los biocombustibles como los mayores consumidores de agua dentro del sector energético. Efectivamente, varios estudios se han realizado sobre el impacto de la producción de etanol a partir del cultivo de maíz en EUA donde analizan los posibles efectos por la expansión de la producción de biocombustibles y la reducción en el agua disponible (Roberts et al, 2007; NRC, 2008). Un caso se refiere a la sobreexplotación del acuífero de Ogallala, identificado como uno de los más grandes del mundo; este acuífero es la fuente de suministro de la agricultura de riego en las grandes planicies del sur de EUA. En las zonas donde se ha observado la mayor reducción en el nivel freático operan 5 plantas con una producción anual de 71.5 millones de galones de etanol y están en construcción 9 más con una capacidad anual de 639 millones de galones. Se estima que las nuevas plantas demandarán anualmente un volumen de agua equivalente a 2.6 billones de galones y si se incrementa la extensión de

riego para la producción de maíz, se podrá incrementar la demanda entre 59 y 210 billones de galones por año, agravando aún más el actual nivel de estrés hídrico en la región (Roberts et al, 2007).

Otro estudio realizado en EUA reporta que la mayoría de la producción de maíz para la producción de bioetanol se realiza bajo riego y el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento (Chiu et al., 2009). Los resultados reportados del consumo de agua presentan una gran variabilidad ya que hay sitios donde equivale a 5 L/L etanol con un consumo máximo de 2,138 L/L etanol. El estudio muestra que la mayor demanda de agua en 2007 corresponde al agua para riego; por ejemplo, en el estado de Iowa, se consume en promedio 17,288 millones de litros de agua para riego y 24,745 millones de litros en el proceso para obtener etanol; en el estado de Minnesota la demanda para riego es de 34,589 millones de litros anuales, mientras que en el proceso se emplean 8,286 millones de litros; en California la demanda para riego se incrementa hasta 549,240 millones de litros de agua, mientras que en el proceso se emplean solo 929 millones de litros. Estos datos ejemplifican la variabilidad regional que no se consideró en otros estudios previos que reportaban un uso entre 263 y 784 litros de agua por cada litro de etanol (Pimentel, 2003; de Fraiture et al, 2008; NRC, 2008). Por ello es importante señalar que los requerimientos de agua dependen de la región, las condiciones climáticas, la variedad de maíz y la eficiencia en las destilerías.

En el caso de Brasil, segundo productor de bioetanol a partir de caña de azúcar, la producción ha sido tradicionalmente de temporal para la cual se estima que el consumo de agua de lluvia varía entre 1,500 – 2,500 mm/año. Sin embargo, Moreira (2007) reporta que está presente la tendencia a abrir campos de cultivo en zonas de riego. En general se reconoce que hay un uso eficiente de agua, tanto en la producción de caña como en las destilerías o ingenios donde se procesa la melaza para producir etanol y tiene un consumo promedio de agua de 21 m³ por tonelada de caña.

Las evidencias hasta aquí presentadas conducen a explicar cómo se usa el agua y principalmente a cómo estimar el volumen empleado en toda la cadena de producción de los biocombustibles. La producción de biocombustibles requiere del uso de agua en dos etapas primordiales: en el crecimiento de las materias primas en los campos agrícolas y en el proceso de producción industrial de los biocombustibles. Si se considera solamente el uso del agua en los ingenios o destilerías, donde se procesa la materia prima para obtener los biocombustibles, la producción de biocombustibles da la impresión de tener un impacto mínimo sobre el consumo de agua, especialmente cuando se les compara con las plantas convencionales de producción de derivados del petróleo (Gleick, 2000). Sin embargo, la situación cambia cuando se estima el total de agua usada por galón de etanol producido ya que el mayor consumo está asociado a la demanda para la producción de la materia prima.

El consumo de agua en la producción agrícola de la materia prima varía de acuerdo a si la selección de las zonas de cultivo corresponde a: a) conversión de la vegetación natural local a zona agrícola, b) aumento de las prácticas actuales de producción del cultivo seleccionado, c) introducción de cultivos diferentes en suelo agrícola existente, o d) en el

uso de la vegetación natural existente como materia prima. A esta variable que corresponde al tipo de uso del suelo previo, se suman otros factores importantes que influyen en la variación del volumen de agua necesario para la producción de la materia prima, tales como: el tipo y método de cultivo, las características agroclimáticas específicas, la evapotranspiración en los diferentes estadios del crecimiento del cultivo y la demanda de agua para irrigación. Este último puede ser un factor relevante en aquellas zonas donde se cuente con poca agua disponible y en donde los sistemas de riego operen con bajas eficiencias.

Con respecto a la etapa de la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar en los ingenios, esta consiste de tres fases: extracción de la melaza, fermentación y destilación. De la caña de azúcar se extrae la melaza, que contiene entre 35% y 40% de azúcares, para luego ser diluida y combinada con levaduras. Con la fermentación de dicha solución se genera dióxido de carbono y licor fermentado (técnicamente denominado mieles); este último, que sólo contiene 10% de alcohol, se somete a una serie de destilaciones sucesivas con el fin de obtener un alcohol de mayor pureza. En estos procesos, se presenta un elevado consumo de agua principalmente en el lavado de la caña tan pronto llega de los campos de cultivo, así como en la generación de vapor para las diferentes etapas del proceso.

3. HUELLA HÍDRICA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

El concepto para evaluar los requerimientos de agua para la producción de un producto se conoce como la huella hídrica (Hoekstra & Hung, 2002; Hoekstra & Chapagain, 2007); ésta se define como el volumen total de agua usado para la producción de bienes y servicios. A partir del año 2002 el profesor holandés Arjen Y. Hoekstra (Hoekstra & Hung, 2002) desarrolla el concepto de huella hídrica. La huella hídrica puede estimarse en términos de la fuente de agua y se identifican como la huella hídrica azul, verde o gris.

La huella de agua azul es el volumen de agua dulce consumida de los recursos hídricos disponibles del planeta (agua superficial y/o subterránea) la cual corresponde a estimar la empleada a través de algún sistema de irrigación. La huella del agua verde es el volumen de lluvia almacenada en el suelo como humedad que corresponde al aprovechamiento de agua en las plantaciones de temporal. La huella de agua gris se refiere al volumen de agua que se requiere para asimilar la carga de contaminantes que rebasan las concentraciones naturales del lugar y las normas de calidad del agua establecidas (Hoekstra et al., 2009).

Actualmente es posible encontrar entre la bibliografía internacional relacionada al tema, estudios que aplican el concepto de la huella hídrica. Por ejemplo, Van Meekeren (2008) analizó la huella hídrica de los biocombustibles con el objeto de cuantificar la relación entre el agua dulce y los biocombustibles. Hoekstra & Chapagain (2008) identifican la estrecha relación que la globalización impone entre el manejo de agua y el comercio internacional a partir del análisis del uso del recurso hídrico a nivel de países. Mekonnen

& Hoekstra (2010) estimaron la huella hídrica de varios cultivos (trigo, maíz, arroz, manzana, soya, caña de azúcar, café y algodón) con base en datos de producción del periodo 1996-2005; encontraron que el cultivo de trigo, arroz y maíz requieren de un volumen mayor de agua para su crecimiento que el cultivo de la caña de azúcar (Fig. 3.1). Además estimaron la huella hídrica global bajo condiciones de riego y de temporal; la Tabla 3.1 muestra sus resultados para los principales cultivos que se producen bajo riego y se observa que la demanda de riego para la caña de azúcar es menor al 50% de la requerida para el cultivo de maíz.

Tabla 3.1 Huella hídrica de diferentes cultivos bajo riego

Cultivo	Huella hídrica azul (m ³ /ton)
Caña de azúcar	104
Maíz	294
Arroz	464
Trigo	926
Algodón	2227

(Fuente: Mekonnen y Hoekstra, 2010)



Figura 3.1 Contribución de varios cultivos a la huella hídrica (Elaborado con datos de Mekonnen & Hoekstra, 2010)

En el estudio realizado por Gerbens-Leenes et al. (2009) se analizó la huella hídrica de 13 cultivos: cebada, yuca, maíz, papa, colza, arroz, centeno, sorgo, soya, remolacha azucarera, caña de azúcar, trigo y jatropha. Éstos en conjunto representan el 80% de la producción a nivel mundial, siendo la más importante la de caña de azúcar con 1,258 millones de ton/año, seguida por el maíz, trigo y arroz con cerca de 600 millones de ton/año cada uno. El estudio incluye estimaciones del consumo total de agua en la producción de biocombustibles y reportan que la huella hídrica del bioetanol es menor que la del biodiesel (29.7 kJoule/g y 37.7 7 kJoule/g, respectivamente). Asimismo, identifican que la huella hídrica de los biocombustibles muestra una gran variación que depende de tres factores: el cultivo utilizado, el clima del lugar de producción y la práctica agrícola. Además concluyen que la huella hídrica de los biocombustibles es muy grande en comparación con otras formas de generar energía, lo cual confirma lo reportado en otros estudios.

En otro estudio, Gerbens-Leenes et al (2009a) también estiman la huella hídrica total de los principales países productores de caña de azúcar en el mundo (Fig. 3.2), independientemente de si parte de esa producción se emplea para producir biocombustibles.

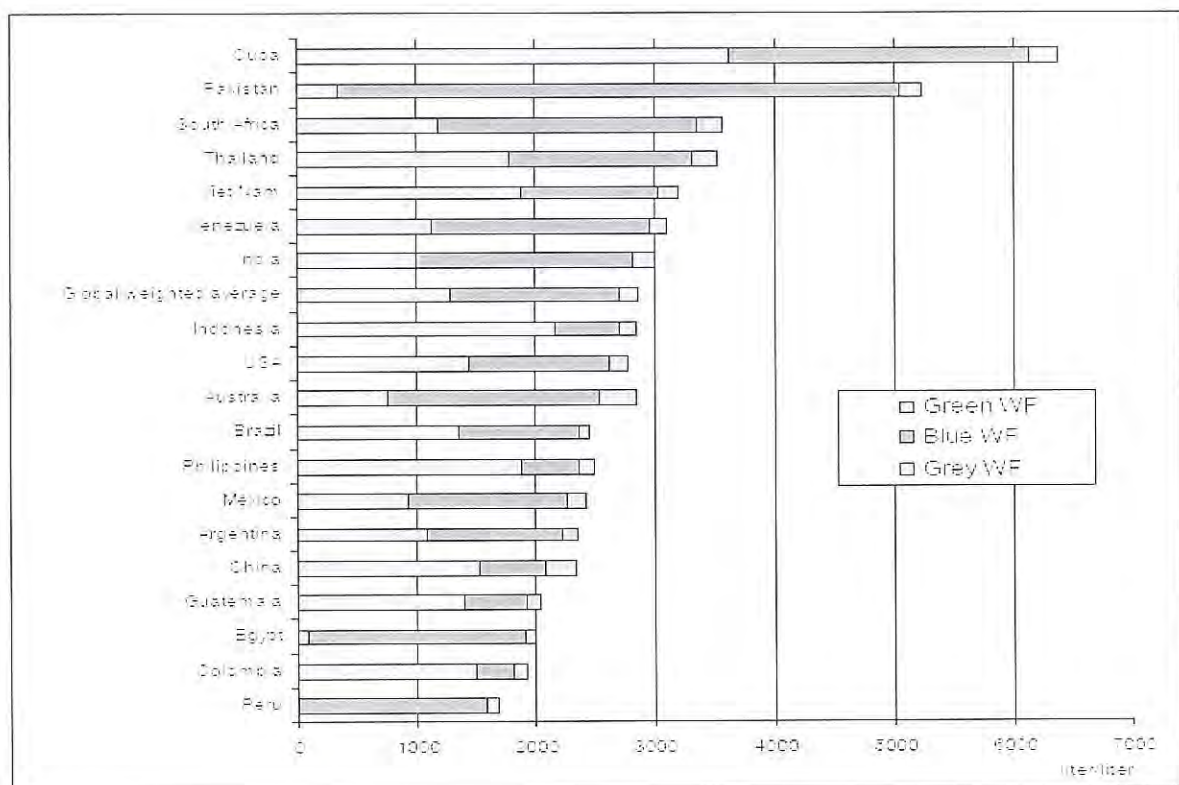


Figura 3.2 Huella hídrica del etanol de caña de azúcar en los principales países productores (Fuente: Gerbens-Leenes et al., 2009a)

3.1 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

La metodología propuesta por Hoekstra et al (2009) y formalmente compilada en un manual, comprende la estimación de la huella hídrica del proceso completo de crecimiento de un cultivo (HH en m³/ton). Este procedimiento, para el cálculo de la huella hídrica, se basa en estimar la cantidad de agua que se requiere para el crecimiento de un cultivo (CWU en m³/ha) dividido entre el rendimiento del cultivo (Y en ton/ha) (Ecuación 1). El volumen de agua que requiere el cultivo para su crecimiento (CWU) se calcula a partir de la estimación de la evapotranspiración (ET en mm) desde el primer día de la siembra hasta el día de la cosecha, considerando las condiciones agroclimáticas del sitio en estudio (Ecuación 2). Esta evapotranspiración diaria (ET) se calcula a partir de la estimación de la evapotranspiración de referencia del cultivo (ET₀ en mm), multiplicada por el factor del cultivo (K_c) para las diferentes etapas de su ciclo de crecimiento (Brouwer & Heibloem, 1986); el parámetro K_c representa características tales como la altura del cultivo, la cobertura del suelo y el albedo, aspectos que distinguen a un cultivo de la superficie agrícola del sitio en estudio (Allen et al, 1998).

$$HH = \frac{CWU}{Y} \dots\dots\dots [1]$$

$$CWU = 10 \sum_{d=1}^{1,99} ET \dots\dots\dots [2]$$

La componente más importante en la estimación de la huella hídrica de cualquier cultivo es la evapotranspiración de referencia diaria, tanto en términos del peso que tiene en el volumen de agua estimado, como en la información de datos agroclimáticos específicos al sitio en estudio que se requieren para su cuantificación. Esto se debe a que la evapotranspiración es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. La evaporación es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Incluye tanto la evaporación de agua directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas. La transpiración es el agua absorbida por medio de las raíces, que se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de las estomas en las hojas. Por tanto, la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde una superficie vegetal a la atmósfera (Domingo et al., 2002).

Cabe señalar, que la mayoría de los estudios que estiman la huella hídrica de los biocombustibles utilizan el método de Hoekstra et al (2009), expuesto aquí brevemente.

En algunos estudios se utiliza otro enfoque, como el que presentan Fingerman et al. (2010), quienes estiman el impacto en el recurso agua a partir del cálculo de la evapotranspiración de varios cultivos y la incorporan al análisis del ciclo de vida del consumo de agua del etanol. Además, en todos los estudios revisados para esta investigación se observó que al evaluar la huella hídrica para los biocombustibles, los autores calcularon la evapotranspiración de referencia de los cultivos (ET_0) con base en el método de Pennman-Monteith (Allen et al, 1998) recomendado por la FAO. La estimación de la evapotranspiración por este método permite caracterizar los efectos climáticos específicos del sitio de estudio ya que se calcula considerando parámetros como temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

Por ello, en el estudio de caso para México que se detalla en las siguientes secciones, se aplicó la metodología de Hoekstra et al (2009) y el método de Pennman-Monteith (Allen et al, 1998) para las condiciones de producción que se presentaron durante la zafra 2010-2011; la huella hídrica estimada se compara posteriormente con la estimada para escenarios futuros con cambio climático, siguiendo los mismos procedimientos. Para poner en contexto el sitio de estudio seleccionado y los resultados obtenidos, se parte con una breve descripción de la producción cañera en el país y una rápida visión de la disponibilidad de agua.

3.2 ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_0)

El método de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración se aplica considerando una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme en activo crecimiento que cubre completamente el suelo y que permanece en óptimas condiciones de humedad de suelo. Además considera los siguientes parámetros fijos: una altura de 0.12 m, una rugosidad de la cubierta vegetal que se opone a la transferencia de vapor (Z_{oh}) igual al 10% de la rugosidad que opone la cubierta vegetal al movimiento del viento (Z_{om}), una altura del plano de referencia aerodinámico (d) igual a 0.08 m, una resistencia de la cubierta vegetal (r_{cv}) de 70 s/m y un albedo igual a 0.23. De acuerdo con la FAO (2006), la evapotranspiración (Ecuación 3) se estima como

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right] \quad [3]$$

Donde:

ET_0 : evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})

λ : calor latente de vaporización (MJ kg^{-1})

Δ : pendiente de la curva que relaciona presión de vapor con temperatura aire ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G : flujo térmico del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$)

ρ_a : densidad del aire seco a presión constante (kg m^{-3})

c_p : calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

$(e_s - e_a)$: déficit de presión de vapor (kPa)

γ : constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

r_s y r_a : resistencia superficial del cultivo de referencia y aerodinámica (s m⁻¹)

Para calcular la resistencia aerodinámica (r_a), densidad del aire seco a presión constante (ρ_a), el calor específico del aire (c_p), el calor latente de vaporización (λ), la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire (Δ), la radiación neta en la superficie del cultivo (R_n), la presión de vapor actual (e_a), la radiación solar para un día sin nubes (R_{s0}) y el flujo térmico del suelo (G), se usan las Ecuaciones 4 a 17 y el valor de las constantes se presentan en la Tabla 3.2.

Considerando que la superficie donde se ubica la estación agroclimática contiene una cubierta de gramíneas de 12 cm de altura y que los sensores de medida de la velocidad del viento, humedad y temperatura están colocados a 2 m de altura, la resistencia aerodinámica toma el siguiente valor:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad [4]$$

Donde u_2 es la velocidad del viento medida a 2 m de altura. Para estimar la densidad del aire seco a presión constante (ρ_a):

$$\rho_a = \frac{P}{T_{kv}R} \quad [5]$$

Donde P es presión atmosférica (kPa), T_{kv} : temperatura en Kelvin y R : constante específica del gas. El calor específico del aire (c_p) se estima como

$$c_p = \frac{\gamma\epsilon\lambda}{P} \quad [6]$$

Donde γ : constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); ϵ : relación entre el peso molecular del aire húmedo y el aire seco; su valor es 0,622. λ es calor latente de evaporación (MJ kg⁻¹) que se calcula con

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3})T \quad [7]$$

Donde T es la temperatura promedio del aire (°C). La ecuación para estimar la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire (Δ) es la siguiente:

$$\Delta = \frac{4098[e^0(T)]}{(T+237.3)^2} \quad [8]$$

Donde la variable $e^0(T)$: es la presión de vapor en saturación a temperatura del aire, cuyo valor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$e^0 = 0.6108 \frac{(17.27 T)}{T+273.3} \quad [9]$$

La radiación neta en la superficie del cultivo (R_n) se estima con las Ecuaciones 10 a 12:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [10]$$

R_{ns} : Radiación neta onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y R_{nl} : Radiación neta onda larga ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s \quad [11]$$

Con α : albedo y R_s : Radiación solar global diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\text{máx}}[\text{°K}] + T_{\text{mín}}[\text{°K}]}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35) \quad [12]$$

Con σ : constante de Stefan-Boltzmann ($\text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$). $T_{\text{máx}}$, K: temperatura máxima del día ($\text{K} = \text{°C} + 273,16$). $T_{\text{mín}}$, K: temperatura mínima del día ($\text{K} = \text{°C} + 273,16$). R_s : radiación solar diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$) y R_{s0} : radiación solar para un día sin nubes ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$), y la presión de vapor actual e_a (kPa) se estima como

$$e_a = \frac{e^0(T_{\text{máx}}) \frac{Hr_{\text{mín}}}{100} + e^0(T_{\text{mín}}) \frac{Hr_{\text{máx}}}{100}}{2} \quad [13]$$

Donde $Hr_{\text{mín}}$: humedad relativa mínima diaria (%), la $Hr_{\text{máx}}$: humedad relativa máxima diaria (%), $e^0(T_{\text{máx}})$: presión de vapor de saturación a temperatura máxima (kPa), y $e^0(T_{\text{mín}})$: presión de vapor de saturación a temperatura mínima (kPa), siendo

$$e^0(T_{\text{máx}}) = 0.6108 \frac{17.27 T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 273.3} \quad [14]$$

$$e^0(T_{\text{mín}}) = 0.6108 \frac{17.27 T_{\text{máx}}}{T_{\text{mín}} + 273.3} \quad [15]$$

La radiación solar para un día sin nubes (R_{s0}) y el flujo térmico del suelo (G) se estiman con las expresiones siguientes:

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad [16]$$

$$G = 0.1(T_i - T_{i-1}) \quad [17]$$

Con z : altura sobre el nivel del mar en que se encuentra la estación (m). R_a : radiación extraterrestre para periodos diarios ($\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$). T_i : temperatura promedio del aire del día actual (°C) y T_{i-1} : temperatura promedio del aire del día anterior (°C).

Los valores que se utilizaron para realizar los cálculos anteriores para el estudio de caso de esta investigación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Valores utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en el estudio de caso Tamazula

Símbolo	Nombre	Unidades	Valores
Y	Rendimiento del cultivo	ton/ha	110
λ	Calor latente de vaporización	MJ/kg	Min=2 max=3 μ =2
Δ	Pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire	Kpa/°C	Min=0.009 max=0.05 μ =0.03
R_n	Radiación neta en la superficie del cultivo	MJ/m ² d	Min=15 max=23 μ =20
G	Flujo térmico del suelo	MJ/m ² d	Min=-2 max=2 μ =-0.0014
ρ_a	Densidad del aire seco a presión constante	Kg/m ³	Min=1 max=1 μ =1
c_p	Calor específico del aire	MJ/kg°C	Min=0.0009 max=0.001 μ =0.001
γ^*	Constante psicrométrica	KPa/°C	0.058
r_s^*	Resistencia superficial del cultivo de referencia	s/m	70
r_a	Resistencia aerodinámica	KPa/°C	Min=58 max=1228 μ =210
u_2	Velocidad del viento	m/s	Min=0 max=3 μ =1
T	Temperatura promedio	°C/d	Min=13 max=25 μ =19
z	Altura sobre el nivel del mar	m	1152

Fuente: FAO, 2006

La evapotranspiración de referencia se multiplica por el factor del cultivo de caña de azúcar (k_{ca}) en las diferentes etapas de su ciclo de crecimiento como se describe por Brower y Heibloem (1986). Una vez estimada la evapotranspiración, se procede a calcular la huella hídrica por medio de la Ecuación (1).

4. REGIONES CAÑERAS EN MÉXICO Y LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

En el país hay cinco regiones cañeras (Centro, Huastecas, Occidente, Sureste y Golfo) y 54 ingenios azucareros en operación. La actividad cañera se localiza en 15 estados (Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí, Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas, Nayarit, Puebla, Morelos, Quintana Roo, Tabasco, Sinaloa, Colima, Michoacán y en Campeche) donde se

cultivaron 672,658 hectáreas para la zafra 2010-2011 (UNC, 2012), superficie que representa menos del 0.35% del territorio nacional.

De acuerdo a datos disponibles de la zafra 2005-2006 y 2006-2007, la producción de caña de azúcar en México depende del riego en aproximadamente 40% del área destinada a éste cultivo y el 60% es de temporal; con un rendimiento promedio de 89 ton/ha bajo riego y de 63 ton/ha para temporal (SAGARPA, 2009). En términos de la contribución a la producción de caña de azúcar que se cultiva bajo riego, destacan los estados de Veracruz, Jalisco, Tamaulipas y Sinaloa (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Principales estados productores de caña de azúcar 1998-2008

Estado	Riego (%)	Temporal (%)	Total (%)	RHA dominante
Veracruz	24.6	50.1	38.4	X
Jalisco	21.9	2.6	12	VIII
Tamaulipas	9.8	2.1	5.8	IX
Sinaloa	9	0	4.3	III
Morelos	7.4	0	3.6	IV
Chiapas	6.5	2.9	4.7	XI
San Luis Potosí	4.3	9.2	6.9	IX
Nayarit	1.9	6.6	4.4	VIII
Oaxaca	0.5	12	6.6	X
Tabasco	0.1	6.5	3.5	XI
Total	86	92	90.2	

Aportación porcentual al total nacional (Fuente: SAGARPA, 2009)

En el contexto de esta investigación es importante recordar que el mayor volumen de agua disponible en el país se emplea en la actividad agrícola (76.7%) (Fig. 4.1) (CONAGUA, 2011) a través de la irrigación de los terrenos en los distritos de riego y en las denominadas unidades de riego. Este porcentaje del volumen de agua empleado en la agricultura se asemeja al promedio global mundial que se reporta en 70% (FAO, 2012a). Sin embargo, el volumen de agua que representa ese porcentaje depende de la disponibilidad de agua en cada país. Si comparamos los datos de disponibilidad promedio

anual de los dos principales países productores de etanol en el mundo, con valores de 8,233,000 millones de m³ y 3,069,000 millones de m³, para Brasil y EUA, respectivamente (FAO, 2012b), con el promedio nacional de 460,237 millones de m³ anuales (CONAGUA, 2011), se advierte que contamos en total con bastante menos agua y coloca al país en una situación de desventaja importante en el mercado de biocombustibles.

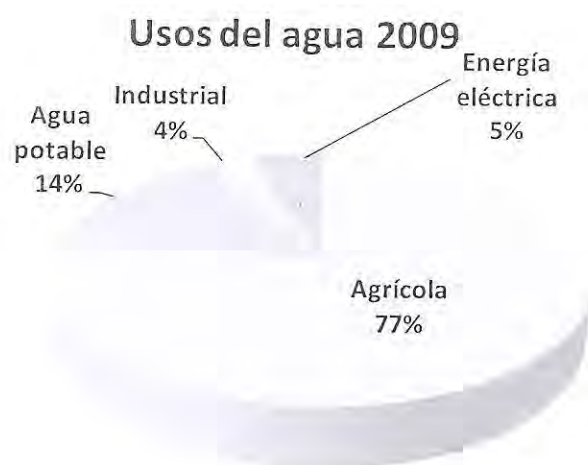


Figura 4.1 Distribución de los volúmenes concesionados para los usos consuntivos del agua (CONAGUA, 2011)

Además habrá que considerar que la disponibilidad natural media de agua *per cápita* en México ha ido disminuyendo con los años, pasando de 18,000 m³ por habitante al año en 1950 a menos de 4,000 m³ por habitante al año en el 2010 (CONAGUA, 2011). A causa del impacto del cambio climático, esta disponibilidad se verá afectada así como la demanda de la misma para los distintos usos consuntivos (Bates et al., 2008). CONAGUA estima que para el año 2030 el agua renovable *per cápita* alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1,000 m³/hab-año en algunas de las trece Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) en las que divide al país, lo que se califica como una condición de escasez grave (Tabla 4.2).

En la Figura 4.2 se puede observar la localización de las cuatro Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) con menor disponibilidad de agua *per cápita* en el 2010 (Tabla 4.2): la situación más grave se presenta en la Región XIII que comprende al DF y parte de los estados de Hidalgo, Tlaxcala y Estado de México; la Región VI que comprende a los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y la parte norte de Tamaulipas; la Región I que abarca a toda la península de Baja California, y la Región VIII, conocida como Lerma-Santiago-Pacífico, con los estados de Jalisco, Colima, Aguascalientes, Guanajuato y parte de Nayarit y Michoacán.

Tabla 4.2 Disponibilidad natural media de agua en México

Región Hidrológica Administrativa	Agua renovable promedio (millones m ³ /año)	Agua renovable per cápita	
		2010 (m ³ /hab/año)	2030 (m ³ /hab/año)
I Península de Baja California	4,667	1,234	789
II Noroeste	8,499	3,225	2,920
III Pacífico Norte	25,630	6,475	6,754
IV Balsas	21,680	2,033	1,948
V Pacífico Sur	32,824	7,945	8,162
VI Río Bravo	12,163	1,094	918
VII Cuencas Centrales del Norte	7,898	1,873	1,729
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	34,533	1,633	1,469
IX Golfo Norte	25,564	5,132	5,013
X Golfo Centro	95,866	9,907	9,659
XI Frontera Sur	157,754	23,637	21,041
XII Península de Yucatán	29,645	7,151	5,105
XIII Aguas del Valle de México	3,513	163	148
Total	460,237	4,230	3,800

Fuente: CONAGUA (2011)

REGIONES HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS

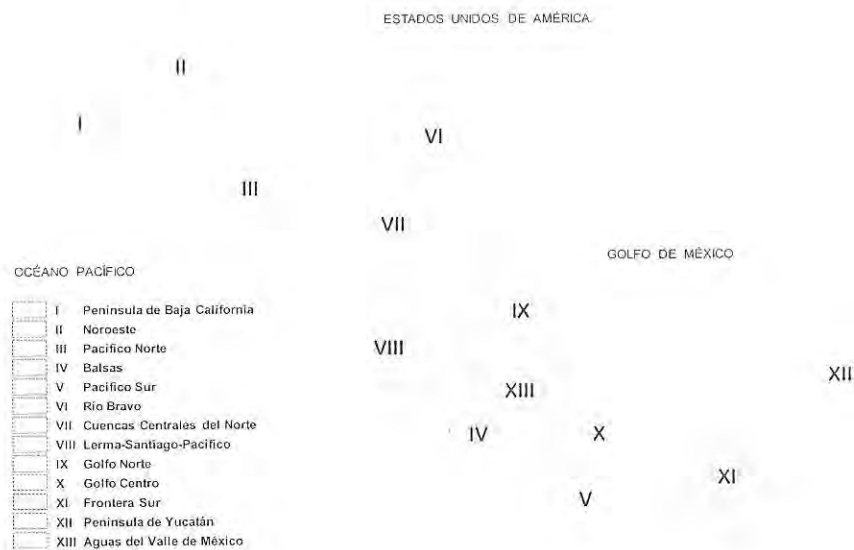


Figura 4.2 Localización de la Regiones Hidrológicas Administrativas

En las Regiones Hidrológicas VIII y IV con baja disponibilidad de agua en el 2010 se localiza el 20% de la superficie cañera sembrada durante la zafra 2010-2011. En las regiones con mediana disponibilidad, que corresponde a la Regiones IX, XII y X, se encuentra el 70% de la superficie sembrada; y en la región con suficiente agua, la Región XI, sólo se cultivó el 10% de la superficie total.

5. ESTUDIO DE CASO: INGENIO TAMAZULA

Para la realización de esta investigación se logró tener contacto con la administración del Ingenio Tamazula A.C., perteneciente a la región cañera de Occidente. Esto brindó la oportunidad de visitar sus instalaciones (Octubre 2011), recorrer la zona agrícola y obtener que proporcionaran la información disponible, solicitada para este estudio.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

La zona cañera asociada al ingenio azucarero Tamazula A.C. del Grupo Sáenz se localiza en el centro-oeste del país; en la región sur del Estado de Jalisco en el municipio Tamazula de Gordiano (Fig. 5.1) ubicado entre la latitud norte a 19 grados 41 minutos, longitud oeste a 103 grados y 15 minutos y a una altitud de 1,120 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una extensión territorial de 1,326.44 km²; colinda al norte con los municipios de Gómez Farías, Concepción de Buenos Aires, al noreste con Mazamitla, al

este con Valle de Juárez, Manuel Diéguez, al oeste con Ciudad Guzmán, al sur oeste con Zapotiltic y al sur con Tecalitlan y Jilotlán de los Dolores.

El Municipio de Tamazula tiene una población de 109,166 habitantes; la región concentra el 1.62% de la población total del Estado de Jalisco, correspondiéndole en razón de su superficie una densidad de 15.32 habitantes por km² (CEA, 2011). El municipio presenta un clima templado cálido y semicálido, con temperatura media anual de 20.9°C y precipitación media anual de 897 mm (CEA, 2011). Sostiene principalmente comunidades vegetativas como selva mediana, pastizales, y bosques de pino y encino.



Figura 5.1 Ubicación de Tamazula en el Estado de Jalisco (CEA, 2011)

La zona cañera abarca aproximadamente 15,500 hectáreas donde toda la producción se obtiene bajo el sistema de riego. Típicamente se aplica anualmente de febrero a septiembre, ya que el periodo de estiaje se presenta de octubre a junio y se observa una precipitación promedio histórica entre 0.2 y 32 mm/d. En los campos de cultivo hay infraestructura para aplicar el riego a través de tres sistemas: rodado (por inundación), por aspersión y por goteo (Fig. 5.2). La mayor parte de los terrenos agrícolas actualmente son regados por inundación (50%); en los últimos años se ha incrementado el área regada por goteo de tal forma que cubre aproximadamente el 25% del área cultivada y un porcentaje igual por aspersión. Estos sistemas de riego, aspersión y por goteo, son más eficientes en el uso de agua porque permiten el ahorro entre 30 y 40% de agua, respectivamente (Narayanamoorthy, 2005).



Figura 5.2 Sistemas de riego rodado y por aspersión en la zona cañera de Tamazula

El cambio tecnológico en los sistemas de irrigación también representa cambios en la fuente de abastecimiento de agua; ya que para los sistemas de riego por goteo y aspersión recurren a la extracción de agua subterránea, mientras que el riego rodado se realiza a través del bombeo de agua superficial procedente del Río Tamazula. La administración del ingenio Tamazula cuenta con infraestructura instalada en algunas secciones de ese río para represar el agua y bombear a los canales de riego, lo cual permite el manejo integral del agua superficial en la zona irrigada.

Además del nivel de tecnificación del sistema de riego en los campos de cultivo, la administración del ingenio tiene acceso a datos de temperatura y precipitación que obtienen de dos estaciones meteorológicas (Contla (14034) e Ingenio (14141)) localizadas dentro de las tierras cultivadas; así como con información a través de tres estaciones agro-climatológicas también ubicadas dentro de la zona de estudio (Tamazula, Tezontel y el Ovejo). Éstas cuentan con datos de precipitación, temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa, entre otros, y comenzaron a funcionar a partir de 2008.

Esta zona cañera destaca por lograr altos rendimientos agrícolas, del orden de 110 ton de caña por hectárea en promedio, comparados con el promedio nacional de 72 ton/ha (UNC, 2012). En términos de la capacidad industrial instalada, el ingenio cuenta con instalaciones para la producción de alcohol etílico, y produjo 1,944,155 L de alcohol, en el año 2010-2011, durante los 75 días que estuvo en operación. El volumen de producción de alcohol corresponde al uso del 30% promedio de las mieles producidas en el proceso de fabricación de azúcar. Es uno de los cinco ingenios del país que mantiene la producción de alcohol, ya que otros cuentan con instalaciones pero no lo producen (UNC, 2012).

Otros aspectos a destacar del ingenio Tamazula son el área de investigación para el mejoramiento de semillas y el aprovechamiento de desechos. Cuenta con un laboratorio experimental donde desarrollan distintas variedades de caña y realizan pruebas para encontrar las más eficientes. El volumen de residuos y desechos que se producen en el ingenio son aprovechados casi en su totalidad y generan beneficios sociales, económicos y ambientales. Por ejemplo, el porcentaje de mieles que no se procesa tiene un importante mercado en la zona ya que se comercializa para la industria alimentaria; lo mismo ocurre con el volumen de melaza que se usa como alimento para el ganado. En términos de los beneficios ambientales, cabe señalar que las vinazas producidas en el ingenio son aprovechadas en la fertilización de los suelos agrícolas y cuentan además con instalaciones para la práctica de la lombricultura con el fin de utilizar el producto también como abono. Una reciente innovación en el ingenio fue la inauguración en 2011 de una planta de cogeneración de energía, que destaca al Grupo Sáenz como los primeros dentro del sector azucarero.

5.2 RESULTADOS: CONSUMO DE AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La estimación de la demanda de agua para la producción de bioetanol en el caso de estudio comprende el cálculo del agua necesaria para el cultivo de la caña de azúcar bajo las características específicas del sitio, así como el volumen de agua requerida en el ingenio para obtener el etanol a partir del procesamiento de las mieles. Estos cálculos se presentan para los datos del año 2010, y considerando proyecciones futuras de precipitación y temperatura bajo condiciones de cambio climático, se estimó el valor que podría esperarse en los requerimientos de agua, para el año 2020 y 2050.

A partir del análisis de los datos obtenidos y consistentes todos para el año 2010, se estimaron las variables necesarias para el cálculo de la huella hídrica (HH) para ese año. La estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) que es la variable más importante en las ecuaciones 1 y 2 (ver sección 3), presentó una variación entre 2 y 6 mm/d (Fig. 5.3) y los valores más altos se observaron en los meses de abril a septiembre. Para su estimación se empleó el método de Penman-Monteith, como se describió en la sección 3 y los valores de todas las variables usadas pueden consultarse en la Tabla 3.2 de esa misma sección (Jiménez et al, 2012). En la figura 5.3 puede observarse la correspondencia entre la variación de la temperatura en la zona de estudio y la evapotranspiración. Con la aplicación del factor del cultivo de caña de azúcar (k_{ca}) en las diferentes etapas de su ciclo de crecimiento como se describe por Brouwer & Heibloem (1986), se observa en la Figura 5.4 el comportamiento estimado para la evapotranspiración asociada al cultivo de caña de azúcar.

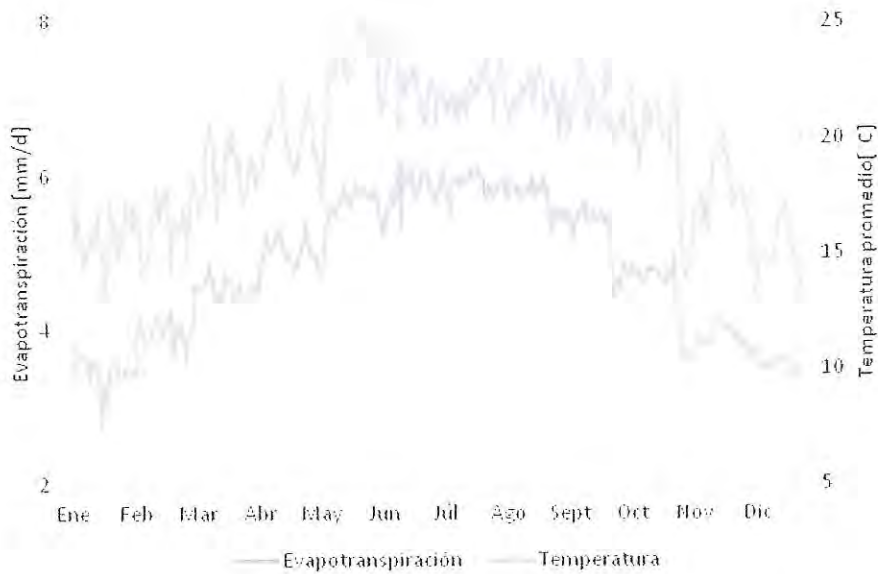


Figura 5.3 Evapotranspiración diaria estimada y temperatura en el año 2010



Figura 5.4 Comportamiento mensual de la evapotranspiración de referencia para la caña de azúcar

Una vez obtenidos los resultados de la evapotranspiración, se estimó la huella hídrica de la caña de azúcar (HH) cuyo resultado fue de 98 m³/ton, considerando un rendimiento del cultivo de 110 ton/ha. En la Tabla 5.1 se muestra la evapotranspiración acumulada del cultivo así como la huella hídrica de la caña de azúcar acumulada durante los meses que se aplica riego; también se puede observar que la huella hídrica varía mes con mes,

siendo febrero el mes que menor huella hídrica presentó para las condiciones del año 2010.

Tabla 5.1 Evapotranspiración y huella hídrica de la caña de azúcar estimada para el año 2010

Mes	*K _{ca}	Evapotranspiración acumulada [mm]	Huella Hídrica [m ³ /ton]	Huella Hídrica acumulada [m ³ /ton]
Febrero	0.50	60	5.5	5.5
Marzo	0.650	173	10.2	15.7
Abril	0.90	324	13.7	29.4
Mayo	1.0	506	16.5	45.9
Junio	1.025	610	9.5	55.4
Julio	1.050	802	17.5	72.9
Agosto	0.925	960	14.4	87.3
Septiembre	0.80	1078	10.7	98

Fuente: * Brower y Heibloem (1986)

La huella hídrica de 98 m³/ton es un valor sobreestimado, ya que se estimó considerando que las 15,500 hectáreas se regaron por el sistema de inundación (riego rodado), cuando en la región de Tamazula utilizan riego rodado en un 50% de la superficie cultivada, en 25% aproximadamente de suelo agrícola se emplea riego por aspersión y en el 25% restante el riego es por goteo. Si se toman en cuenta estos dos últimos sistemas de riego, el área regada y la proporción de agua que se ahorra con ellos - el ahorro de riego por aspersión en comparación con inundación es del 30% y por goteo es del 44 % (Narayanamoorthy, 2005)-, el valor de la huella hídrica que se aproxima mejor a las condiciones de cultivo de la caña de azúcar en Tamazula varía entre 55 m³/ton con riego por goteo, 69 m³/ton para aspersión y 98 m³/ton bajo el sistema de riego rodado, considerando el mismo rendimiento para la caña de azúcar. Tomando en cuenta esta variación en el requerimiento de agua, el volumen total estimado para regar las 15,500 ha, durante los 8 meses que dura el ciclo de riego, es de 136.3 millones de m³ de agua. De tal manera que en Tamazula hay un ahorro neto de agua de 20% que representa 31 millones de m³ de agua aproximadamente por los sistemas de riego instalados.

La otra componente importante en la demanda de agua para la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar es la cantidad de agua necesaria para el procesamiento de las melazas para obtener etanol. Actualmente, en ninguno de los ingenios del país se produce etanol de forma comercial, sólo se han realizado pruebas piloto, por lo que no hay datos disponibles sobre el consumo de agua para esta etapa de la producción del biocombustible. Por ello, no fue posible medir esta componente de la huella hídrica con datos específicos del ingenio Tamazula. Sin embargo, para tener una estimación se consideraron datos reportados en la literatura con base en el volumen de

agua requerido por cada tonelada de caña procesada ($1.8 \text{ m}^3/\text{ton}$). Con esta tasa de consumo se estimó un volumen de agua de $2,105,301 \text{ m}^3$ en total, necesario para el procesamiento en el ingenio Tamazula de las $1,169,612$ toneladas de caña de azúcar (UNC, 2011) reportadas para el año 2010. Ese volumen sólo representa el 1.5 % de la demanda de agua estimada para el cultivo de la caña de azúcar bajo las condiciones de riego analizadas.

Se reconoce que la tasa de consumo aplicada podría ser una subestimación, ya que es el resultado de años de experiencia en obtener mejores eficiencias en la industria azucarera brasileña. No obstante, el uso de agua durante la producción de caña es mucho mayor que la necesaria en el proceso de obtención del etanol en los ingenios, por lo que la demanda de agua agrícola es la componente más importante en la estimación de la huella hídrica y por tanto en el impacto en el recurso del agua.

5.3 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA PARA ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Bajo condiciones de cambio climático es de esperarse que la evapotranspiración y por tanto la demanda de agua para el crecimiento de la caña de azúcar se vean afectadas por cambios en la temperatura y la precipitación, entre otros factores. Por ello, para el cálculo de la huella hídrica futura en la zona cañera de Tamazula, se consideraron proyecciones de precipitación y temperatura para dos horizontes, el año 2020 y 2050. Estos datos climatológicos se obtuvieron de la plataforma PCIC (2012) correspondientes a los escenarios de cambio climático A2 y B1 y proyectados con los modelos de circulación general ECHAM y GFDL, lo cuales fueron seleccionados por que mejor se ajustan al comportamiento histórico del clima en México (Conde et al, 2011). Dichos valores de precipitación y temperatura se usaron en las Ecuaciones 1 y 2, así como en el modelo de Penman-Monteith, para obtener las estimaciones de la huella hídrica. Además, se supuso que prevalecen las condiciones actuales del área cultivada, la tasa de rendimiento y los parámetros locales para estimar la evapotranspiración. El detalle de la investigación puede consultarse en Haro et al (2013).

Para los escenarios futuros con cambio climático se encontró que la demanda de agua para la producción de caña de azúcar se incrementa de $98 \text{ m}^3/\text{ton}$ a casi $103 \text{ m}^3/\text{ton}$ (Tabla 5.2). Estos resultados muestran que si no cambian las condiciones de producción, la huella hídrica se incrementará a futuro entre un 2 y 5%. Este incremento poco significativo puede explicarse si se considera que las proyecciones de los modelos GFDL y ECHAM estiman que se incrementará la precipitación durante los meses de lluvia y disminuirá en el estiaje, de manera que durante los últimos cuatro meses del periodo de riego se contará con mayor cantidad de agua. Estos valores futuros estimados para la huella hídrica de la caña de azúcar se considera que son conservadores ya que podrán presentarse cambios en el rendimiento del cultivo y esperar que la demanda de agua para riego se incremente; por ejemplo la huella hídrica futura podría llegar a ser de $150 \text{ m}^3/\text{ton}$,

si el rendimiento en Tamazula disminuyera a valores equivalentes al promedio nacional histórico de 72 ton/ha. También puede esperarse que para compensar la caída en el rendimiento se incremente el área cultivada, en cuyo caso la huella hídrica no cambia pero la demanda de agua para riego total aumentará; se estimó que para un 10% más de hectáreas cultivadas, la demanda de agua para riego crecería en un 8%.

Tabla 5.2 Huella hídrica y demanda de agua para riego para escenarios con cambio climático

Año	Huella Hídrica futura estimada (m ³ /ton)				Demanda Total de agua (Millones m ³ /año)			
	A2		B1		A2		B1	
	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
2020	100.5	100.3	100.5	99.7	147.6	147.3	147.6	146.5
2050	102.5	102.5	101.2	102.1	150.3	150.3	148.6	149.8

5.4 DISCUSIÓN: IMPACTO EN EL RECURSO HÍDRICO

Los resultados de esta investigación muestran que la producción del biocombustible etanol a partir de la caña de azúcar presenta una huella hídrica que varía entre 55 y 98 m³/ton con una demanda importante de agua en la región de Tamazula del orden de 136.3 millones de m³ por ciclo agrícola. Estas estimaciones que muestran que el mayor consumo de agua está en el riego de la caña (98%). Sin embargo, hay un ahorro de casi 31 millones de m³ durante cada ciclo agrícola, gracias a que cuentan con instalaciones de sistemas más eficientes de riego, comparados con el tradicional por inundación (rodado).

Un factor importante en estos resultados es la tasa de rendimiento del cultivo de la caña de azúcar en la región (ver Ecuación 1). Si ese rendimiento bajara, por ejemplo de 110 a 100 ton/ha y considerando sólo riego rodado, entonces la huella hídrica de 98.1 se incrementa a 108 m³/ton; más aún, si se considera el rendimiento promedio histórico del país de 72 ton/ha, la huella hídrica se incrementa hasta 150 m³/ton. Estos datos indican que el sistema de riego y el rendimiento del cultivo son claves en la demanda de agua y por tanto en el ahorro de la misma.

De tal manera que en Tamazula hay un ahorro neto de casi 20% que representa aproximadamente 31 millones de m³ de agua por los sistemas de riego instalados. Volumen de agua que no es despreciable ya que esa cantidad es equivalente a dotar 180 L diarios (Aparicio et al., 2006) a más de 850 mil personas durante los 3 meses de riego o equivalente a dotar de agua potable a seis veces la población del municipio de Tamazula, la cual es cercana a 127,000 habitantes.

Es claro que la metodología de la huella hídrica es una valiosa herramienta que permite analizar los requerimientos de agua para la producción de cultivos, principalmente si se planea destinarla para la producción de biocombustibles; como ocurre en el caso de México. Permite, además, evaluar opciones de ahorro que dependen de la práctica agrícola; sin embargo, la dimensión del impacto en el recurso, como es saber si hay suficiente agua para atender esos requerimientos, queda fuera del alcance de esa metodología. Por ello en esta investigación se realizó un balance hidrológico de carácter general en la región para tener una aproximación a la magnitud del impacto en el recurso. El balance se analizó a partir de estimaciones de la disponibilidad de agua en la región y tres usos consuntivos: uso municipal (el volumen de agua necesario para cubrir la demanda de agua potable para la población en el municipio), uso agrícola (el agua para riego de la caña de azúcar) y el industrial (demanda de agua en el ingenio).

La disponibilidad de agua en una región, o cantidad de agua natural renovable depende de la cantidad de agua de lluvia anual, del volumen que se evapotranspira, y de la que finalmente escurre superficialmente o se infiltra a los acuíferos. De estas variables, la que más impacto tiene en el volumen de agua disponible es la evapotranspiración, ya que se estima que llega a ser del orden del 75% de la precipitación anual (CONAGUA, 2011).

A partir de los datos de precipitación y temperatura correspondientes al año 2010, 2020 y 2050, se estimó la disponibilidad de agua renovable en la superficie del municipio de Tamazula. Los resultados mostraron que la cantidad de agua disponible en 2010 fue de 364 millones de m^3 , y para los escenarios futuros con cambio climático es posible que varíe entre 234 y 352 millones de m^3 entre el año 2020 y el 2050. Es decir, la posible variabilidad climática podría impactar la reducción del recurso en la región entre 4 y 36% en el futuro, dependiendo de la consideración del escenario (A2 o B1) y de los modelos que se usen para estimar las proyecciones (ECHAM o GFDL). Aún cuando es necesario estimar detalladamente el volumen del agua renovable, los resultados indican que es necesario considerar la planeación de los usos del agua de manera integral, incluso a nivel mensual para advertir la probabilidad de escasez temporal o prolongada del recurso.

En cuanto a la estimación de la demanda de los usos consuntivos de agua, se obtuvo que para el suministro de agua potable a la población municipal durante el año 2010 se requiere un volumen de 6.9 millones de m^3 , suponiendo una dotación de 150 L/hab-día (Aparicio et al, 2006). Este volumen, sumado a la demanda de agua para riego de la caña de azúcar (136.3 millones de m^3) y la correspondiente en el ingenio (2.1 millones de m^3), indica una demanda total de 145.3 millones de m^3 al año, donde el riego representa el 94%. Estos valores son representativos para la región en cuanto a que la caña es el principal cultivo, lo cual no excluye la existencia del riego a otros, y también el ingenio es la principal industria en la zona.

El volumen de agua para los usos consuntivos de 145.3 millones de m^3 corresponde al 39.8% del agua renovable en la región. Este porcentaje, denominado índice de estrés hídrico, indica que hay en la región un grado de presión medio sobre el recurso al encontrarse dentro del rango de 20% y 40% (CONAGUA, 2011). Resultado que es

congruente con el índice de estrés hídrico reportado por CONAGUA (2011) de 43% para la región hidrológica a la que corresponde la zona de estudio (Fig. 5.5).

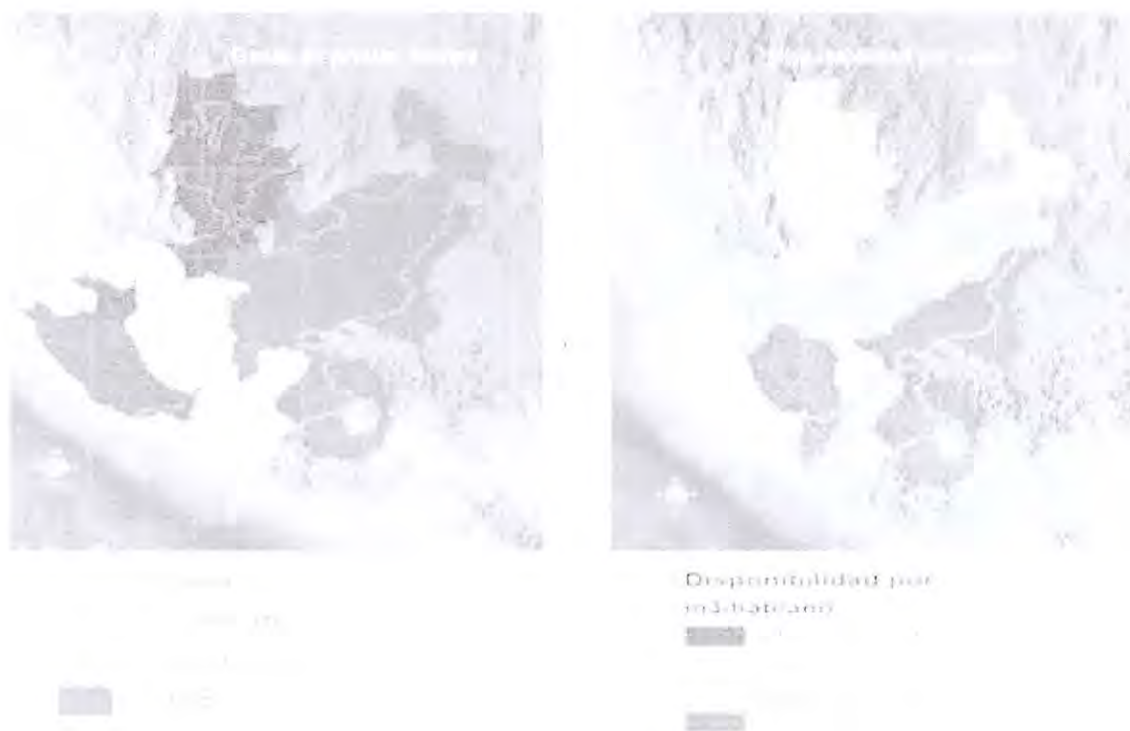


Fig. 5.5 Disponibilidad y presión hídrica en el estado de Jalisco (CONAGUA, 2009)

El análisis de estos últimos resultados indica que la tendencia de ir incrementando la extensión de riego por goteo, observada en la zona cañera de Tamazula, es acertada frente a la situación de estrés hídrico en la región, ya que contribuirá a incrementar el ahorro de agua. Más aún, se advierte como una medida relevante, dado que pueden presentarse limitaciones serias a la producción de caña de azúcar ante la posible reducción del recurso en la región entre 4 y 36% en el futuro.

6. REFLEXIÓN FINAL

A partir de la experiencia en el estudio de caso reportado en este informe, se obtuvieron recomendaciones de carácter técnico para afinar las estimaciones realizadas, así como sugerencias para futuras investigaciones vinculadas a la planeación de opciones energéticas en el país.

- Los resultados para el caso Tamazula no se pueden generalizar a otras zonas cañeras o ingenios del país. Es necesario realizar estudios específicos a las

condiciones de cada zona para analizar tanto la magnitud de la huella hídrica local como evaluar otros usos consuntivos de agua y comparar con el comportamiento del volumen de agua renovable actual y futuro

- Cada opción energética orientada a la producción de alternativas a los combustibles de origen fósil para el transporte, como lo es el bioetanol a partir de la caña de azúcar, deberá de contar con el análisis a nivel local de su viabilidad, para que garantice tanto la seguridad energética como la seguridad hídrica del país
- Los estudios específicos a nivel local deberán incorporar el análisis de las variables económicas para dimensionar adecuadamente su viabilidad. En el caso concreto de la caña de azúcar es necesaria la definición de una política de precios clara que haga atractiva la producción de bioetanol frente a la comercialización del azúcar y la gasolina
- Actualmente sólo se han realizado pruebas a escala piloto de la producción de bioetanol en el país, y ha quedado en el papel y en los discursos gubernamentales, la sustitución de la gasolina por bioetanol a partir de caña de azúcar en el transporte urbano; como se pretendió marcar metas para las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara (SENER, 2008)
- La producción de bioetanol para sustituir un porcentaje (6%) de gasolina en el transporte urbano como una opción ecológica, pareciera más atractiva que como una opción energética y medida de mitigación, frente a los efectos del cambio climático. Sin embargo, debería de evaluarse esta opción y establecer la viabilidad del bioetanol como sustituto del MTBE en la gasolina, para reducir la emisión de gases contaminantes en las grandes ciudades del país
- Finalmente, los biocombustibles de primera generación, bioetanol y biodiesel a partir de cultivos comerciales, podrían rápidamente ser superados por los denominados biocombustibles de segunda generación. Estos se producen de productos agrícolas y forestales, distintos de los cultivos alimentarios, que aprovechan la lignina, la celulosa y la hemicelulosa de la planta (FAO, 2008). Los avances tecnológicos están evolucionando rápidamente a nivel internacional y México no puede perder esa perspectiva de desarrollo. Por lo que es recomendable invertir en investigaciones sobre la viabilidad de ellos, así como de otras opciones energéticas, antes de derrochar recursos en el cumplimiento de metas parcialmente evaluadas

REFERENCIAS

- Allen R G, Pereira L S, Raes D and Smith M (1998) Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- Aparicio, M.J., Lafragua, C.J., Gutiérrez, L.A., Mejía, Z. R., Aguilar, G.E. (2006) *Evaluación de los recursos hídricos*. UNESCO.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof (Eds.) (2008) *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*. Secretariat, Geneva.
- Becerra, P.L. (2006). La industria del etanol en México, *Economía UNAM* 6 (16), 82-98.
- Brouwer, C. y Heibloem, M. (1986) *Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs*. Training Manual No. 3. Rome. FAO.
- Castillo, V.S. (2009). *Viabilidad de los biocombustibles: Biodiesel y bioetanol*. España: Universidad de Castilla-La Mancha. Programa de Doctorado Ciencia e Ingeniería Agrarias. Consultado en línea el 20 de marzo de 2012 <http://www.uclm.es/profesorado/scastillo/NUEVA%20WEB-PAC/Cap%EDtulo%202.%20Estudio%20viabilidad%20biocombustibles.pdf>
- CEA (2011) Región 05 Sureste. Sistema de Información del Agua. Comisión Estatal del Agua Jalisco <http://www.ceajalisco.gob.mx/> [consultada 15 Diciembre 2011]
- Chiu, Y., Walseth, B., Suh, S. (2009) Water Embodied in Bioethanol in the United States. *Environmental Science and Technology*, 43(8), 2688-2692.
- CONAGUA (2009)
- CONAGUA (2011) *Estadísticas del Agua en México 2011*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O., Gay, C. (2011) Regional climate change scenarios for México. *Atmósfera* 24(1), 125-140.
- De Fraiture, C.; Giordano, M.; Liao, Y. (2008) Biofuels and implications for agricultural water use: Blue impacts of green energy. *Water Policy*, 10(S1), 67–81.
- Domingo, F., Villagarcía, L., Were, A. (2002) ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas* 2003/1 <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm> [consultada 15 Agosto 2011]
- Elcock, D. (2008) *Baseline and Projected Water Demand Data for Energy and Competing Water Use Sectors*. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, Oak Ridge, TN: U.S. Department of Energy.
- FAO (2008)
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2006). *Evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO (2012a) Usos del Agua. AQUASTAT Sistema de información global sobre el agua y la agricultura de la FAO. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/indexesp.stm [consultada Marzo 2012]

- FAO (2012b) Water resources. AQUASTAT FAO's Information System on Water and Agriculture http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/indexesp.stm [consultada Marzo 2012]
- Felix Erika y Rosell Cadmo (Eds.) (2010) *Bioenergía y seguridad alimentaria BEFS. El análisis de BEFS para el Perú*. Compendio técnico. Volumen II. Metodologías. FAO – Technical Papers: Ambiente Cambio Climático Bioenergía. Seguimiento y Evaluación. pp 170.
- Fingerman, K.R.; Torn, M.S.; O'Hare, M.H., Kammen, D.M. (2010) Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*, 5(10), 1-7.
- Fresco Louise O. (2007) Biomass, food & sustainability: Is there a dilemma? University of Amsterdam. Member of the Supervisory Board of Rabobank Nederland with Daan Dijk and Wouter de Ridder, Rabobank, The Netherlands, pp 52
http://www.rabobank.com/content/images/Biomass_food_and_sustainability_tcm43-38549.pdf [consultada Mayo 20, 2012]
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y., Van Der Meer, T.H. (2009) The water footprint of bioenergy, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10219-10223.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y. (2009a) The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize. Value of Water Research Report Series No. 38, UNESCO-IHE.
- Gleick, P. (2000) *The World's water*. Island Press.
- Goettemoeller Jeffrey & Adrian Goettemoeller (2007) *Sustainable Ethanol: Biofuels, Biorefineries, Cellulosic Biomass, Flex-Fuel Vehicles, and Sustainable Farming for Energy Independence*, Praire Oak Publishing, Maryville, Missouri, ISBN 978-0-9786293-0-4, pp. 196.
- GRFA (2011) Global Renewable Fuels Alliance <http://www.globalrfa.org/>
- Haro M.E., Navarro I., Thompson R., and Jimenez B. (2013) *Estimation of the water footprint of sugarcane in Mexico: is ethanol production an environmentally feasible fuel option?* Journal of Climate Change, (en revision)
- Hoekstra AY & Hung PQ (2002) *Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade*. Value of Water Res Report Series No. 11. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Hoekstra, A.Y. (2007) Human Appropriation of Natural Capital: Comparing Ecological Footprint and Water Footprint Analysis. Institute for Water Education. *Ecological Economics*, 68; 1963-1974.
- Hoekstra AY & Chapagain AK (2007) Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manag* 21:35–48.
- Hoekstra AY & Chapagain AK (2008) *Globalization of Water. Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing, Oxford, UK. ISBN 978-1-4051-6335-4, 224 pp.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M., (2009) *Water Footprint Manual*. State of the Art 2009. Enschede, Netherlands: Water Footprint Network.
- Hughes S., Partzch L. & Gaskell S. (2007) The development of biofuels within the context of the global water crisis. *Sustain Dev Law & Policy* 62:58–62.

- Jank Marcos J., Kutas Géraldine, do Amaral Luiz Fernando, Nassar André M. (2007) EU and U.S. Policies on Biofuels: Potential Impacts on Developing Countries. The German Marshall Fund of the United States. Washington DC, 28 pp [Consultada Mayo 2011]
http://www.gmfus.org/galleries/ct_publication_attachments/GMF_USEU_Final.pdf
- Jiménez B., Navarro I., Haro M., Thompson R (2012) Evaluación de la disponibilidad de agua y los costos asociados a la producción de cultivos para la manufactura de biocombustibles. Informe Final del Proyecto "Biocombustibles en México: una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y para la mitigación de los gases efecto invernadero". Convenio Instituto de Ingeniería-PINC-UNAM
- Maluenda, G. M. (2011) Bioetanol. Perspectivas 2012. [consultada 2 Julio 2012]
<http://www.agrodigital.com/Documentos/bioetanolmz12.pdf>
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2010) *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Volume 1: Main Report*. Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands
- Moreira J.R. (2007) *Water use and impacts due ethanol production in Brazil*. http://www.iwmi.cgiar.org/EWMA/files/papers/Jose_Moreira.pdf [consultada Abril 2011].
- Narayanamoorthy, A. (2005) *Potential for Drip and Sprinkler Irrigation in India*. <http://nrlp.iwmi.org/.../12.%20Water%20Savings%20Technologies%20-%20Narayanamoorthy.pdf> [consultada 20 Mayo 2011]
- NRC (2008) *Water Implications of Biofuels Production in the United States*. National Research Council, National Academies Press: Washington, D.C., 2008; pp 19-25.
- PCIC (2012) Pacific Climate Impacts Consortium Regional Analysis Tool (BETA). Available online at: <http://pacificclimate.org/tools-and-data> [consultada 13 June 2012].
- Pimentel, D. (2003) Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Nat. Resour. Res.*, 12(2), 127–134.
- PNUMA (2009)
- Ramos Taipe Cayo L. (2010) Análisis de los Efectos de la Producción de Cultivos Bioenergéticos sobre la Disponibilidad de los Recursos Hídricos: El Caso del Sistema Chira. Capítulo 4 en: Erika Felix y Cadmo Rosell (Eds.), *Bioenergía y seguridad alimentaria BEFS. El análisis de BEFS para el Perú*. Compendio técnico. Volumen II. Metodologías. FAO pp 53-69. En <http://www.fao.org/docrep/013/i1712s/i1712s04.pdf> [consultada Octubre 27, 2012].
- REN21 (2008) Renewables 2007 Global Status Report. <http://www.ren21.net>
- Roberts Martha G., Male Timothy D., Toombs Theodore P. (2007) Potential Impacts of Biofuels Expansion on Natural Resources. A Case Study of the Ogallala Aquifer Region. Environmental Defense. <http://www.globalwarming.org/wp-content/uploads/2010/12/edf-study-of-ethanol-water-impacts.pdf> [consultada Agosto 2011].
- SAGARPA (2009) Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión. Etapa I. SAGARPA-PRONAC-SIAP, pp-83.
- Saulino F. (2011) Implicaciones del desarrollo de los biocombustibles para la gestión y el aprovechamiento del agua. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

- SENER (2008) *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos*. Secretaría de Energía. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf> [consultada 11 Marzo 2011].
- SENER (2010) *Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E6) y la infraestructura para su manejo en México*. Secretaría de Energía. http://www.energia.gob.mx/res/169/sp_RecomendacionesTecEtanolMezclas.pdf [consultada 15 Marzo 2011].
- UNC (2011) Estadísticas de la Agroindustria de la caña de azúcar. Unión Nacional de Cañeros, A.C.–CNPR http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/ingenios/tamazula.pdf [consultada 7 Diciembre 2011].
- UNC (2012) Estadísticas de la Agroindustria. Unión Nacional de Cañeros A.C. <http://www.caneros.org.mx/estadisticas.html> [consultada agosto 2012].
- Van Meekeren, B.T. (2008). The Water Footprint of Bio-energy. Master Thesis Report. Department Water Engineering and Management. University of Twente. Enschede. http://essay.utwente.nl/BA20CB7F-8B9E-48C1-BFCF-A96C0A2785D6/FinalDownload/DownloadId-5154D99B72857E76C34D82DD7263FF21/BA20CB7F-8B9E-48C1-BFCF-A96C0A2785D6/58132/1/scriptie_B_van_Meekeren.pdf
- Varghese Shiney (2007) *Biocombustibles y desafíos globales para el agua*. Trade and Global Governance, Institute for Agriculture and Trade Policy (IATP). DKA Austria. http://www.iatp.org/files/451_2_105551.pdf [consultada 21 Marzo 2012].