



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA POR LA  
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN TAMAZULA, JAL.**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

**MARÍA EUGENIA HARO GONZÁLEZ**

TUTORA:

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS**

2012



INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
**UNAM**

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

Secretario: Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez

Vocal: Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros

1er Suplente: M.en C. Vicente Fuentes Gea

2do. Suplente: Dra. Anne Hansen Hansen

Lugar donde se realizó la tesis  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

## **TUTORA DE TESIS**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B. E. J. C.', with a stylized flourish at the end.

**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS**

## DEDICATORIAS

A mis padres Dios y Rafael, **Rafael**<sup>†</sup>, por enseñarme las bases necesarias para salir adelante, por todo su apoyo, amor incondicional y útiles consejos. **Dios**, gracias por apoyarme siempre, aguantarme y estar a mi lado cuando más lo necesito.

A mi hermano **Mauricio**, porque sin su apoyo no sería lo mismo. Gracias por preocuparte por mi bienestar y sobre todo por confiar en mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y al **Instituto de Ingeniería** por brindarme la oportunidad de formar parte de la comunidad universitaria y permitir desarrollarme como un profesionalista de calidad.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la beca otorgada para la realización de mi maestría.

A la **Dra. Blanca Jiménez Cisneros** por aceptarme bajo su tutela y brindarme el apoyo para terminar mi tesis y mi maestría.

A los integrantes del jurado de examen **Dra. Claudia Sheinbaum, M. en C. Vicente Fuentes, Dra. Ana Cecilia Conde y la Dra. Anne Hansen** por sus observaciones, comentarios y sugerencias, los cuales enriquecieron este trabajo.

Al Grupo de Tratamiento y Reuso. En especial, a la **M en C. Inés Navarro González** por brindarme su apoyo y compartir conmigo sus conocimientos para este trabajo; gracias por las enseñanzas y consejos. A la **M. en C. Catalina Maya Rendón** por su apoyo para mi estancia en el Instituto.

Al **Ing. Agustín Fernández Eguiarte**, Coordinador de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, UNAM) por proporcionar los datos necesarios para el análisis histórico de variables climatológicas.

A todos **mis amigos**, que han estado conmigo en los mejores momentos.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Antecedentes .....	4
1.2 Justificación.....	5
1.3 Objetivo .....	6
1.3.1 Objetivos específicos .....	6
1.4 Alcances.....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 Biocombustibles .....	8
2.1.1 La producción de biocombustibles en el mundo.....	10
2.1.2 Producción de biocombustibles en la Unión Europea .....	11
2.1.2 Biocombustibles de primera generación .....	14
2.1.3 Biocombustibles de segunda generación.....	15
2.1.4 Biocombustibles de tercera generación .....	16
2.1.5 Producción de etanol en México .....	17
2.1.6 Ventajas y desventajas de los biocombustibles.....	18
2.2. Huella hídrica .....	19
2.2.1 Evaluación de la huella hídrica.....	20
2.3 Evapotranspiración (ET).....	24
2.4 Escenarios de cambio climático .....	25
2.4.1 Fuentes de información para generar escenarios de cambio climático (Pacific Climate Impacts Consortium).....	27
3. METODOLOGÍA .....	30
3.1 Descripción del sitio .....	30
3.2 Cálculo de la huella hídrica del cultivo.....	33
3.3 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo .....	34
3.3.1 Método de Penman-Monteith.....	35
3.4 Estimación de la demanda total de agua para riego .....	40
3.5 Estimación de la demanda de agua total en Tamazula.....	40
3.6 Disponibilidad del agua y balance regional.....	40
3.7 Proyecciones con cambio climático .....	43
4. RESULTADOS .....	45

4.1 Estimación de la huella hídrica .....	45
4.1.1 Estimación de la evapotranspiración del cultivo.....	45
4.2 Estimación de la demanda total de agua para riego .....	47
4.3 Demanda de agua total en Tamazula.....	48
4.4 Estimación de la disponibilidad de agua actual y balance regional.....	48
4.5 Generación de escenarios de cambio climático.....	50
4.6 Estimación de la huella hídrica con proyecciones de cambio climático.....	56
4.7 Disponibilidad proyectada con proyecciones de cambio climático .....	57
4.8 Balance regional bajo los escenarios de cambio climático .....	57
4.9 Producción de etanol en México.....	57
5. DISCUSIÓN.....	59
6. CONCLUSIONES .....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO 1 COSTOS DEL AGUA ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE ETANOL.....	69

## ÍNDICE DETABLAS

Tabla 1.1 Cálculo de la huella hídrica de 13 cultivos

Tabla 2.1 Huella hídrica de 12 cultivos en cuatro países

Tabla 2.2 Huella hídrica azul, verde y gris de caña de azúcar de los principales países productores

Tabla 2.3 Huella hídrica de diferentes cultivos

Tabla 3.1 Comparativo de algunos ingenios del país

Tabla 3.2 Valores utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia

Tabla 4.1 Evapotranspiración y huella hídrica estimada para el año 2010

Tabla 4.2 Demanda de agua por los diferentes tipos de riego en la región de Tamazula

Tabla 4.3 Demanda de agua en Tamazula

Tabla 4.4 Anomalías de temperatura para los años 2020 y 2050

Tabla 4.5 Anomalías de precipitación para los años 2020 y 2050

Tabla 4.6 Proyecciones de huella hídrica 2020 y 2050

Tabla 4.7 Proyecciones de disponibilidad para los años 2020 y 2050

Tabla 4.8 Demanda de gasolina y producción de etanol

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Matriz energética Mundial

Figura 2.2 Matriz energética Brasil

Figura 2.3 Línea del tiempo de la evolución de la energía renovable 2010-2100

Figura 2.4 Evolución de los biocombustibles durante el siglo XXI

Figura 2.5 Fases de la evaluación de la huella hídrica

Figura 2.6 Huella hídrica azul, verde y gris del etanol de caña de azúcar en los principales países productores de caña de azúcar

Figura 2.7 Escenarios de cambio climático

Figura 3.1 Estado de Jalisco (Ubicación Tamazula)

Figura 4.1 Evapotranspiración diaria estimada y temperatura en el año 2010

Figura 4.2 Línea base de temperatura y precipitación 1980-2007

Figura 4.3 Disponibilidad de agua en Tamazula 1980-2010

Figura 4.4 Proyecciones de temperatura para el año 2020, escenario A2

Figura 4.5 Proyecciones de temperatura para el año 2020, escenario B1

Figura 4.6 Proyecciones de temperatura para el año 2050, escenario A2

Figura 4.7 Proyecciones de temperatura para el año 2050, escenario B1

Figura 4.8 Proyecciones de precipitación para el año 2020, escenario A2

Figura 4.9 Proyecciones de precipitación para el año 2020, escenario B1

Figura 4.10 Proyecciones de precipitación para el año 2050, escenario A2

Figura 4.11 Proyecciones de precipitación para el año 2050, escenario B1



## RESUMEN

A pesar de las ventajas que los biocombustibles (etanol) ofrecen, éstos también tienen impactos negativos en el ambiente y en la seguridad alimentaria. Uno de estos impactos es también en el sector agua, ya que consumen grandes cantidades del recurso para su producción. Por ello, este trabajo analiza el consumo de agua para la producción de etanol a partir de caña de azúcar en México. En particular, se cuantifica el consumo para riego de caña de azúcar en Tamazula, Jal., a partir de un modelo de balance hídrico y de las condiciones climáticas locales. También se estima la disponibilidad de agua y la demanda de la misma para otros usos en la región con el fin de evaluar el impacto que tiene la huella hídrica del etanol en los recursos del agua. Estas estimaciones se realizan para el año 2010. La huella hídrica que se estima se entiende como el consumo para la producción de la caña de azúcar más el consumo para el proceso de producción de etanol. Con los datos anteriores, además se realizó la estimación de la huella hídrica de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar y la variación de la disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático.

La estimación de la huella hídrica se realizó con base en el manual de Hoekstra (2007); dicha estimación requiere del cálculo de la evapotranspiración del cultivo en estudio, para ello se utilizó el método de Penman-Monteith (FAO, 2006). Por otro lado, la disponibilidad de agua en la región se calculó con el volumen de precipitación menos la evapotranspiración, ésta última se calculó con el método de Turc.

Los resultados de esta investigación muestran que el consumo de agua para el etanol es de 99.8 m<sup>3</sup>/ton, la disponibilidad para la región de 364 Mm<sup>3</sup> y la demanda de agua en riego es de 134.5 Mm<sup>3</sup>. Estos resultados muestran que actualmente existen condiciones de estrés hídrico en la región, ya que el índice de estrés es de 37% (> a 20% implica estrés hídrico). Por otra parte, las estimaciones bajo escenarios de cambio climático muestran que habrá cambios importantes en la temperatura y precipitación de la región, lo que ocasionará que la disponibilidad de agua disminuya de 20% a 30%, por lo que si esta región se selecciona para generar biocombustibles, el estrés hídrico sería mucho mayor. Finalmente, se recomienda investigar en cada región cañera del país la conveniencia o no de usarlas para la producción de etanol.

## 1. INTRODUCCIÓN

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 que es un responsable del efecto invernadero. Los gases 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 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 lo tanto anterior, desde hace algunos años, distintas naciones buscan fuentes alternas de energía. Una de ellas son los biocombustibles, los cuales representan la posibilidad de producir energía sin provocar un incremento neto de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Los biocombustibles son combustibles producidos a partir de biomasa. Tienen distintos usos, por ejemplo, en el transporte y la industria. Los biocombustibles pueden ser elaborados a partir de productos agrícolas y forestales, así como de la fracción biodegradable de desperdicios industriales y municipales (Dufey, 2006). De manera general, se entiende por biomasa el conjunto heterogéneo de materias orgánicas que comprenden productos de origen vegetal, animal o microbiano. La biomasa se considera como una fuente de energía renovable, en la cual la energía es producida por vía biológica a partir de compuestos orgánicos (Castillo, 2009).

Los biocombustibles más utilizados son el etanol y el biodiesel; este último se produce a partir de una amplia variedad de cultivos oleaginosos, grasas animales, aceites y grasas recicladas. Para la producción de etanol, en particular, se recurre a la caña de azúcar, maíz, yuca, sorgo y remolacha azucarera. La producción de etanol ha crecido significativamente en los últimos años, no sólo para reducir la dependencia mundial del petróleo, sino también para preservar las reservas existentes de combustibles convencionales y como medida para mitigar el calentamiento global.

En la actualidad, el mayor productor mundial de etanol es Estados Unidos, para lo cual principalmente emplean maíz. El segundo productor es Brasil. El etanol brasileño es producido a partir de caña de azúcar y lo hace desde hace treinta años como sustituto de la gasolina en los automóviles (SENER, 2010). En contraste, en México toda la energía renovable representa sólo el 9.5% de la oferta total de energía (Becerra, 2006), debido al dominio del mercado por el petróleo.

El uso de biocombustibles en principio es prometedor, sin embargo, se debe tener en cuenta que también usan recursos naturales (tierra, agua) y antropogénicos (mano de obra) para su producción, mismos que compiten con la producción de alimentos para humanos y animales. Ello plantea la pregunta de cuáles son las implicaciones de su uso para el ambiente y el ser humano.

Por lo anterior, es necesario evaluar las implicaciones de producir biocombustibles en México, por las grandes extensiones de suelo agrícola que requiere para sembrar los cultivos así como la demanda de agua para riego. Esto último preocupa ya que nuestro país sufre una fuerte problemática hídrica de diferentes niveles de severidad, dependiendo de la región (Jiménez y Navarro, 2010). Así, se concluye en este apartado que como parte de la política energética futura, es importante evaluar la disponibilidad de agua a nivel local para ver si es posible generar los biocombustibles. Se sabe que la disponibilidad natural media de agua *per cápita* en México ha ido disminuyendo con los años, pasando de 18,000 m<sup>3</sup> por habitante al año en 1950 a menos de 3,000 m<sup>3</sup> por habitante al año en el 2011 (CONAGUA, 2011). Pero además, 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 y sin escenarios de cambio climático.

La presente investigación busca precisamente calcular la huella hídrica (consumo de agua de los recursos de agua superficial y subterránea) para la producción de etanol a nivel nacional y en particular, en un ingenio azucarero ubicado en Tamazula, Jalisco, para evaluar la disponibilidad futura de agua bajo diversos escenarios de cambio climático. Es importante señalar que el sitio de estudio se eligió debido a que es uno de los ingenios con mejores rendimientos a nivel nacional, además de contar con una fábrica para

producir alcohol. Emplean tres diferentes sistemas de riego (rodado, aspersión y goteo), lo que permite ejemplificar mejor la demanda de agua para riego.

### 1.1 Antecedentes

Existen algunas investigaciones que determinan el impacto de los biocombustibles en la demanda de agua para su producción. A continuación se describen algunas de ellas como marco de este trabajo.

Meekeren (2008) analizó la huella hídrica de los biocombustibles con el objeto de cuantificar la relación entre el agua dulce y los biocombustibles, para lo cual usó el concepto de la huella hídrica. La investigación incluye datos de tres sistemas: la energía, la agricultura, y el agua. Para el primer sistema, consideró la energía primaria (energía de toda la planta) y la energía secundaria (energía a partir de biomasa). Para la agricultura evaluó el rendimiento de la biomasa y las características del cultivo. Por último, para el sistema del agua, evaluó el agua consumida por el cultivo, constituida esta por la humedad del suelo (agua verde), el agua de riego (agua azul), y la contaminación causada por los fertilizantes (aguas grises). Así, Meekeren estimó que la huella hídrica total de los biocombustibles es de 1,500 Gm<sup>3</sup>/año; lo que representa una gran cantidad de agua. En efecto, el uso de los biocombustibles tiene un gran impacto sobre los recursos hídricos.

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 las plantaciones a nivel mundial, siendo la más importante la 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 también la comparación de la huella hídrica para un mismo cultivo en dos localizaciones diferentes, una con condiciones aptas para el cultivo y la otra no. En la tabla 1.1 se muestra los resultados.

Cultivo	Huella Hídrica Total [m <sup>3</sup> /GJ]	Huella Hídrica azul [m <sup>3</sup> /GJ]	Huella Hídrica verde [m <sup>3</sup> /GJ]
Remolacha	46	27	19

Maíz	50	20	30
Caña de azúcar	50	27	23
Cebada	70	39	31
Centeno	77	36	42
Arroz	85	31	54
Trigo	93	54	39
Papa	105	47	58
Yuca	148	21	127
Soya	173	95	78
Sorgo	180	78	102
Colza	383	229	154
Jatrofa	396	231	165

**Tabla 1.1** Cálculo de la huella hídrica de 13 cultivos  
**Fuente:** Gerbens-Leenes et al., 2009

El estudio concluye que los cultivos más adecuados para la producción de electricidad son el maíz, la remolacha azucarera y la caña de azúcar, mientras que los menos apropiados son la colza y la jatropha, cuya eficiencia hídrica es diez veces menor. También, concluye que la huella hídrica de los biocombustibles es muy grande en comparación con otras formas de generar energía, y que la huella hídrica del bioetanol es más pequeña que la del biodiesel. Además, concluye que la huella hídrica de los biocombustibles muestra una variación que depende de tres factores: el cultivo utilizado, el clima del lugar de producción y la práctica agrícola.

## 1.2 Justificación

La combustión de energéticos fósiles y no renovables, como el petróleo, ha provocado alteraciones importantes en el clima mundial, ya que son fuente principal de emisión de gases de efecto invernadero, culpable del cambio climático. Debido a ello, en la actualidad se buscan energías cuyo uso no produzcan o reduzcan estos gases, pero además que incrementen la seguridad de abastecimiento energético y que favorezcan la diversificación de recursos. Por ello, surge la idea de usar biomasa (biocombustibles). Sin embargo, con ello se genera un nuevo modelo de agricultura no alimenticia, responsable de la producción de la materia prima para la energía renovable. En un inicio se consideró que los biocombustibles al ser renovables eran de bajo impacto ambiental; sin embargo, su impacto en el recurso agua ha sido estudiado en forma limitada. Su empleo se considera especialmente viable para países con disponibilidad de tierra para cultivo, mano de obra rural y donde no hay otros recursos energéticos (Duarte y Marcia, 2010). Así, se

considera que los biocombustibles son una alternativa al uso del petróleo y generan empleos. Sin embargo, se señala que son una amenaza para la seguridad alimentaria y la biodiversidad. Actualmente, la producción agrícola de biomasa para alimentación requiere cerca del 86% del agua dulce empleado 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 falta de agua en varios países y regiones con recursos hídricos limitados (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008), y que esta situación se puede agravar a causa del uso de biocombustibles.

Para el cálculo de las necesidades de agua para generar productos de consumo se desarrolló el concepto de la huella hídrica, el cual es importante cuantificar para calcular el consumo de agua en la producción de biocombustibles, así como la futura competencia por el agua para poder evaluar diferentes escenarios.

### **1.3 Objetivo**

Evaluar la huella hídrica por la producción de etanol a partir de caña de azúcar para Tamazula, Jalisco bajo escenarios de cambio climático.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Desarrollar un método para el cálculo de la huella hídrica para la producción de etanol a partir de caña de azúcar usando como modelo Tamazula, Jalisco
- Evaluar dicha huella bajo escenarios de cambio climático
  - Evaluar el consumo de agua asociado a la producción de etanol a partir de caña de azúcar.
  - Evaluar la competencia en los usos del agua a partir del análisis de la disponibilidad de agua a nivel local.

#### **1.4 Alcances**

- La huella hídrica se calculó para el cultivo de caña de azúcar en el municipio de Tamazula, Jalisco.
- La huella hídrica del cultivo se evaluó para la producción de caña de azúcar y la producción de etanol.
- La disponibilidad del agua se evaluó considerando los usos del agua y los datos climatológicos locales disponibles en la literatura.
- La disponibilidad se estimó con y sin escenarios de cambio climático, para 2020 y 2050.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se hace una descripción general de los biocombustibles, su producción en diferentes países y su huella hídrica. Primero se presenta una definición de biocombustibles, las diferentes formas de generación y sus ventajas y desventajas. En seguida, se define la huella hídrica. Por último se presenta qué son los escenarios con cambio climático.

### **2.1 Biocombustibles**

Los biocombustibles son combustibles renovables de origen biológico, tales como la leña, el carbón vegetal, el abono animal, el biogás, el biohidrógeno, el bioalcohol, la biomasa microbiana, los desechos y derivados agrícolas, los cultivos energéticos y otros (Hazell y Pachauri, 2009). Los biocombustibles pueden ser utilizados para sustituir los combustibles derivados del petróleo y el carbón, y así obtener algunos beneficios como son el crecimiento de la economía agrícola regional, la reducción de emisiones atmosféricas y el desarrollo social. Por todo esto, se considera que los combustibles derivados de la biomasa, como el etanol (y sus mezclas con gasolinas base) y el biodiesel son viables.

Existen muchos tipos de biocombustibles y maneras de producirlos. Actualmente, todos los biocombustibles que se producen industrial y comercialmente en el mundo, son el etanol y el biodiesel. El etanol generalmente se produce a partir de azúcar y cultivos como los cereales, mientras que el biodiesel se produce principalmente a partir de cultivos de semillas oleaginosas como la palma y los girasoles. Cada biocombustible tiene sus propias características, ventajas y desventajas.

El bioetanol es un destilado líquido producido mediante la fermentación de plantas ricas en azúcar o de cereales, por ejemplo caña de azúcar, maíz, remolacha, yuca, trigo y sorgo. El bioetanol puede ser usado en forma pura en vehículos especialmente adaptados, o bien, mezclado con la gasolina. Las mezclas de bioetanol con gasolina que son de hasta un diez por ciento no requieren de modificaciones en los motores (Dufey, 2006).



El biodiesel o aceite vegetal metilester se produce mediante una reacción de aceite vegetal con etanol o bioetanol en presencia de un catalizador para obtener alquil-éster y glicerina, ésta última para ser removida. El aceite vegetal se produce a partir de plantas oleaginosas o árboles como el girasol, la soya, la palma, el cocotero, o la jatropa; pero también se puede producir a partir de grasas de animales (sebo, aceite para cocinar gastado). De forma similar al bioetanol, el biodiesel se puede utilizar de forma pura en vehículos especiales o mezclado con diesel en vehículos comunes (Dufey, 2006).

La producción de etanol combustible a partir de diversos cultivos ha crecido significativamente en los últimos años. Los principales productores de etanol combustible en el mundo son los Estados Unidos (52,000 millones de litros) y Brasil (23,220 millones de litros), con una producción total de 84,360 millones de litros en 2011, aproximadamente (Maluenda, 2011). En Europa Occidental, el etanol se produce en menor escala a partir de remolacha y trigo. Su costo es más elevado, dos a cuatro veces más que el costo del etanol brasileño (SENER, 2010). Otros países productores de caña de azúcar que también producen bioetanol como combustible son Colombia, Venezuela, Mozambique y las Islas Mauricio.

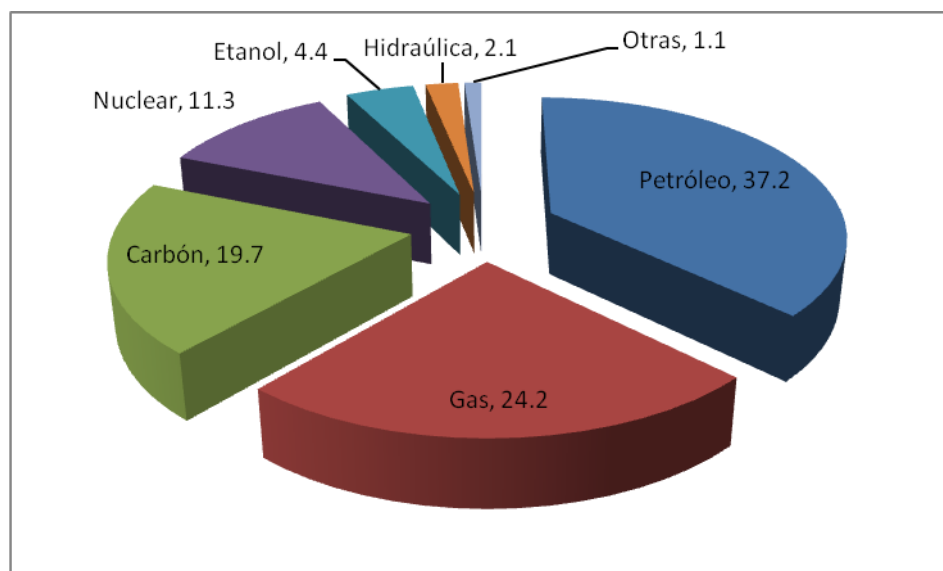
Varios países usan el etanol como oxigenante en diferentes proporciones (3, 5, 6, 10, 20-25%) pero también como componente principal, como es el caso del E85 en los Estados Unidos y Europa y E100 en Brasil.

El etanol modifica algunas de las propiedades de la gasolina cuando se mezclan. Lo que depende del contenido de etanol así como de la composición base de la gasolina (SENER, 2010). Algunos países de América emplean ya una mezcla de etanol con gasolina, México se encuentra en la fase inicial de la producción de biocombustibles, ya que apenas consideran el uso de E-6 en las zonas de gran concentración de población, es decir en las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey (SENER, 2010).

Sin embargo, existe un cuestionamiento referente a este modelo energético por la competencia con la producción de alimentos, así como por el posible desbalance en el uso del agua.

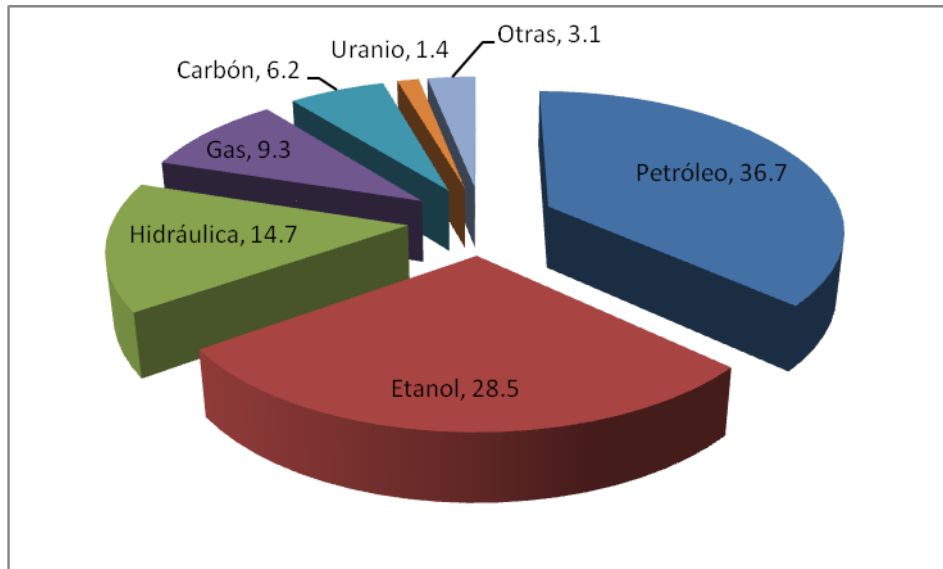
### 2.1.1 La producción de biocombustibles en el mundo

Actualmente, la matriz energética mundial indica que el 81% de la oferta energética a partir del carbón, gas y petróleo (Figura 2.1). Hasta el 2009, la participación de la energía renovable se limitaba al 6% (IEA, 2010). Dentro de ésta, la mayor proporción era por el uso de biomasa tradicional, en especial de leña, que no es una forma apropiada para generar energía por el impacto ambiental que causa cuando se extrae leña de florestas nativas y por la emisión de gases tóxicos cuando se quema en fogones. Las otras fuentes de energía renovable son la hidráulica, los biocombustibles (especialmente el etanol), el carbón vegetal, la energía eólica y la solar.



**Figura 2.1** Matriz energética Mundial  
**Fuente:** IEA, 2010

Como se menciona, algunos países cuentan con avances en el uso de fuentes renovables de energía. Destaca Brasil el cual, tradicionalmente, ha obtenido su electricidad de fuentes hídricas y desde 1974 aplica un programa agresivo de sustitución de gasolina por etanol y de diesel por biodiesel, además de bioelectricidad a partir de biomasa (Decio, 2009). En la Figura 2.2 se presenta la matriz energética brasileña, en la que se demuestra que es posible reducir de forma radical la participación de las fuentes fósiles.



**Figura 2.2** Matriz energética Brasil  
**Fuente:** Decio, 2009

Otros países, muchos de hecho, experimentan dificultades para producir la materia prima para biocombustibles o bioelectricidad. Este aspecto es importante pues desde una visión de sustitución de fuentes fósiles por renovables, la agroenergía representa ventajas comparativas en el corto plazo, por la tecnología más madura, tanto de producción de materia prima, como de procesos de transformación de biomasa en productos energéticos. Pero sin duda su aplicación tiene también retos.

### 2.1.2 Producción de biocombustibles en la Unión Europea

Actualmente, los biocombustibles que se producen en la Unión Europea principalmente son biodiesel y bioetanol; el biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales y el bioetanol de caña de azúcar. Los biocombustibles de segunda generación comienzan a desarrollarse a escala laboratorio y/o experiencias piloto. Éstos se elaboran a partir de nuevas materias primas o procesos complejos.

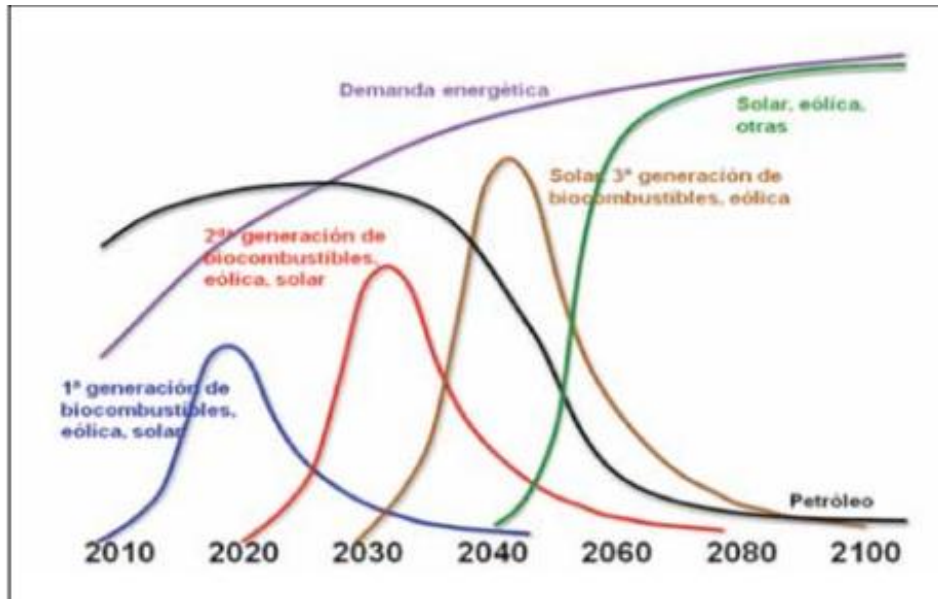
La viabilidad de los biocombustibles se encuentra en la producción sostenible de materia prima, que solamente se puede lograr mediante una buena planeación agroindustrial de los productores de la materia prima (agricultores) y de quienes los transforman.

Como se mencionó, los biocombustibles se obtienen de cultivos de oleaginosas o alcoholígenos convencionales. Pero, las cantidades necesarias para alcanzar las expectativas establecidas por la Unión Europea no pueden cubrirse con las tierras agrícolas disponibles para dichos cultivos (Fernández, 2007). Por este motivo, es necesario buscar nuevas materias primas y tecnologías de transformación, lo que se debe hacer mediante investigación y desarrollo de otros cultivos.

En la actualidad, los biocombustibles de segunda generación están aún en investigación y desarrollo de las primeras plantas piloto. Dado el interés político que hay en la Unión Europea, es de esperar que en un futuro estén disponibles a nivel comercial para la década 2020-2030. Pero para ello, se requiere (Fernández, 2007):

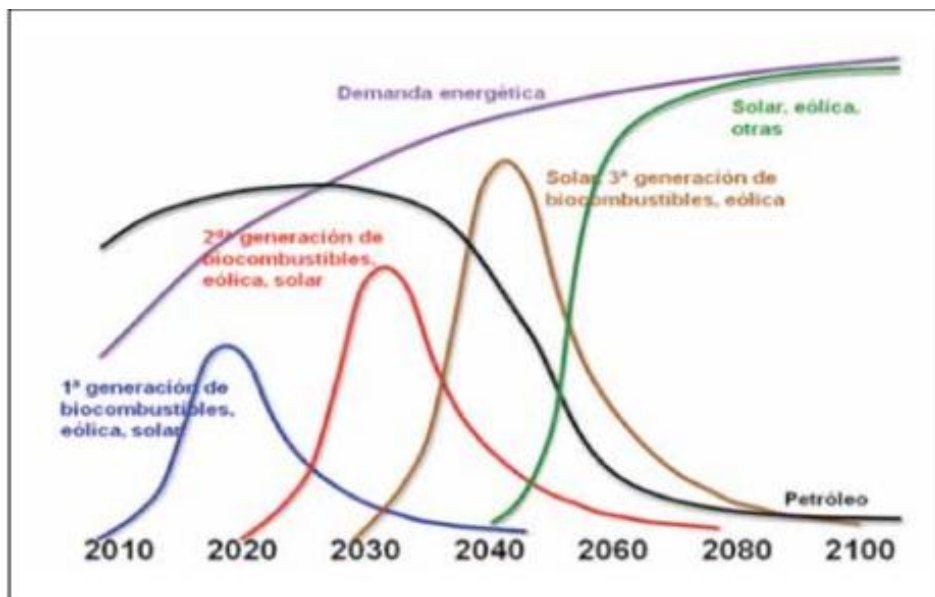
- Mejorar las tecnologías existentes para los biocombustibles de primera generación y construir plantas piloto de biocombustibles de segunda generación.
- Desarrollar plantas comerciales de segunda generación, proyectos piloto de biorefinerías y cultivos energéticos que sean sostenibles.
- Finalmente, producir biocombustibles de segunda generación a gran escala y desarrollar complejos agroindustriales de biorefinerías integrados a la producción de las materias primas (agricultura) y componente de transformación.

En la Figura 2.3 se muestra cualitativamente que la demanda energética seguirá creciendo en forma acelerada hasta mediados del siglo y que se requiere que las fuentes de energía renovable se desarrollen para el 2100. También muestra que por su característica finita, las fuentes fósiles como el petróleo, tendrán un “pico” de producción a mediano plazo, pero que disminuirá a largo plazo.



**Figura 2.3** Línea del tiempo de la evolución de la energía renovable 2010-2100  
**Fuente:** Decio, 2009

La Figura 2.4 indica las proyecciones con escenarios de de los biocombustibles comparando la matriz energética y su participación en la composición de energías renovables. Destaca que los cambios en el tiempo están directamente asociados con el avance tecnológico, vinculado éste con las demandas sociales de eficiencia energética más alta y por optimización de la densidad energética.



**Figura 2.4** Evolución de los biocombustibles durante el siglo XXI  
**Fuente:** Decio, 2009

De acuerdo con los datos mostrados en las figuras 2.3 y 2.4, se puede afirmar que existirán condiciones para que los biocombustibles tengan posiblemente producción máxima a mediados para sufrir una disminución al final del siglo, cuando serán reemplazados por la energía solar y la eólica.

En la actualidad, existe un debate en cómo clasificar a los biocombustibles. Comúnmente se dividen en primera y segunda generación, pero podrían ser clasificados de forma diferente, por ejemplo, dependiendo de la madurez de su tecnología, su emisión neta de CO<sub>2</sub> o la materia prima que utilizan (IEA, 2011). Los biocombustibles pueden ser clasificados de acuerdo con la tecnología de producción en: primera, segunda y tercera generación. El balance de emisiones de CO<sub>2</sub> depende de la materia prima y el proceso empleado. A continuación se hace una breve descripción de acuerdo con Demirbas (2011).

### **2.1.2 Biocombustibles de primera generación**

Los biocombustibles que están actualmente en el mercado son los de primera generación (IEA, 2011). Se producen a partir de caña de azúcar, almidón o trigo y aceite vegetal puro. La materia prima consiste así en azúcar, fécula, cultivos vegetales o en grasas de animales, que en la mayoría de los casos se utilizan también como alimento y forraje. Por ello su empleo es cuestionado por la posibilidad de crear una competencia por tierra, el agua, la producción de alimentos y la fibra.

De los biocombustible de primera generación, el etanol es el más utilizado a nivel mundial, se produce de modo natural mediante la fermentación de azúcares por microorganismos en condiciones ácidas (pH entre 4 y 5). El bioetanol se puede utilizar directamente en algunos motores de combustión o como mezcla. Por ejemplo, una gasolina denominada E10, significa que la proporción de etanol es del 10%.

El biodiesel es el segundo tipo de biocombustible de primera generación más utilizado a nivel mundial. Se obtiene a partir de aceites vegetales procedentes de semillas oleaginosas de una gran variedad de plantas como la soya, la colza, el girasol y la palma, Algunos de los aceites se pueden quemar directamente en motores diesel, pero debido a su combustión incompleta y su alta viscosidad, su uso continuo puede provocar

obstrucciones en los inyectores, por ello se usa en mezcla con el diesel proveniente el petróleo de cuanto más el 20%.

Algunas desventajas que presentan los biocombustibles de primera generación son (Ralph, 2008):

- Proporcionan beneficios limitados en la reducción de gases de efecto invernadero.
- No aportan los supuestos beneficios ambientales que tienen debido a que la materia prima de biomasa no siempre se puede producir en forma sostenible.
- Aceleran la deforestación y tienen efectos del uso indirecto de la tierra.
- En algunas regiones compiten por los escasos recursos hídricos.

### **2.1.3 Biocombustibles de segunda generación**

Los combustibles de segunda generación implican un cambio en la etapa de bioconversión y eliminan el dilema aparente entre combustible y alimentos. En lugar de sólo usar una sencilla extracción de azúcares, almidones o aceites, como se hace en la primera generación, estas técnicas permiten el uso de todas las formas de biomasa lignocelulósica.

Los biocombustibles de segunda generación se derivan de productos agrícolas y forestales distintos de los cultivos alimentarios y aprovechan la lignina, celulosa y hemicelulosa de la planta (FAO, 2008). En esta generación de biocombustibles, los azúcares necesarios para su producción se obtienen a partir de biomasa celulósica en lugar de utilizar productos agrícolas. De este modo, la producción de la biomasa es más sostenible, abundante y no compite al menos en forma directa con cosechas alimenticias. Algunos ejemplos de biomasa celulósica que se pueden usar para producir bioetanol de segunda generación son tallos de plantas, hierbas, maderas, raíces, paja, entre otros (Guerrero *et al.*, 2010).

La biomasa celulósica está compuesta principalmente por celulosa y hemicelulosa, formadas por moléculas de diversos azúcares fuertemente enlazados y lignina, que es un compuesto de fenilpropano que actúa como material adhesivo entre las cadenas de azúcares. La conversión de la biomasa de lignocelulosa en bioetanol requiere

pretratamientos para separar la biomasa anterior en celulosa, hemicelulosa y lignina, así como la hidrólisis de la celulosa y de la hemicelulosa para la producción de azúcares. Posteriormente, la fermentación de los azúcares es necesaria para producir alcohol y la posterior separación del etanol de los co-productos de la fermentación.

El etanol de segunda generación es una alternativa que está siendo considerada como solución para etanol sin conflictos con la producción de alimentos; en la celulosa de residuos agrícolas y de residuos diversos podrá ser convertida en etanol combustible (SENER, 2010).

Las tecnologías de producción para este combustible de segunda generación están en desarrollo y aun hay un gran camino que recorrer para la viabilidad de esta alternativa.

#### **2.1.4 Biocombustibles de tercera generación**

Mientras que en la segunda generación la etapa de bio-conversión es la crítica, para la tercera generación se manifiesta en la fuente de producción de biomasa. En este caso se aprovecha el diseño de cultivos energéticos. Los avances recientes en biología vegetal, la aparición de técnicas de reproducción acelerada y mejoramiento molecular, los rápidos avances en el campo de la genómica, y el diseño clásico de los cultivos transgénicos constituyen un potencial para las plantas que cuentan con propiedades para hacerlas más adecuadas para su conversión en bio-productos.

Los biocombustibles de tercera generación provienen de las algas, y están aún en fase de investigación y desarrollo. En particular se emplean microalgas, dada su alta concentración de lípidos. Una ventaja de las algas es que no compiten directamente con terrenos puramente agrícolas. Así como para el suministro de agua dulce, ya que muchos tipos de algas se pueden cultivar en aguas marinas, aguas de alta salinidad, e incluso en aguas residuales. Un aspecto interesante de las microalgas es que presentan tasas de crecimiento mucho mayores que las de las cosechas agrícolas. Además, se ha comprobado que el suministro de CO<sub>2</sub> aumenta el rendimiento, lo que ha llevado a proponer que el cultivo se usa también para el secuestro de CO<sub>2</sub> (Guerrero *et al.*, 2010).



### **2.1.5 Producción de etanol en México**

Para México, en virtud de sus características de producción agrícola, bajo grado de autosuficiencia alimentaria, la organización social en torno a la producción de maíz y sus generosos trópicos, se considera a la caña de azúcar, a la remolacha azucarera y a la yuca como materias primas prioritarias para la producción de Bioetanol. También, para zonas con problemas de calidad de suelos o de carácter climático, que se reflejan en una baja productividad, se considera como apropiado el cultivo de sorgo. De hecho, la remolacha azucarera se ha cultivado en la región del Mar de Cortés, con propósitos de demostración exitosos, pero actualmente estos esfuerzos están suspendidos. La remolacha forrajera se cultiva en superficies moderadas en las cuencas lecheras de la nación.

En el 2010 en México, la superficie cultivada de caña de azúcar fue de 673,050 hectáreas, las cuales se dividen en cinco regiones cañeras (Centro, Huasteca, Occidente, Sureste y Golfo), dentro de las cuales operan 54 ingenios azucareros en 15 estados de la República (UNC, 2011).

Los ciclos del cultivo de la caña se identifican como “plantillas” para aquéllas de primer corte, con edades de 14 a 18 meses, según variedades tempranas o tardía. Las cañas para el segundo corte se denominan “socas” y “resocas” a las cañas del tercer corte hasta el final de la vida útil del cultivo. En México casi siempre se alcanza siete cortes en ocho años, pero también hay cañas de 20 y hasta 30 años. Naturalmente, los cañaverales disminuyen su producción en función del tiempo transcurrido y por ello ocurren los “volteos” de “cañas viejas” y las nuevas plantaciones.

Además de los aspectos de productividad, la selección de la materia prima para producir etanol debe tomar en cuenta el nivel de conocimiento agronómico, el balance energético (que expresa la relación entre la demanda y la producción energética para una determinada combinación materia prima/ proceso de conversión), la disponibilidad de subproductos de valor económico, los impactos ambientales (a nivel de producción agrícola y industrial) y la competencia con la producción alimentaria. Bajo estos supuestos la caña surge naturalmente como la opción más recomendable para promover en el corto plazo. Alternativa que se refuerza al tener en cuenta la larga experiencia del país con ese

cultivo, insertado hace siglos en la pauta cultural y agronómica mexicana. No obstante, eso no quiere decir que la caña es necesariamente la única opción para producir etanol en México, y que a mediano plazo podrá desarrollar otras posibilidades.

### **2.1.6 Ventajas y desventajas de los biocombustibles**

A través de la fotosíntesis efectuada por la materia prima para la producción de los biocombustibles, se puede promover el consumo de dióxido de carbono y disminuir su concentración en la atmósfera. El etanol de caña de azúcar destaca por ello debido a su elevado rendimiento fotosintético y la gran eficiencia de convertir la caña de azúcar en bioetanol. Así, este combustible reduce de manera significativa los gases de efecto invernadero, en comparación con el derivado fósil de aplicación similar (gasolina).

Según la Secretaría de Energía (SENER), el uso de biocombustibles podría evitar la emisión de 12.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por cada 100 millones de toneladas de caña de azúcar destinadas a la producción de etanol. Es importante mencionar que se estima que la caña de azúcar reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en 90%, mientras que para el maíz son del 30-38%, con remolacha del 35-56% y para la yuca del 63% (SENER, 2008). Además de la reducción de gases de efecto invernadero, existe un beneficio ambiental por la reducción de compuestos que se encuentran presentes en los derivados fósiles y prácticamente ausentes en los biocombustibles.

Por otro lado, una de las desventajas de la producción de biocombustibles es que se requieren grandes extensiones de tierra para la siembra de los cultivos que están ocupadas por selvas, bosques u otros ecosistemas que podrían ser devastados. Además, se requieren insumos agrícolas (maíz, soya, caña de azúcar, trigo, etc.), por lo que el etanol representa competencia real y perjudicial para los alimentos. Uno de los grandes problemas con el agua es la sobreexplotación del recurso para la producción de alimentos.

Otra de las desventajas en la producción de etanol es la gran cantidad de agua que requieren. En este sentido, es importante mencionar que la disponibilidad de agua en muchas regiones es escasa, por lo que su uso representa una competencia para el abasto humano. Para producir un litro de etanol, se requieren miles de litros de agua

(Sánchez, 2009). A continuación se explica brevemente el concepto de la huella hídrica y cómo se calcula el consumo de agua en la producción de etanol.

En México, el debate sobre la viabilidad del uso del etanol para generar la energía del sector del transporte para alcanzar las metas de mitigación de GEI, la diversificación energética y el aumento del empleo en los sectores industriales y rurales, se ha reavivado en los últimos años. En 2008, en la "Ley para la Promoción y el Desarrollo de los Biocombustibles" (LPDB, 2008) se estableció que el uso de biodiesel y etanol en vehículos de motor deben ser implementadas a través de un Programa de Introducción de Biocombustibles publicado en 2009 (SENER, 2009). Este programa establece que el etanol se utiliza como oxigenante de gasolina en una proporción del 6% del volumen, conocida como E6, y tendrá que ser distribuido en tres grandes ciudades: Guadalajara (a finales de 2011), Monterrey y Ciudad de México y su área metropolitana (a finales de 2012). Vale la pena señalar que este programa no considera la producción de caña para la producción de azúcar (García y Manzini, 2011).

## 2.2. Huella hídrica

En 2002, Arjen Hoekstra introdujo el concepto de huella hídrica, la cual se define como el volumen total de agua dulce usado para producir bienes y servicios por una empresa, o bien, consumidos por un individuo o comunidad. El uso de agua se mide como el total del volumen de agua consumido, evaporado o contaminado.

La huella hídrica puede ser azul, verde o gris. La huella hídrica azul se refiere al consumo (pérdida de agua disponible del suelo de la superficie en un área de captación) de los recursos de agua superficial y subterránea. La huella hídrica verde se refiere al consumo de los recursos de agua de lluvia en la medida en que no se pierde por filtración o río abajo. La huella hídrica gris se relaciona con la contaminación y se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes más allá de las concentraciones naturales del lugar y la calidad del agua (Hoekstra *et al.*, 2009).

Es importante mencionar que para este caso sólo se utilizó la huella hídrica azul, esto se debe a que en la zona de estudio se utiliza el agua superficial y subterránea para el riego

agrícola, por lo que se despreció la huella hídrica verde ya que en la región no se ocupa riego por temporal.

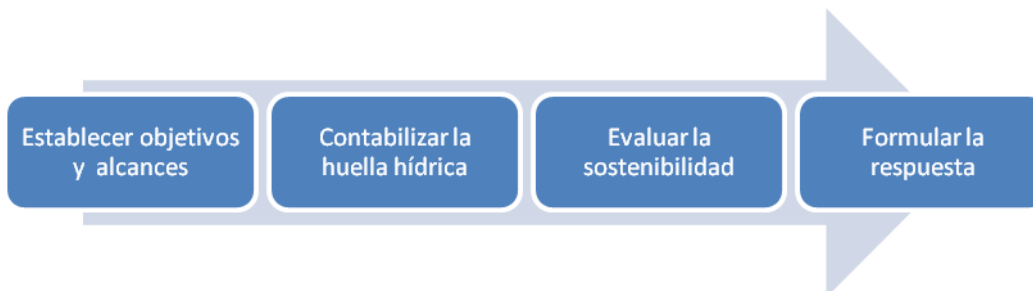
La huella hídrica azul es un indicador de uso consuntivo de agua, es decir, agua dulce de superficie o subterránea. El uso consuntivo del agua se refiere a uno de los cuatro casos siguientes: el agua se evapora; el agua se incorpora a un producto; el agua no vuelve a la misma zona de flujo, es decir, es devuelta a otra zona de captación o al mar; o bien, el agua no vuelve en el mismo período, por ejemplo, si se retira en un periodo seco y devuelve en un período de lluvias. La huella hídrica azul mide la cantidad de agua disponible en el período en que se consume (Hoekstra, 2007).

Es importante mencionar que para procesos agrícolas sólo se muestra la extracción total de agua para riego, para ello se requiere estimar la evapotranspiración del agua de un campo, lo cual no es sencillo. Aun cuando la evapotranspiración total se midiera, se necesitaría estimar qué parte del total de agua es azul. Por lo tanto, este trabajo se basa en modelos de balance de agua que utilizan datos de entrada como el clima, el suelo, las características del cultivo y de riego actual.

### 2.2.1 Evaluación de la huella hídrica

En términos generales, el objetivo de evaluar la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o de productos específicos afectan a las cuestiones de escasez de agua y su contaminación.

Una evaluación de la huella hídrica total está compuesta de cuatro fases distintas (Figura 2.5):



**Figura 2.5** Fases de la evaluación de la huella hídrica  
**Fuente:** Hoekstra *et al.*, 2009

La huella hídrica de un producto se define como la suma de las huellas hídricas de los diferentes procesos adoptados para producirlo teniendo en cuenta toda la producción y la cadena de suministro. Se expresa en términos de volumen de agua por unidad de producto por lo general, m<sup>3</sup>/ton o litro/kg. Por ejemplo, para el caso del etanol, la huella hídrica del biocombustible incluye la producción agrícola de la caña de azúcar así como el proceso de producción del etanol en los ingenios.

A nivel internacional se ha estimado la huella hídrica de 12 diferentes cultivos (Tabla 2.1) en los Países Bajos, Estados Unidos, Brasil y Zimbahue. En los Países Bajos el cultivo que tiene menor huella hídrica es la remolacha azucarera, mientras que el girasol es el que presenta la mayor. En Estados Unidos, el cultivo con menor huella hídrica también es la remolacha azucarera. En Brasil, la papa es la que menor huella hídrica presenta, seguida por la caña de azúcar. Por último, Zimbahue presenta las mayores huellas hídricas en casi todos los cultivos comparada con los otros tres países, siendo la caña de azúcar la que menor huella hídrica tiene.

Cultivo	Países Bajos	Estados Unidos	Brasil	Zimbahue
	m <sup>3</sup> /ton			
Yuca	-	-	156	1,074
Coco	-	-	444	1,843
Algodón	-	2,414	1,710	6,359
Cacahuete	-	477	426	2,100
Maíz	153	308	664	3,363
Aceite de Palma	-	-	1,502	
Papas	72	111	106	225
Soja	-	979	602	1,360
Remolacha azucarera	51	88	-	-
Caña de azúcar	-	153	128	160
Girasol	481	1,084	972	2,503
Trigo	150	1,388	1,360	1,133

**Tabla 2.1** Huella hídrica de 12 cultivos en cuatro países  
Fuente: Gerbens-Leenes, et al., 2009

Estados Unidos, el mayor productor de etanol a partir de maíz, utiliza de 5 – 2,138 L agua/L etanol (Chiu *et al.*, 2009), existe una variabilidad dependiendo del estado en donde se produzca el etanol, ya que depende del clima, y de qué tipo de riego se ocupe, o bien, si es por riego de temporada.

Los principales países productores de etanol son Estados Unidos, Brasil, China, India y Tailandia. Es importante resaltar que en México aún no se produce etanol.

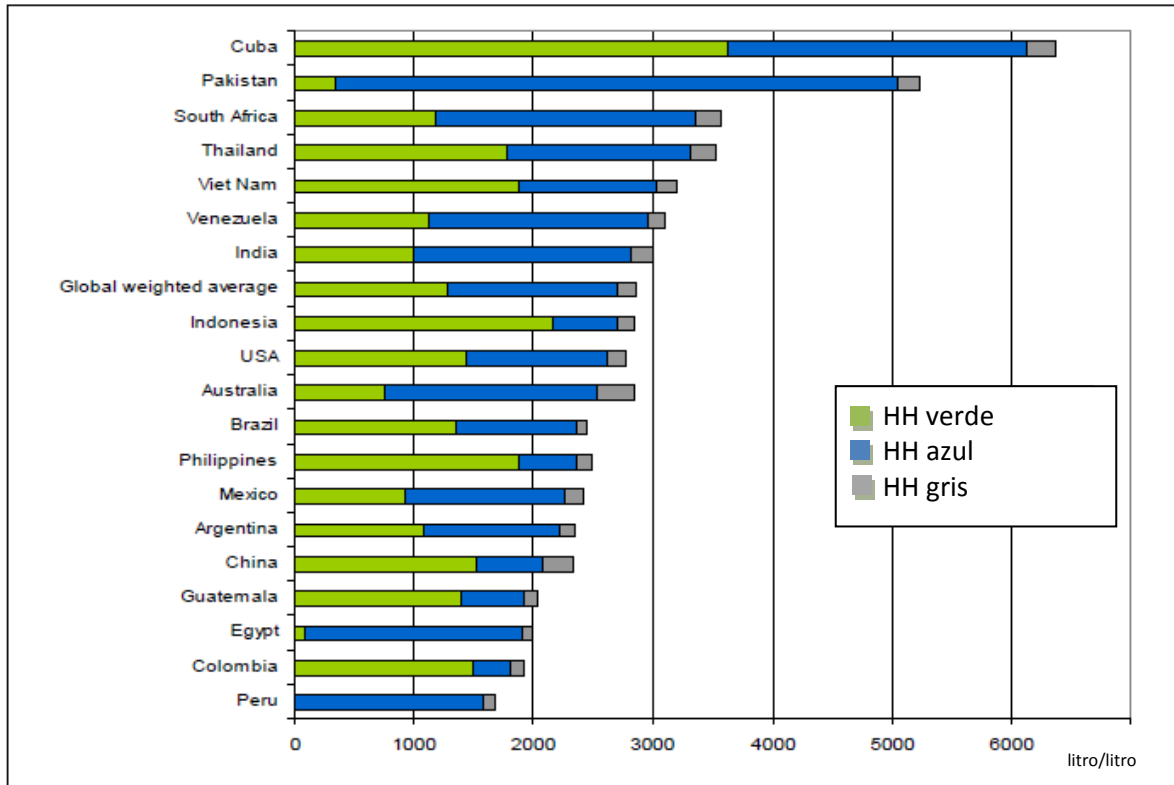
País	Contribución mundial de la caña de azúcar (%)	Contribución mundial de azúcar (%)	Contribución mundial de la producción de etanol (%)	Materia prima para la producción de etanol
Brasil	30	24	32	Caña de azúcar
India	21	17	1	Caña de azúcar
China	7	9	3	Maíz, cultivos de azúcar
Tailandia	4	6	1	Caña de azúcar
Pakistan	4	3	-	-
México	4	5	-	-
Colombia	3	2	-	-
Australia	3	5	-	-
Estados Unidos	2	3	43	Maíz
Indonesia	2	2	-	-

**Tabla 2.2** Producción mundial de caña de azúcar, azúcar y etanol

Fuente: Gerbens-Leenes *et al.*, 2009

El mayor productor de etanol es Estados Unidos (Tabla 2.2), con un 43%, el etanol en este país es hecho a partir de maíz, el segundo productor es Brasil con un 32% y se produce a partir de caña de azúcar. Asimismo, se puede ver que la mayoría del etanol que se produce a nivel mundial se produce a partir de caña de azúcar y que del total de etanol que se produce en el mundo, el 75% es producido por Estados Unidos y Brasil.

En la figura 2.6 se muestra la huella hídrica total de los principales países productores en el mundo. Se puede observar que Cuba es el país que tiene la mayor huella hídrica, mientras que Perú es el que presenta la menor huella hídrica; también se puede ver que México es de los que tienen menor huella hídrica en producción de caña de azúcar.



**Figura 2.6** Huella hídrica del etanol de caña de azúcar en los principales países productores

Fuente: Gerbens-Leenes *et al.*, 2009

Mekonnen y Hoekstra realizaron un estudio en donde estimaron la huella hídrica de los principales cultivos: trigo, maíz, arroz, manzana, soya, caña de azúcar, café y algodón. Estimaron la huella hídrica global, con riego y de temporal. En la tabla 2.3 se muestra la huella hídrica de los principales cultivos con riego.

Cultivo	Huella hídrica azul [m3/ton]
Caña de azúcar	104
Maíz	294
Arroz	464
Trigo	926
Algodón	2227

**Tabla 2.3** Huella hídrica de diferentes cultivos

Fuente: Mekonnen y Hoeksta, 2010

Se puede observar (Tabla 2.3) que la caña de azúcar consume menor cantidad de agua que los demás cultivos, mientras que el algodón consume demasiada agua, así como el maíz, que consume casi el doble de agua que la caña de azúcar.

En cuanto a la cantidad de agua que consumen los biocombustibles, se puede concluir que utilizan una mayor cantidad de agua que otras formas de energía; que la remolacha azucarera es el cultivo energético más eficiente en uso de agua, seguido por la caña de azúcar y que existen grandes diferencias del consumo de agua en los biocombustibles entre países y regiones.

Cabe señalar que en la mayoría de los estudios realizados para estimar la huella hídrica de los biocombustibles utilizan el método de Hoekstra; sin embargo, existe un estudio realizado por Fingerman *et al.* (2010) en donde utilizaron una ecuación muy parecida a la que usó Hoekstra, la cual es la sumatoria de la evapotranspiración de un cultivo multiplicada por el cociente del rendimiento del cultivo en el país entre el rendimiento de California. En cuanto a la evapotranspiración, todos los estudios la calculan con el método de Penman-Monteith propuesto por la FAO.

Para poder estimar la huella hídrica del cultivo de la caña de azúcar, se requiere primero calcular la evapotranspiración del cultivo, lo cual se describe en el siguiente apartado.

### **2.3 Evapotranspiración (ET)**

La evapotranspiración es un componente fundamental del balance hídrico y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera.

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 líquida o sólida 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, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de los estomas situados en las hojas. Por tanto, la evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde una superficie vegetal a la atmósfera (Domingo *et al.*, 2002).



La evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir como son el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetativo de la planta.

## **2.4 Escenarios de cambio climático**

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, lo que se observa tanto en los incrementos de los promedios globales de las temperaturas del aire y de los océanos, como en el derretimiento de nieve y hielo y en la elevación del nivel medio del mar (Conde y Gay, 2008). Por lo anterior, resulta necesario analizar las consecuencias que ese calentamiento podría causar en el clima a escalas regionales y locales, así como las repercusiones que implicaría en todos los aspectos del desarrollo de un país como el nuestro.

Según el cuarto informe de evaluación de cambio climático (AR4) ahora hay mayor confianza (90%) de que el calentamiento observado es debido al aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a acciones humanas. La temperatura global ha aumentado 0.74 grados centígrados en los últimos 100 años y la tendencia de calentamiento de los últimos 50 años es de 0.13 grados por década (Gay *et al.*, 2008). Se han registrado numerosos cambios en el clima. Estos cambios incluyen los posibles aumentos en la intensidad de los ciclones tropicales, en las ondas de calor y en la intensidad y frecuencia de eventos extremos como sequías y lluvias torrenciales.

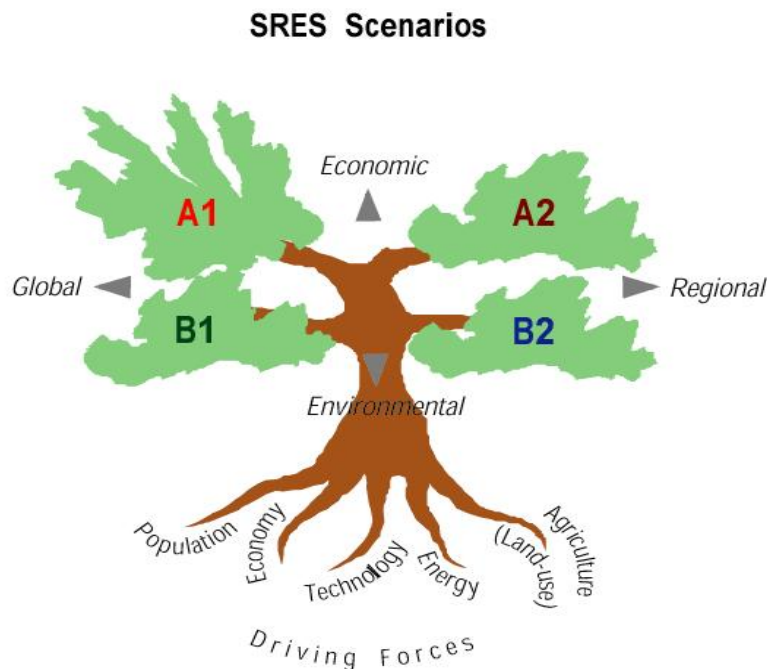
De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), los escenarios climáticos se definen como “una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias de cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto” (IPCC, 2007).

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima es el conjunto de Modelos de Circulación General (GCM) de Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCMs). Estos modelos, basados en las leyes fundamentales de física, simulan una gran variedad de los procesos que ocurren, en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos. Dichos modelos poseen

resoluciones espaciales variadas que se han refinado en el transcurso del tiempo y que permiten su aplicación a escalas regionales.

Para elaborar los escenarios de cambio climático es necesario el uso de escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , entre otros). El IPCC utiliza el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES); a partir de los escenarios de emisiones es posible estimar las concentraciones globales y el forzamiento radiativo correspondiente, lo que lleva a una proyección del incremento de temperatura global. Estos escenarios consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos 100 años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía.

Hay dos grandes familias de escenarios. Los escenarios "A" describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los "B" ese crecimiento es más moderado (Figura 2.7). Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2, se considera que el desarrollo se dará más a nivel regional. Estos escenarios parten de un conjunto de suposiciones acerca de la evolución de los forzantes (población, tecnología, economía, uso del suelo, agricultura y energía) a nivel global y regional (Nakicenovic, 2000).



**Figura 2.7** Escenarios de cambio climático  
**Fuente:** Nakicenovic, 2000

#### **2.4.1 Fuentes de información para generar escenarios de cambio climático (Pacific Climate Impacts Consortium)**

En los estudios de variabilidad y cambio climático se requiere seleccionar las regiones de estudio, los sectores por analizar y el marco temporal. Los estudios pueden realizarse a escala local, regional, estatal, por país o global. En general, se espera que los resultados permitan realizar evaluaciones de posibles impactos del cambio climático en regiones definidas como: a) unidades administrativas (distritos, municipios, estados), b) unidades geográficas (como cuencas, planicies, lagos), c) zonas ecológicas (bosques, manglares), d) zonas climáticas (desiertos, zonas de monzón), d) regiones sensibles (costeras, nichos ecológicos, comunidades marginales). Los datos climáticos se pueden requerir a nivel diario, mensual o anual, y se espera en cualquier caso que se cuente con 30 años de datos o más para que sean representativos de las condiciones climáticas promedio (Conde y Gay, 2008).

Para realizar los estudios de cambio climático se requiere contar con bases de datos climatológicas para poder contrastar y/o añadir los cambios climáticos propuestos. Estas bases se denominan escenarios base o líneas base.

Arthur Douglas, de la Universidad de Creighton, Nebraska, agrupó en 18 renglones los promedios de temperatura (92 puntos) y precipitación (279 puntos) de más de 30 años, incluyendo el periodo de 1950 a 1980, considerando la densidad de localización de las estaciones meteorológicas, altitud y precipitación análoga de la base de datos (SEMARNAP, 1997). La regionalización de Douglas permite contar con una base de datos de las variables climáticas básicas para los estudios de cambio climático. Dicha base de datos tiene las siguientes ventajas para los estudios de vulnerabilidad y cambio climático:

- permite hacer estudios a nivel país y/o regionales,
- es pública,
- es confiable.

Para esas 18 regiones se generaron las salidas para 20 AOGCMs, para cuatro escenarios de emisiones (A1B, A2, B1, B2), y diferentes horizontes de tiempo (2030, 2050 y 2080).

Para la generación de escenarios de cambio climático correspondientes a las regiones de Douglas se utiliza la herramienta de análisis del Pacific Climate Impacts Consortium

(PICC) de Canadá, la cual está disponible en la página <http://www.pacificclimate.org/tools/select>.

Con esta herramienta es posible obtener todos los escenarios reportados en el AR4 para regiones específicas de México y permite establecer polígonos para regiones de interés. Esta herramienta cuenta con lo siguiente:

- Define una región y genera mapas, gráficas y datos de ella.
- Los mapas generados muestran la región de uno o más GCM, mostrando la respectiva rejilla.
- Se genera una base de datos de la región para todos los GCM seleccionados, con la opción de desplegar los percentiles a través de ellos.
- Se puede graficar una variable contra otra para cada ensamble.
- Grafica la variable sobre un periodo de tiempo para cada ensamble.
- Despliega boxplot para cada climatología futura sobre cada ensamble.

Así, la página citada nos permite seleccionar las regiones, construir mapas base (periodo 1961-1990) o mapas de cambio de las variables: temperatura media, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad específica, radiación solar Incidente, cubierta nubosa, humedad del suelo, presión media a nivel del mar, humedad relativa, temperatura de superficie, contenido de humedad del suelo, profundidad de nivel, altura geopotencial, derretimiento de nieve. También nos permite generar las bases de datos de los escenarios base y de cambio mensuales, estacionales o anuales (Conde y Gay, 2008).

Es importante mencionar que la información del clima adquiere un alto valor cuando se le considera en la planeación o en la toma de decisiones. El ejemplo más importante en cuanto al uso de información climática se tiene en el sector agua. El cambio en la disponibilidad de este recurso es un problema importante, pues se ha vuelto recurrente el paso de periodos de secas a periodos de inundaciones. Parte del problema radica en que la información climática sólo se utiliza para explicar los desastres y no para prevenirlos. El riesgo de crisis severas en el sector agua podría acentuarse bajo condiciones de cambio climático.

Dentro de los grandes foros de análisis del clima, como el IPCC, se discute que aun y cuando se determine la predictibilidad de las variaciones interanuales del clima, ésta no necesariamente determina la confianza que se tenga en las proyecciones de cambio climático. La razón principal está en que el forzante que determina unas y otras es diferente. Ejemplos de forzantes son la temperatura de superficie del mar, las anomalías en la humedad del suelo, los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero o las condiciones de uso de suelo. Mientras que en la variabilidad interanual del clima, es la temperatura de superficie del mar o la humedad del suelo el forzante principal; en el cambio climático los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero y los cambios en el albedo son los forzantes clave. Es por ello que las proyecciones de cambio climático global y regional consideran la incertidumbre de las variaciones en las forzantes determinadas por factores incluso de orden socioeconómico para proyectar las variaciones del clima futuro.

### **3. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe la metodología empleada en el presente trabajo. En primera instancia se describe el sitio de estudio. En seguida, los procedimientos usados para estimar la huella hídrica, la evapotranspiración, la demanda total de agua para riego y para la zona de estudio de Tamazula, la disponibilidad de agua, y por último las proyecciones de las variables climáticas con escenarios de cambio climático.

#### **3.1 Descripción del sitio**

Tamazula de Gordiano se localiza en el centro-oeste del país, en el estado de Jalisco en el municipio denominado Tamazula de Gordiano. En este municipio se encuentra el ingenio azucarero de grupo Saenz, el cual cuenta con caña sembrada en 15,500 hectáreas, con un rendimiento promedio de 110 ton/ha. En el 2010 la fábrica de alcohol etílico produjo 1,944,155 L de alcohol en 75 días que estuvo en operación.

El municipio de Tamazula de Gordiano se encuentra ubicado en la región sur del Estado de Jalisco, entre la latitud norte a 19 grados 41 minutos, longitud oeste a 103 grados y 15 minutos y a una altitud de 1120 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una extensión territorial de 1,326.44 km<sup>2</sup>; 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.





Figura 3.1 Tamazula, Jalisco  
Fuente: SIEG, 2001

Hidrologicamente, predominan en la región los manantiales en una proporción de casi ocho veces más en comparación con los aprovechamientos de agua subterránea. Además existen acuíferos locales restringidos en zonas fracturadas y que se extienden en ciertos trechos por el intemperismo. Los acuíferos están en rocas efusivas basálticas e intrusivas asociadas. En estas zonas la permeabilidad es buena, el agua de buena calidad, aunque en ocasiones con contenido de sílice. La profundidad de los pozos varía con la zona. En Concepción, La Manzanilla de la Paz y Mazamitla es de 250 a 300 m; en Quitupan, Tecalitlán y Valle de Juárez oscila entre 180 y 250 m; y en Tamazula es del orden de 80 a 120 m. Por el contrario, en Jilotlán, Pihuamo y Santa María del Oro no es factible el alumbramiento mediante pozos.

Tamazula tiene una población de 109,166 habitantes, la región concentra un 1.62% de la población total del Estado de Jalisco, correspondiéndole en razón de su superficie una densidad de 15.32 habitantes por km<sup>2</sup> (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, bosques de pino y encino.

Cabe mencionar, que el ingenio de Tamazula es un ingenio modelo. Cuenta con un laboratorio en donde desarrollan distintas variedades de caña y hacen pruebas para encontrar las más eficientes; además, no producen desperdicios, ya que todo lo reutilizan. Un ejemplo es la actividad de lombricultura con el fin de utilizar el producto como abono. También es importante decir que cuentan con tres sistemas de riego: por inundación, por aspersión y por goteo. La mayor parte de las tierras son regadas por inundación (50%), sin embargo, se ha de incrementado el área regada por aspersión y goteo, por ser sistemas más eficientes. Asimismo, el ingenio es uno de los que tiene mejores rendimientos a nivel nacional (ver tabla 3.1) y es uno de los pocos que cuentan con fábrica para producir alcohol.



Estado	Ingenio	Área sembrada (Ha)	Alcohol producido (L)	Rendimiento (Ton/ha)
Chiapas	Pujilic	16,800	7,665,395	90
Jalisco	Tamazula	15,500	1,944,155	110
Tamaulipas	Arón Sáenz	13,819	3,195,965	79
Veracruz	San Nicolás	11,147	5,196,380	56

**Tabla 3.1** Comparativo de algunos ingenios del país  
**Fuente:** Elaboración propia con datos de Cañeros de México

Es importante mencionar que dentro de las tierras cultivadas hay dos estaciones meteorológicas que proporcionan datos de temperatura y precipitación, las cuales son: Contla (14034) e Ingenio (14141). También hay tres estaciones agroclimatológicas en la zona de estudio, que son: 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.

### 3.2 Cálculo de la huella hídrica del cultivo

El sector agrícola es el principal consumidor de agua. La huella hídrica de un cultivo se expresa en metros cúbicos por tonelada (m<sup>3</sup>/ton), lo que equivale a un litro por kilogramo (L/kg). El componente de la huella hídrica del proceso de crecimiento de un cultivo (HH) se calcula como el uso de agua en los cultivos (CWU) dividido entre el rendimiento del cultivo (Y), como se aprecia en la ecuación 1.

$$HH = \frac{CWU}{Y} \dots\dots\dots (1)$$

donde:

- Y [ton/ha] es el rendimiento del cultivo
- CWU [m<sup>3</sup>/ha] es la cantidad de agua que se requiere para el crecimiento de un cultivo y se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$CWU = 10 \sum_{d=1}^{gp} ET \dots\dots\dots (2)$$

ET es la evapotranspiración de agua. El factor de 10 convierte la profundidad del agua medida en mm a volúmenes de agua de superficie en m<sup>3</sup>/ha. La suma se realiza en el

período comprendido entre el día de siembra (día 1) hasta el día de la cosecha ( $gp$  es igual a la duración del período de crecimiento en días).

Se estimó la demanda de agua de la caña de azúcar y por la producción de etanol, esto se llevó a cabo mediante la ecuación de la huella hídrica desarrollada por Hoekstra (ec. 1), esto es, el cociente de la cantidad de agua que requiere el cultivo (CWU) entre el rendimiento del mismo ( $Y$ ). Para realizar el cálculo de la cantidad de agua que requiere el cultivo (ec.2) se sumó la evapotranspiración del cultivo ( $ET_0$ ) desde el día uno de siembra hasta el día de cosecha, y se multiplicó por 10, el cual sólo es un factor de conversión. El valor que se usó para el rendimiento del cultivo fue de 110 [ton/ha], uno de los mejores rendimientos a nivel nacional, este dato fue proporcionado por personas que trabajan en el ingenio.

### **3.3 Cálculo de la evapotranspiración del cultivo**

Como se mencionó anteriormente, para estimar la huella hídrica es necesario conocer la evapotranspiración del lugar, esto se hizo con base en la ecuación de Penman-Monteith (ec. 3). Para llevar a cabo éste cálculo, se usaron datos de temperatura media, máxima y mínima, precipitación, velocidad del viento y radiación solar, entre otros. Para ello, se inició considerando algunos aspectos y características de los datos que son de suma importancia, tales como: tipo de datos, disponibilidad, disposición, forma de acceso y cantidad.

Se utilizaron datos de la estación agroclimatológica Tamazula, ubicada dentro del ingenio a una latitud de  $19^{\circ}42' 12.43''$ , a una longitud de  $103^{\circ}13'53.17''$  y a una altitud de 1152 msnm. Los datos de dicha estación están disponibles en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). La estación Tamazula cuenta con datos a partir de 2008, sin embargo, existen periodos en los que no se cuenta con información, por lo que se usó el año 2010 por contar con más datos para el cálculo de la Evapotranspiración y de la huella hídrica. Los datos que fueron obtenidos en la estación Tamazula son: temperatura promedio, mínima y máxima, precipitación, velocidad del viento y humedad relativa. Otros datos como la constante psicométrica y la radiación solar diaria fueron proporcionados por tablas (FAO, 2006). La radiación extraterrestre fue

calculada multiplicando la radiación diaria por 0.75, es lo que recomienda el manual de la Evapotranspiración de la FAO (2006).

### 3.3.1 Método de Penman-Monteith

La ecuación principal se usó para calcular la evapotranspiración de 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 0.12m, 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 0.08m, una resistencia de la cubierta vegetal ( $r_{cv}$ ) de 70s/m y un albedo igual a 0.23. De acuerdo con la FAO (2006), la ecuación de la evapotranspiración es la siguiente:

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

donde

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

$\lambda$ : calor latente de vaporización ( $MJ\ kg^{-1}$ )

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

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

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

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

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

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

$\gamma$ : constante psicrométrica ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ )

$r_s$  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 ( $\rho_a$ ), el calor específico del aire ( $c_p$ ), el calor latente de vaporización ( $\lambda$ ), la pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire ( $\Delta$ ), 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 4-17 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:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \dots\dots\dots (4)$$

donde

$u_2$ : velocidad del viento medida a dos metros de altura.

$$\rho_a = \frac{P}{T_{kv}R} \dots\dots\dots (5)$$

donde

P: presión atmosférica (kPa).

$T_{kv}$ : temperatura en Kelvin

R: constante específica del gas

$$C_p = \frac{\gamma \epsilon \lambda}{P} \dots\dots\dots (6)$$

donde

$\gamma$ : constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

$\epsilon$ : relación entre el peso molecular del aire húmedo y el aire seco. Su valor es 0,622.

$\lambda$ : calor latente de evaporación (MJ kg<sup>-1</sup>).

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

donde

T: temperatura promedio del aire (°C).

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

donde

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

$$0.6108 \frac{(17.27 T)}{T+273.3} \dots\dots\dots (9)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \dots\dots\dots (10)$$

donde

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

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

Siendo:

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s \dots\dots\dots (11)$$

donde

$\alpha$ : albedo

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

Y,

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

donde

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ).

$T_{\text{máx.}}$ , K: temperatura máxima del día ( $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ ).

$T_{\text{mín.}}$ , K: temperatura mínima del día ( $K = ^\circ\text{C} + 273,16$ ).

$e_a$ : presión de vapor actual (kPa).

$R_s$ : radiación solar diaria ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

$R_{s0}$ : radiación solar para un día sin nubes ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

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

donde

$e^0(T_{\text{máx.}})$ : presión de vapor de saturación a temperatura máxima (kPa), Siendo:

$$e^0(T_{\text{máx.}}) = 0.6108 \frac{17.27 T_{\text{máx.}}}{T_{\text{máx.}} + 273.3} \dots\dots\dots (14)$$

$Hr_{\text{mín.}}$ : humedad relativa mínima diaria (%).

$e^0(T_{\text{mín.}})$ : presión de vapor de saturación a temperatura mínima (kPa), Siendo:

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

$Hr_{\text{máx.}}$ : humedad relativa máxima diaria (%).

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

donde

$z$ : altura sobre el nivel del mar en que se encuentra la estación (m).

$R_a$ : radiación extraterrestre para periodos diarios ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ).

$$G=0.1(T_i-T_{i-1})\dots\dots\dots (17)$$

donde

$T_i$ : temperatura promedio del aire del día actual (°C).

$T_{i-1}$ : temperatura promedio del aire del día anterior (°C).

Los valores que se utilizaron para realizar dicho cálculo se presentan en la tabla 3.2.

Símbolo	Nombre	Unidades	Valores
Y	Rendimiento del cultivo	ton/ha	110
$\lambda$	Calor latente de vaporización	MJ/kg	Min=2 max=3 $\mu$ =2
$\Delta$	Pendiente de la curva que relaciona la presión de vapor con la temperatura del aire	Kpa/°C	Min=0.009 max=0.05 $\mu$ =0.03
$R_n$	Radiación neta en la superficie del cultivo	MJ/m <sup>2</sup> d	Min=15 max=23 $\mu$ =20
G	Flujo térmico del suelo	MJ/m <sup>2</sup> d	Min=-2 max=2 $\mu$ =-0.0014
$\rho_a$	Densidad del aire seco a presión constante	Kg/m <sup>3</sup>	Min=1 max=1 $\mu$ =1
$c_p$	Calor específico del aire	MJ/kg°C	Min=0.0009 max=0.001 $\mu$ =0.001
$\gamma$	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 $\mu$ =210
$u_2$	Velocidad del viento	m/s	Min=0 max=3 $\mu$ =1
T	Temperatura promedio	°C/d	Min=13 max=25 $\mu$ =19
z	Altura sobre el nivel del mar	m	1152

**Tabla 3.2** Valores utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia  
**Fuete:** FAO, 2006

La evapotranspiración de referencia se multiplicó 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 procedió a calcular la huella hídrica por medio de la ecuación (1), para posteriormente estimar la demanda de agua para riego, la cual se muestra a continuación.

### **3.4 Estimación de la demanda total de agua para riego**

La demanda de agua para la producción agrícola se dividió en tres partes considerando a los tres diferentes tipos de riego (inundación (50%), aspersión (25%) y goteo (25%) que se utilizan en la región. Para llevar a cabo la estimación de la demanda total de agua, se multiplicó la huella hídrica obtenida ( $98 \text{ m}^3/\text{ton}$ ) por el rendimiento del cultivo ( $110 \text{ ton/ha}$ ) y posteriormente se multiplicó por el número de hectáreas regadas bajo los tipos de riego.

### **3.5 Estimación de la demanda de agua total en Tamazula**

Para estimar la demanda de agua en Tamazula, primero se estimó la demanda de agua de la población. Para ello se consideró un consumo de agua por parte de la población de  $150 \text{ L/hab/día}$  (Aparicio, 2006). Posteriormente se estimó la demanda de agua por la producción de etanol, a partir de datos de la literatura ( $1.8 \text{ m}^3/\text{ton}$ ) ya que no se cuenta con datos para México. Para hacer dicha estimación se multiplicó el consumo de agua de  $1.8 \text{ m}^3/\text{ton}$  por el número de toneladas procesadas en el año 2010 que fue de 1,169,612 toneladas de caña de azúcar (UNC, 2011). Finalmente, para estimar la demanda de agua total en la región, se sumaron la demanda de agua para riego, de la población y de la producción de etanol.

Una vez calculada la demanda de agua total en Tamazula, se procedió a realizar la estimación de la disponibilidad en la región. A continuación se describe como se estimó la disponibilidad de agua en Tamazula.

### **3.6 Disponibilidad del agua y balance regional**

La disponibilidad de agua actual y bajo escenarios de cambio climático se estimó para evaluar el impacto que tiene la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar y la producción de etanol en los recursos hídricos de la región.

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 el 75% de la precipitación (CONAGUA, 2011).

Para estimar la evapotranspiración en el sitio de estudio, se seleccionó el método de evapotranspiración de Turc (Aparicio, 1997), debido a que éste relaciona los datos disponibles en las estaciones meteorológicas (temperatura y precipitación). Éste es un método sencillo basado en la temperatura y la precipitación. La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \dots\dots\dots (18)$$

donde

P es la precipitación media anual (mm), L es una función de la temperatura (T°C), y se calcula con:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \dots\dots\dots (19)$$

Una vez estimada la evapotranspiración por el método de Turc (ecuación 18), se evaluó la disponibilidad de agua mediante un balance hídrico.

El análisis del balance hídrico se basó en aplicar el principio de conservación de masas, también conocido como la ecuación de continuidad. Ésta establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural o cualquier masa de agua, contiene los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, realmente recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales o subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera. Las salidas de la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua (E) y la salida de las

corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada. Cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación.

Es importante mencionar que la ecuación del balance hídrico podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objeto del cálculo, del tipo de masa de agua, de las dimensiones de la masa de agua, de sus características hidrográficas e hidrológicas, de la duración del balance, y de la fase del régimen hidrológico para el cual se calcula el balance hídrico.

En esta tesis, se utilizó la ecuación (20) para estimar la disponibilidad del agua. En la ecuación no se tomó en cuenta el volumen comprometido, ya que no se cuenta con datos de las entradas y salidas de las cuencas:

$$\text{Disponibilidad del agua} = (\text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración}) \cdot \text{área} \dots \dots \dots (20)$$

Es importante mencionar que la evapotranspiración de un cultivo es diferente a la de una zona, ya que para el cálculo de la evapotranspiración de una zona se toman en cuenta áreas cubiertas con otro tipo de vegetación así como en áreas urbanas.

Una vez analizados diferentes modelos para el cálculo de la evapotranspiración, se eligió el método de Turc, ya que éste se adecua a las características de la zona de estudio, además de que las variables de entrada al modelo son temperatura y precipitación, las cuales están disponibles en la base de datos con la que se cuenta (CLICOM). Para ello, se llevó a cabo una revisión de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona de estudio. Se encontraron cuatro estaciones, dos de las cuales dejaron de funcionar desde 1970, las otras aún están en funcionamiento y son: 14141 Ingenio, cuya ubicación está a una latitud de 19°41', a una longitud de 103°15' y a una altura de 1140 msnm y 14024 Contla ubicada a una latitud de 19°45', a una longitud de 103°11' y a una altura de 1583 msnm. Los datos de estas estaciones proporcionan temperatura promedio, mínima y máxima, así como de precipitación diaria, se usaron para un análisis detallado de cada una de las estaciones, se compararon los datos de temperatura y precipitación por año de cada una y se llegó a la conclusión que existe muy poca diferencia entre los

datos de una y otra, por lo que se decidió trabajar con la estación 14034 Contla. Posteriormente, se aplicó el modelo de Turc (ec.18) para obtener la evapotranspiración de la zona de estudio, una vez teniendo el resultado de la evapotranspiración, se procedió a realizar el cálculo de la disponibilidad de agua (ec. 20), esto es, la precipitación por el área de la zona de estudio, menos la evapotranspiración por área. El área de la zona de estudio es de 1,324.48 km<sup>2</sup> (CEA, 2011).

Por otro lado, se calculó el índice de estrés de la región (ec. 21) el cual sirve para saber si en la región estudiada hay o no presión sobre el recurso hídrico. De acuerdo con la literatura un valor del índice de estrés menor a 10% significa que no hay presión sobre el recurso, si es de 20% a 40% existe un grado medio de presión y si es mayor a 100% es muy alto (CONAGUA, 2011).

$$\text{Índice de estrés} = \frac{\text{Demanda total del agua}}{\text{Agua disponible}} \dots\dots\dots (21)$$

Una vez obtenidos los resultados de disponibilidad de agua, huella hídrica y evapotranspiración, se hicieron las proyecciones de temperatura y precipitación con cambio climático.

### 3.7 Proyecciones con cambio climático

Para llevar a cabo las proyecciones con cambio climático, es necesario crear una línea base a partir de la cual se realizan las proyecciones de disponibilidad de agua, la cual está en función de la temperatura y precipitación.

La línea base se creó a partir de los datos de temperatura y precipitación obtenidos con dato de la estación meteorológica 14034 Contla. Para ello, se promediaron mensualmente tanto la temperatura como la precipitación del periodo 1980-2007, debido a que son los años con los que se cuenta con datos completos. Cabe señalar que CONAGUA cuenta con una línea base por estación. Se llevó a cabo una comparación entre la línea base estimada en este trabajo y la que proporciona CONAGUA, los resultados son prácticamente los mismos y se decidió utilizar la línea base estimada.

Los cambios en la temperatura y precipitación en los diferentes escenarios se calcularon con la herramienta del Pacific Climate Impacts Consortium. Este es el programa disponible en internet, en el cual se ingresan datos de la zona de estudio como latitud y longitud y arroja las variaciones de temperatura y precipitación proyectadas para tres horizontes (2020, 2050 y 2080). Para ello, se identificó la región de Douglas a la cual pertenece la zona de estudio, que en este caso fue la región número siete. Se eligieron los escenarios ECHAM5 y GFDL para este estudio, ya que estos modelos son los que se utilizan para México, debido a que son los que representan mejor el clima esperado a nivel regional y son los recomendados por los especialistas del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Una vez obtenidas las variaciones de temperatura y precipitación, se incorporan a la línea base y se procede a hacer la proyección con dichos cambios. Se hace la suma o resta, dependiendo del caso, de la temperatura y precipitación en los valores que se obtuvieron de la línea base. Una vez hechas las proyecciones de temperatura y precipitación, se calculó la disponibilidad de agua en la zona de estudio con los incrementos de temperatura y los cambios en la precipitación. También se realizó este procedimiento para la estimación de la huella hídrica, en donde se hicieron los cambios respectivos en cuanto a las variaciones de temperatura y precipitación proyectadas.

## **4. RESULTADOS**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en este trabajo, los cuales fueron estimados para el año 2010 y proyectados para los horizontes 2020 y 2050. En primer lugar, se presenta la estimación de la huella hídrica y la evapotranspiración de un cultivo. Posteriormente, la estimación de la demanda total para riego así como la demanda total de agua para Tamazula y la disponibilidad de agua en la región. En seguida, las proyecciones bajo escenarios de cambio climático. Por último, el análisis de la demanda de etanol en México y la producción de caña de azúcar.

### **4.1 Estimación de la huella hídrica**

Para la estimación de la huella hídrica se requiere estimar la evapotranspiración del cultivo. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

#### **4.1.1 Estimación de la evapotranspiración del cultivo**

El comportamiento de la precipitación en la zona de estudio de acuerdo con los datos de la estación meteorológica 14141 (CLICOM) varía de 0.2 a 89 mm/día con un promedio de 3 mm/día, con sequías en los meses de marzo a mayo. En cuanto a la temperatura, varía de 13 a 25 °C, con un promedio de 19 °C, las temperaturas más bajas se presentan en diciembre y enero, y las más altas en los meses de mayo a junio. Con base en estos datos y los presentados en la tabla 3.2, se obtuvieron resultados de evapotranspiración diaria en el año 2010. En la figura 4.1 se puede observar que hay una variación en la evapotranspiración de 2.7 a 6 mm, los valores más altos se observan en los meses de abril a septiembre.

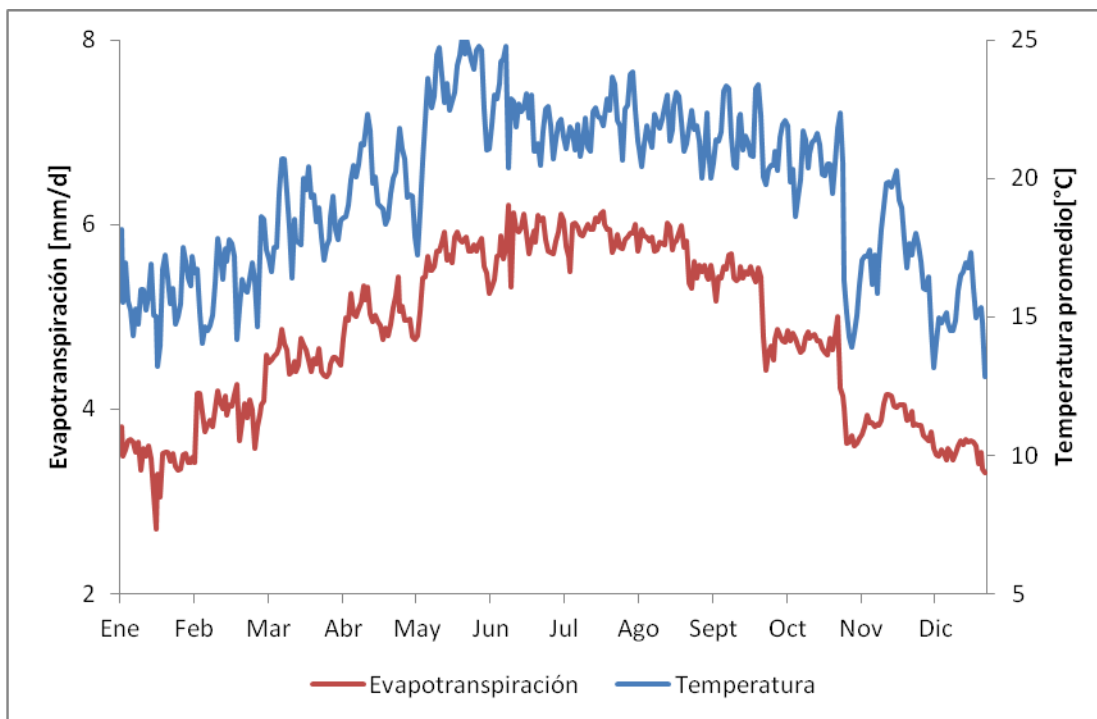


Figura 4.1 Evapotranspiración diaria estimada y temperatura en el año 2010

Una vez obtenidos los resultados de la evapotranspiración, se estimó la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar cuyo resultado fue de 98 m<sup>3</sup>/ton, considerando un rendimiento del cultivo de 110 ton/ha. En la tabla 4.1 se muestra la evapotranspiración acumulada del cultivo así como la huella hídrica de la caña de azúcar acumulada en los meses de riego, también se puede observar que la huella hídrica varía mes con mes, siendo junio el mes que menor huella hídrica tiene.

Mes	*K <sub>ca</sub>	Evapotranspiración acumulada [mm]	Huella Hídrica [m <sup>3</sup> /ton]	Huella Hídrica acumulada [m <sup>3</sup> /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

Tabla 4.1 Evapotranspiración y huella hídrica de caña de azúcar estimada para el año 2010  
Fuente: \* Brower y Heibloem, 1986.

Esta estimación se realizó para el año 2010, por lo que podría validarse con datos históricos y precisar valores de algunas de las variables usadas, pero independientemente de esto, el procedimiento es un valor sobreestimado, ya que se consideró que las 15,500 hectáreas se riegan por inundación, cuando en la región de Tamazula utilizan aproximadamente un 50% de riego rodado, otro 25% de riego por aspersión y un 25% de riego por goteo. Estos dos últimos sistemas de riego emplean menor consumo de agua que el riego por rodado. Si se consideran los tres diferentes tipos de riego en la región, se obtiene una huella hídrica de 80 m<sup>3</sup>/ton.

Debido a la falta de datos para estimar la huella hídrica en el proceso de producción de etanol, se consideró un consumo de agua de 1.8 m<sup>3</sup>/ton (UNICA, 2007). Con este valor se estimó la huella hídrica del biocombustible, cuyo resultado es de 99.8 m<sup>3</sup>/ton. A continuación se realiza el cálculo de la demanda de agua total para riego considerando los tres diferentes sistemas de riego que utilizan en la zona.

#### 4.2 Estimación de la demanda total de agua para riego

Se estimó la demanda de agua para riego tomando en cuenta los tres sistemas de riego que se usan en la región. Es importante mencionar que el ahorro de riego por aspersión en comparación con inundación es del 30% y por goteo es del 44 % (Narayanamoorthy, 2005). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2.

<b>Demanda de agua para riego</b>	<b>Mm<sup>3</sup></b>
Inundación	83.5
Aspersión	28
Goteo	23
<b>Total</b>	<b>134.5</b>

**Tabla 4.2** Demanda de agua por los diferentes tipos de riego en la región de Tamazula

En la tabla 4.2 se puede observar que la demanda de agua en la producción agrícola es menor con el sistema de riego por goteo y el que mayor consume agua es el sistema de riego por inundación. El total de la demanda de agua en la producción agrícola es de 134.5 Mm<sup>3</sup>, también se realizó la estimación de la demanda de agua para la población de Tamazula; a continuación se muestran los resultados.

### 4.3 Demanda de agua total en Tamazula

Se encontró que la demanda de agua total en el municipio de Tamazula es de 141.1 Mm<sup>3</sup>, de los cuales sólo 4.5 Mm<sup>3</sup> (3%) corresponden a la demanda municipal. Posteriormente se hizo una comparación con el agua disponible, en la tabla 4.3 se muestran los resultados.

<b>Demanda de agua</b>	<b>Mm<sup>3</sup></b>	<b>%</b>
Riego	134.5	95
Etanol	2.1	1.5
Municipal	4.5	3.5
<b>Total</b>	<b>141.1</b>	<b>100</b>

Tabla 4.3 Demanda de agua en Tamazula

Para llevar a cabo la comparación entre la demanda total de agua en Tamazula y la disponibilidad, fue necesario estimar la disponibilidad de agua. A continuación se muestran los resultados de la disponibilidad de agua en la zona de estudio.

### 4.4 Estimación de la disponibilidad de agua actual y balance regional

La disponibilidad de agua se estimó a partir de la temperatura y la precipitación de la región, y el resultado de ésta para el año de 2010 fue de 364 Mm<sup>3</sup>. Cabe señalar que la disponibilidad es para abastecer los principales servicios de la zona, que son agua potable para los habitantes y agua para riego de la caña de azúcar.

Para llevar a cabo la estimación de la disponibilidad del agua a través del tiempo, se hizo una línea base de la temperatura y la precipitación de 1980-2007. Los datos utilizados fueron proporcionados por el CLICOM.

En la figura 4.2, se presenta la línea base para la temperatura promedio y la precipitación acumulada, en la cual se observan las variaciones de la temperatura a través del periodo de 1980-2007; éstas oscilan entre 18°C y 25°C siendo enero el mes con temperatura menor y los meses de mayo y junio en los que se observan las temperaturas más altas. En cuanto a la precipitación, se puede observar que el periodo de lluvias es de junio a octubre.



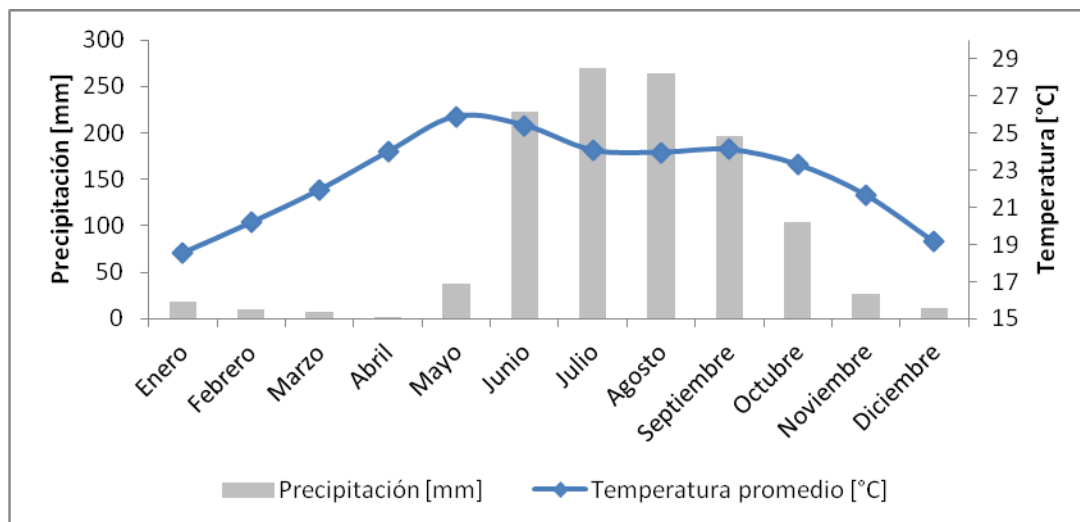


Figura 4.2 Línea base de temperatura y precipitación 1980-2007

Una vez que se construyó la línea base, se procedió a estimar la disponibilidad de agua para el periodo de 1980-2010. Se puede observar (ver figura 4.3) que no existe una disminución de la disponibilidad durante los años. De hecho, hay una variación entre 388  $Mm^3$  y 620  $Mm^3$  y el promedio de la disponibilidad a lo largo de estos años es de 259  $Mm^3$ , incluso, en el año 2010 la disponibilidad es mayor que la media. El año que presenta menor disponibilidad de agua es 1994 (288  $Mm^3$ ) y el año con mayor disponibilidad es 1992 (620  $Mm^3$ ). Es importante mencionar que en los estudios realizados por CONAGUA arrojan resultados de disponibilidad suficiente en la zona.

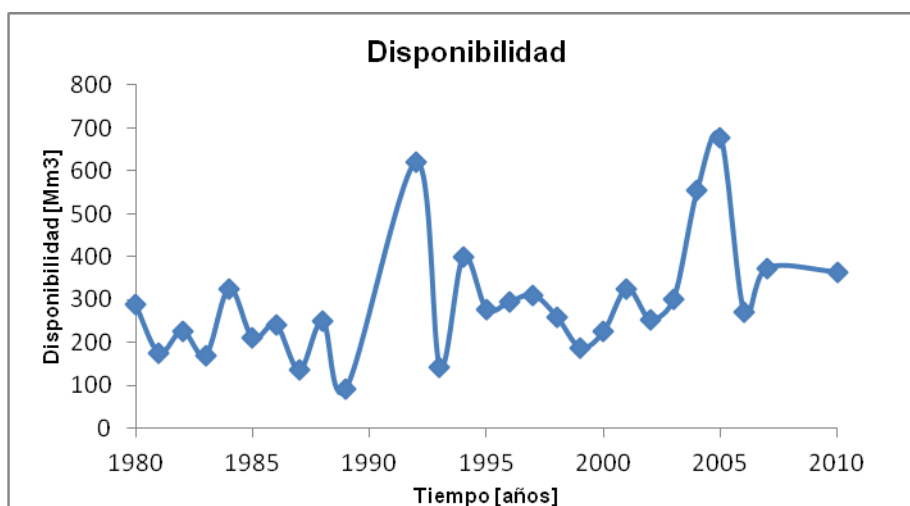


Figura 4.3 Disponibilidad de agua en Tamazula 1980-2010

La estimación para la disponibilidad de agua en el 2010 fue de 364  $Mm^3$ . Una vez obtenido este resultado, se realizó un balance regional para la zona de estudio, se estimó

el índice de estrés de agua, esto es el total de la demanda de agua dividida entre la disponibilidad del agua. El resultado que se encontró para la zona de estudio fue de 37%, lo que indica que actualmente existe estrés hídrico en la región de Tamazula.

#### 4.5 Generación de escenarios de cambio climático

En cuanto a las proyecciones con cambio climático, se utilizó la línea base de temperatura y precipitación (ver figura 4.2) y se realizaron las proyecciones futuras para los horizontes 2020 y 2050, éstas se construyeron a partir de modelos de circulación general (ECHAM Y GFDL).

En la siguiente tabla (4.4) se resumen las anomalías en la temperatura para los horizontes 2020 y 2050 bajo los modelos GFDL y ECHAM 5 y los escenarios A2 y B1.

	Anomalías de Temperatura [°C]							
	Horizonte 2020				Horizonte 2050			
	GFDL		ECHAM 5		GFDL		ECHAM 5	
Modelo	GFDL		ECHAM 5		GFDL		ECHAM 5	
Escenario	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1
Enero	0.7	1.2	0.9	1.0	1.1	1.4	2.0	1.8
Febrero	1.1	0.9	0.8	1.3	1.2	1.4	2.3	2.0
Marzo	1.6	1.3	1.3	1.1	2.5	2.4	2.8	2.4
Abril	1.6	1.4	1.3	0.7	3.0	2.0	2.5	3.0
Mayo	1.4	1.9	1.3	0.9	2.9	1.8	2.4	2.1
Junio	1.3	1.5	1.1	0.7	2.4	1.4	2.1	2.0
Julio	1.3	1.1	1.2	0.9	1.9	1.6	2.3	2.0
Agosto	1.1	1.1	1.2	0.9	2.2	1.4	2.4	2.1
Septiembre	1.0	1.1	1.0	0.7	2.3	1.3	2.1	1.7
Octubre	1.0	0.9	0.6	0.5	1.5	1.6	2.2	1.5
Noviembre	0.7	1.1	1.1	0.6	1.7	1.5	2.1	1.9
Diciembre	0.7	1.0	1.1	1.1	2.1	2.0	2.1	2.0

**Tabla 4.4** Anomalías de temperatura para los años 2020 y 2050

**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

Es claro que los incrementos más preocupantes son los del horizonte 2050, aunque en el 2020 también hay importantes variaciones en la temperatura de la región.

En cuanto a la precipitación se refiere, en la tabla 4.5 se pueden ver los cambios que habrá para los horizontes 2020 y 2050 en la región de Tamazula. En general, se puede observar que existirá una disminución en la mayoría de los meses, sin embargo, en los meses de lluvia se presenta un aumento.

	Anomalías de Precipitación [%]							
	Horizonte 2020				Horizonte 2050			
	GFDL		ECHAM 5		GFDL		ECHAM 5	
Modelo	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1
Enero	-39	-33	25	-45	-20	-14	-15	-8
Febrero	-23	18	-2	-22	-41	-67	-39	-39
Marzo	-71	-45	-2	-13	-10	-40	-49	-25
Abril	-56	-66	17	12	-15	-20	-9	-20
Mayo	-13	-50	-9	-2	-25	0	5	-13
Junio	-7	-3	2	4	-23	-2	10	5
Julio	2	8	-7	-11	-3	-7	-9	-12
Agosto	19	19	-5	0	28	13	-3	1
Septiembre	11	59	-3	5	59	8	23	14
Octubre	10	-24	3	-23	11	52	1	9
Noviembre	-3	13	-9	-34	-41	-33	-23	-21
Diciembre	-30	-7	-17	-29	16	-28	11	-12

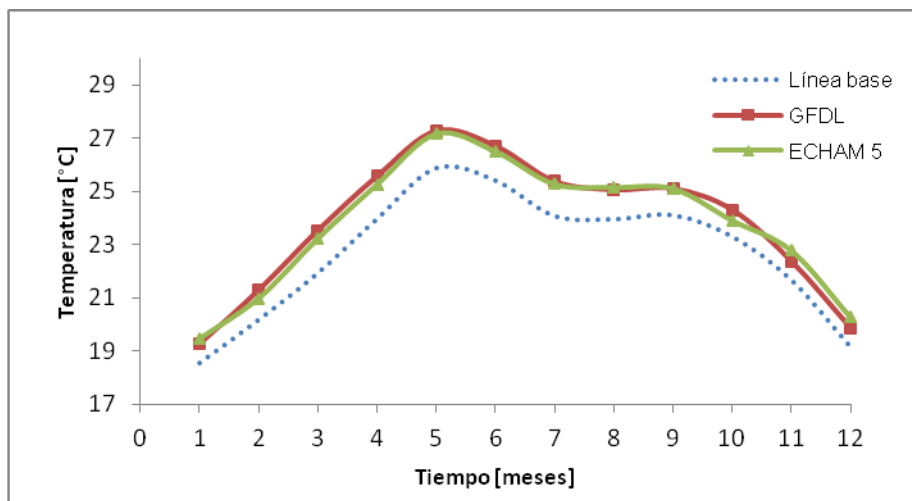
**Tabla 4.5** Anomalías de Precipitación para los años 2020 y 2050

Fuente: Elaboración propia con datos de PCIC (2011)

Cabe señalar que a pesar de que las proyecciones muestran una importante variación porcentual en la precipitación, el cambio se ve reflejado una vez que las variaciones se integren con la línea base de la zona en estudio, es decir, un cambio porcentual negativo del 30% en el mes de diciembre no generará un decremento significativo en la precipitación acumulada para este mes, ya que no es un mes en el cual se presenten lluvias.

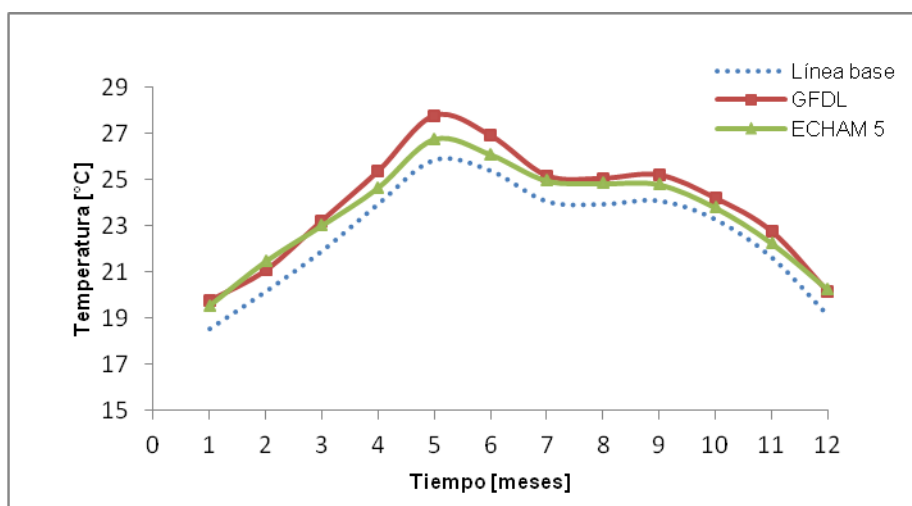
A continuación se muestran los resultados de los escenarios A2 y B1 para el horizonte 2020 obtenidos con las proyecciones de cambio climático. Las variaciones de temperatura que se obtuvieron son: en el modelo GFDL los incrementos varían de 0.7 °C en los meses de enero a diciembre a 1.6 °C en los meses de marzo y abril, para el escenario ECHAM 5, los incrementos varían de 0.7 °C en el mes de septiembre a 1.3 °C en el mes de febrero. En ambos escenarios el mínimo incremento que se tendría es de 0.7 °C.

En la figura 4.4, se observa que el comportamiento del escenario A2 para los dos modelos es muy parecido, aunque hay mayores incrementos de temperatura en el escenario GFDL.



**Figura 4.4** Proyecciones de temperatura para el año 2020, escenario A2  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

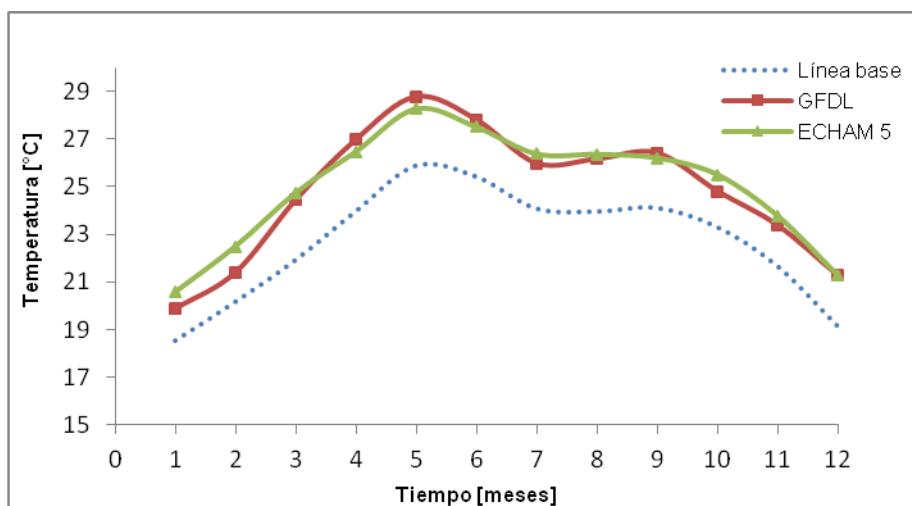
Asimismo, se muestran los resultados obtenidos para el escenario B1 en el horizonte 2020, en el modelo GFDL se muestra un incremento de 0.9 °C en los meses de febrero y octubre a 1.9 °C en mayo, para el modelo ECHAM 5 el incremento es un poco menor, éste varía de 0.7 °C en los meses de abril, junio y septiembre a 1.3 °C en febrero. Como se puede observar en la figura 4.5, el modelo GFDL para el escenario B1 también es el que mayor temperatura espera para el 2020, aunque para el ECHAM 5 también se esperan importantes incrementos en la temperatura.



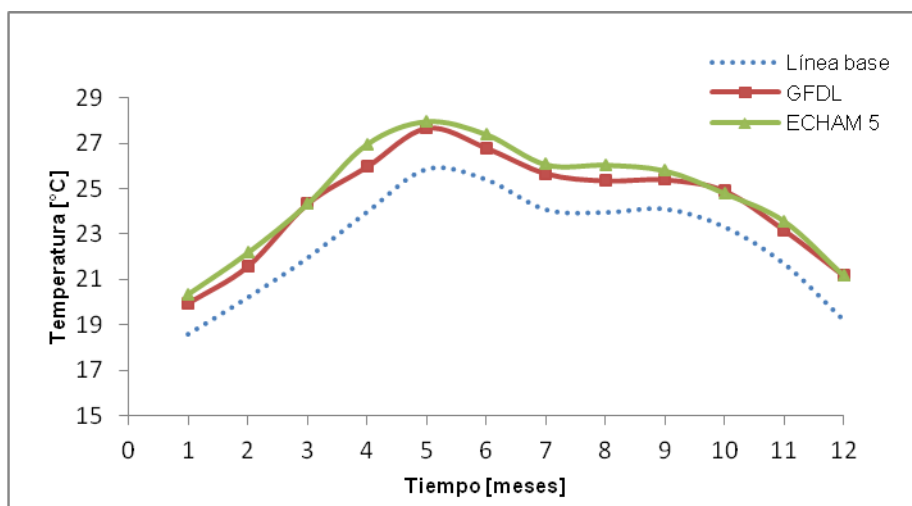
**Figura 4.5** Proyecciones de temperatura para el año 2020, escenario B1  
**Fuente:** Elaboración propia con datos de PCIC (2011)

En las siguientes figuras 4.6 y 4.7 se presentan las temperaturas proyectadas para el año 2050. Con base en los resultados obtenidos para el horizonte escenario B1 2050, se

observa (figura 4.7) que los cambios esperados en la temperatura son mayores con el modelo ECHAM 5, éste tiene un incremento que varía de 1.5 °C en el mes de febrero a 2.9 °C en mayo, mientras que en el ECHAM 5 se tiene una variación de 1.2 °C en enero a 2.9 °C en marzo.



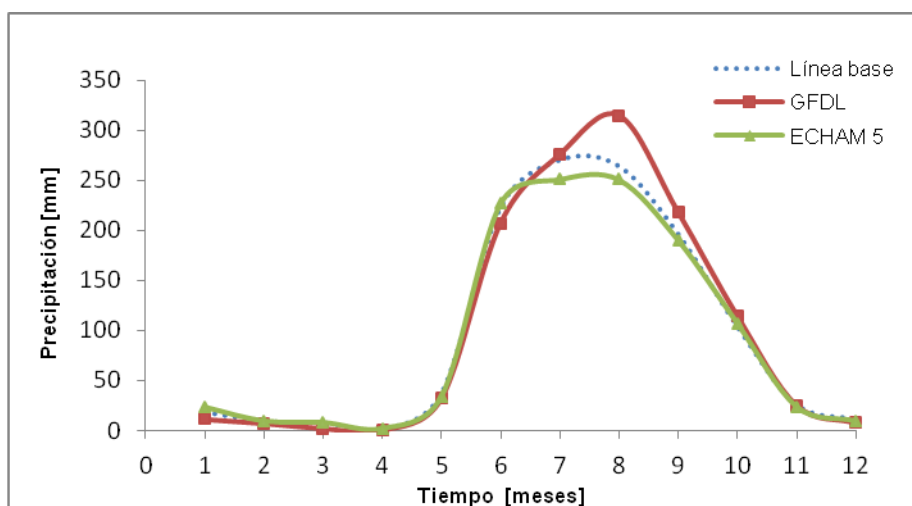
**Figura 4.6** Proyecciones de temperatura para el año 2050, escenario A2  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)



**Figura 4.7** Proyecciones de temperatura para el año 2050, escenario B1  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

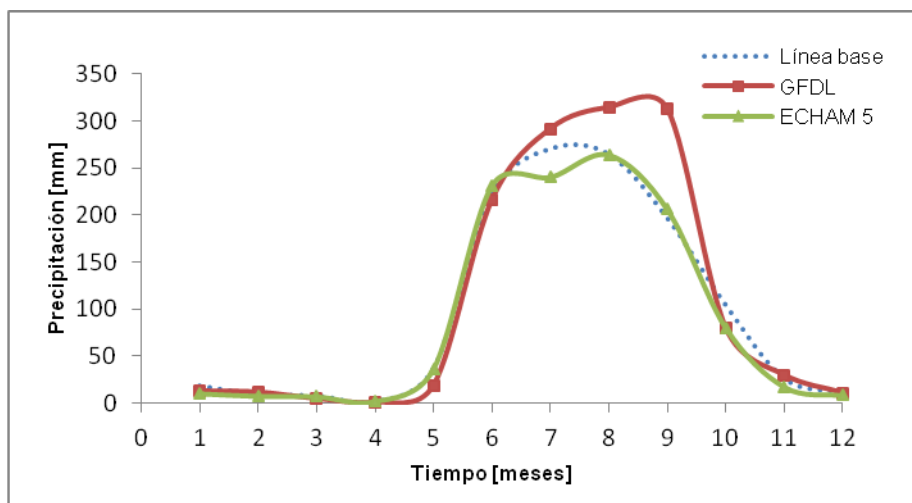
En cuanto a la precipitación, se presenta una disminución de ésta en ciertos meses de año; sin embargo, hay incrementos en la precipitación en otros meses. En las siguientes

figuras se representa el cambio en la precipitación proyectado bajo escenarios de cambio climático.



**Figura 4.8** Proyecciones de precipitación para el año 2020, escenario A2  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

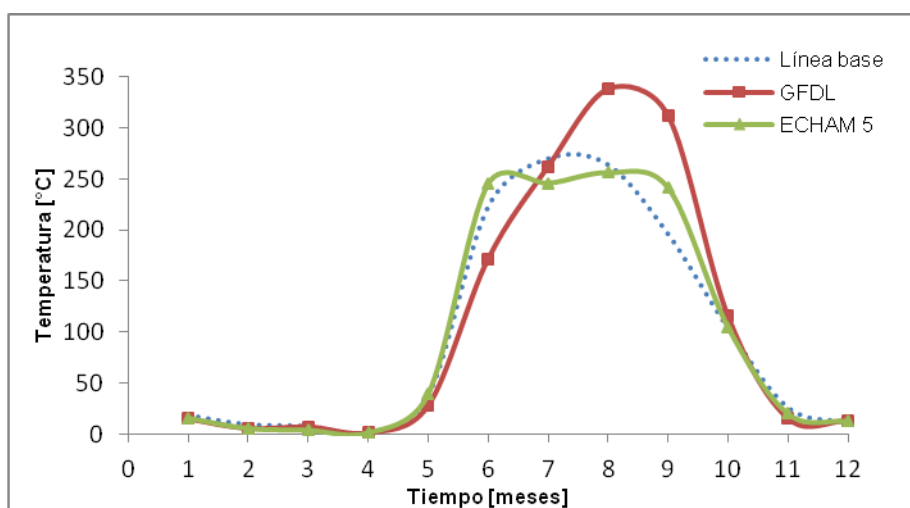
En la figura 4.8 se representa el cambio de la precipitación con el escenario A2 para el horizonte 2020 con los modelos GFDL y ECHAM 5, se puede observar que con el GFDL la precipitación esperada aumentará de julio a octubre, y disminuirá en los demás meses del año. Con el modelo ECHAM 5, la precipitación esperada disminuirá la mayoría de los meses.



**Figura 4.9** Proyecciones de precipitación para el año 2020, escenario B1  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

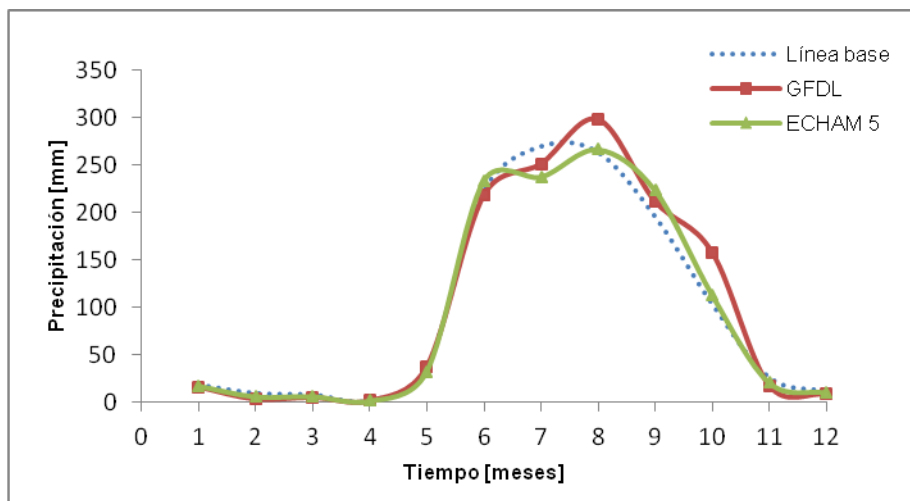
En la figura 4.9 se representan las variaciones en la precipitación para el horizonte 2020 con el escenario B1 y los modelos GFDL y ECHAM 5. Con el modelo ECHAM 5 la precipitación tiene un comportamiento similar a la línea base, aunque existe un decremento importante en el mes de julio. En lo que respecta al GFDL, se proyecta un aumento en la precipitación en los meses de julio, agosto y septiembre.

Para el horizonte 2050, el escenario A2 con los modelos GFDL y ECHAM 5 proyectan cambios importantes en la precipitación; sin embargo, estos cambios esperados no son muy diferentes a los del horizonte 2020. En la figura 4.10 se puede ver que habrá un incremento en la precipitación con el modelo GFDL, en cambio con el ECHAM 5 se predice que habrá una disminución en la precipitación con respecto de la línea base.



**Figura 4.10** Proyecciones de precipitación para el año 2050, escenario A2  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

En la figura 4.11 se muestra el cambio en la precipitación para el horizonte 2050 bajo el escenario B1 y los modelos antes mencionados. Se puede observar que habrá menos incrementos y más decrementos en la precipitación que en el horizonte 2020 para ambos modelos.



**Figura 4.11** Proyecciones de precipitación horizonte 2050 B1  
**Fuente:** Elaboración propia con datos del PCIC (2011)

#### 4.6 Estimación de la huella hídrica con proyecciones de cambio climático

Se estimó la huella hídrica bajo escenarios de cambio climático para los horizontes 2020 y 2050, los resultados se muestran en la tabla 4.6. Cabe señalar que la huella hídrica estimada para el año 2010 fue de 98 m<sup>3</sup>/ton.

**Huella hídrica en 2010 = 98 [m<sup>3</sup>/ton]**

Año	Huella Hídrica bajo escenarios de cambio climático [m <sup>3</sup> /ton]			
	A2 GFDL	B1 GFDL	A2 ECHAM	B1 ECHAM
2020	100	100	100	100
2050	102	101	102	102

**Tabla 4.6** Proyecciones de huella hídrica para los años 2020 y 2050

Con respecto a las proyecciones de huella hídrica con cambio climático, se puede observar que no hay modificaciones significativas y que el incremento es parecido para todos los modelos y escenarios. El incremento que se presenta en la huella hídrica proyectada bajo escenarios de cambio climático es de aproximadamente de un 3%; sin embargo, es importante mencionar que para realizar dichas proyecciones sólo se utilizaron los cambios esperados en las variables de temperatura y precipitación. Todas las demás variables necesarias para la estimación de la evapotranspiración (Ec. 3), se consideraron sin cambio debido a la dificultad de modelar su comportamiento futuro. Además de estas hipótesis, hay que considerar que, con respecto a las proyecciones de



precipitación y temperatura usadas, deben verse como representativas de un rango de variación de las incertidumbres.

#### 4.7 Disponibilidad proyectada con proyecciones de cambio climático

Con los resultados de las proyecciones con cambio climático para la temperatura y la precipitación, se realizaron las proyecciones de disponibilidad de agua, para ello, como se mencionó, se construyó una línea base, a partir de la cual se hicieron las proyecciones en función de la temperatura y la precipitación; los resultados se muestran en la tabla 4.7.

<b>Disponibilidad en 2010 = 364 [Mm<sup>3</sup>]</b>				
<b>Año</b>	<b>Disponibilidad [Mm<sup>3</sup>]</b>			
	A2 GFDL	B1 GFDL	A2 ECHAM	B1 ECHAM
2020	296.5	352.1	245.8	236.5
2050	306.2	283.6	240.8	234.3

**Tabla 4.7** Proyecciones de disponibilidad para los años 2020 y 2050

El modelo con las predicciones más desfavorables es el ECHAM con el escenario B1, en donde se observa una reducción en la disponibilidad de 35% comparada con la del 2010 y, para el modelo GFDL, hay una disminución de la disponibilidad de 15%. Esto quiere decir que podrá esperarse la disminución en la disponibilidad en un rango de variación entre 15 y 35 %.

#### 4.8 Balance regional bajo los escenarios de cambio climático

Se realizó el balance regional para las proyecciones de cambio climático, se encontró que para el horizonte 2020, el índice de estrés es de 39%, esto es 2% mayor que en el 2010 y para el horizonte 2050 es de 58%, es decir, 19% más grande que en el 2010, por lo que se puede ver que el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la zona será de gran importancia.

#### 4.9 Producción de etanol en México

Por último, en cuanto a la producción de etanol para México, se dice que se implementará el uso de éste en un 6% de la composición de la gasolina en tres de las principales ciudades que son: Guadalajara, Monterrey y Valle de México (Pemex, 2009). La demanda

anual de gasolina de estas tres ciudades es de 232 miles de barriles por día (ver tabla 4.8), lo que equivale a una demanda de 13,461,579 miles de L/año, esto quiere decir que si se utiliza un 6% de etanol, se requeriría una producción de etanol de 807,694 miles de L/año. Sin embargo, el país sólo tiene la capacidad de producir el 60% de la demanda de etanol, manteniendo el volumen de producción de azúcar pero dejando de producir melaza y, considerando la producción de melaza, el país tiene la capacidad de producir el 20%, lo que no afectaría el mercado de la melaza.

Zona metropolitana	Demanda de gasolina (1x10 <sup>6</sup> l/año)	Etanol requerido (1x10 <sup>6</sup> l/año)	Producción nacional de etanol sin melaza (1x10 <sup>6</sup> l/año)	Producción nacional de etanol con melaza (1x10 <sup>6</sup> l/año)
Guadalajara	29,000	1,700		
Monterrey	22,000	1,300		
Valle de México	82,000	5,000		
<b>Total</b>	<b>134,000</b>	<b>8,000</b>	<b>5,000</b>	<b>1,600</b>

Tabla 4.8 Demanda de gasolina y producción de etanol

Es importante mencionar que con los resultados obtenidos no se cubre la demanda de las tres ciudades, además, se están suponiendo altos rendimientos en todos los terrenos, y sólo se cuentan 13 ingenios con capacidad para producir etanol.

## 5. DISCUSIÓN

De acuerdo con esta investigación la huella hídrica total es de 99.8 m<sup>3</sup>/ton para la producción de etanol en la región de Tamazula en el año 2010 y ésta se podrá incrementar en promedio a 100 m<sup>3</sup>/ton y 102 m<sup>3</sup>/ton para los escenarios futuros con condiciones de cambio climático para el año 2020 y 2050, respectivamente. Además se estimó que la demanda de agua total para la producción de ese biocombustible (137 millones m<sup>3</sup> por ciclo agrícola) tiene un serio impacto en la disponibilidad de agua, ubicando a la región en condición de estrés hídrico extremo (37%) en el año 2010, coincidiendo con las estimaciones del organismo de cuenca y a futuro podrá observarse la disminución en la disponibilidad del recurso entre 20 y 30%.

La metodología que se aplicó para realizar este estudio es la más usada para evaluar la huella hídrica de un cultivo. El resultado que se obtuvo para la huella hídrica del cultivo de 98 m<sup>3</sup>/ton, suponiendo un rendimiento de la caña de azúcar de 110 ton/ha, se encuentra dentro de los valores reportados en la literatura. En el estudio de Hoekstra, por ejemplo, se estima que la huella hídrica de la producción de caña de azúcar es de 200 m<sup>3</sup>/ton en un promedio global y a nivel regional encontró que puede reducirse hasta 104 m<sup>3</sup>/ton (Mekannen y Hoekstra, 2010) suponiendo un rendimiento de 72 ton/ha. El estudio de caso de esta investigación representa las condiciones climáticas particulares de una de las regiones cañeras del país donde la producción de caña de azúcar mostró los mejores rendimientos nacionales, se realiza bajo condiciones de riego en las más de 15,000 ha destinadas para este cultivo, a pesar de contar con un clima semicálido y la caña se procesa en el ingenio Tamazula con instalaciones modernas y eficientes.

La huella hídrica de la producción de caña de azúcar estimada en 98 m<sup>3</sup>/ton con base en datos de rendimiento del cultivo para el año 2010 y estimaciones para los parámetros climatológicos de acuerdo con las recomendaciones de la FAO. La incertidumbre en esta estimación podría reducirse si existieran datos de producción agrícola y climáticos de una secuencia de al menos 10 años que permitieran establecer la influencia de las variaciones en la precipitación y la temperatura en los cálculos de los parámetros que se requieren para el método de Penman-Monteith de evapotranspiración.

Por otro lado, el valor estimado de 98 m<sup>3</sup>/ton corresponde a condiciones de riego rodado, por lo que es una sobreestimación de la huella hídrica actual, ya que en Tamazula se cuenta con extensiones de tierra agrícola regadas con sistemas por goteo (25%) y aspersión (25%). Para el análisis del balance hídrico en la región se consideró esta situación suponiendo porcentajes de ahorro de agua bajo estos sistemas de riego más eficientes obtenidos de la literatura. El resultado de considerar la actual práctica de riego en Tamazula indicó una reducción de la huella hídrica a 79.9 m<sup>3</sup>/ton y este valor se usó para evaluar el impacto de la producción de azúcar en la disponibilidad de agua en la región. Se podrá llegar a una mejor estimación con reportes específicos respecto al nivel de ahorro de agua que se obtiene con los sistemas de riego empleados; cabe señalar que en la región se observó la apertura de nuevas tierras agrícolas con sistemas de aspersión, por lo que es una situación variable que deberá de documentarse adecuadamente en estimaciones futuras.

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. Para el balance hídrico se consideraron datos de la literatura con base en el volumen de agua por cada tonelada de caña procesada (1.8 m<sup>3</sup>/ton). Se reconoce que el valor usado podría ser una subestimación, ya que es el resultado de años de experiencia en obtener mejores eficiencias en la industria azucarera brasileña. Sin embargo, 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 más importante en términos de huella hídrica y su impacto en la disponibilidad de agua, lo que implica que las condiciones de este estudio no serán afectadas negativamente.

Por todo lo anterior, el análisis del balance hídrico actual y futuro en la región será más confiable si además se contará con datos climatológicos completos, de al menos 10 años; además se incorporará la demanda de agua por el sector industrial y por el consumo de

agua para otros cultivos, que no fueron considerados en esta investigación. Aún cuando se considera que estas demandas de agua no modificarán sustancialmente el balance hídrico regional, ya que la principal actividad industrial es la azucarera y la caña de azúcar el principal cultivo en términos de área cultivada en la región de estudio.

Los resultados del impacto de la huella hídrica total (producción agrícola y proceso del etanol) en el recurso agua indicó que para el año 2010 ya existe estrés hídrico en la región de Tamazula con un valor de 37%, que corresponde a un grado de presión alto.

Para el cálculo de la huella hídrica futura se supuso que prevalecen las condiciones de área cultivada, la tasa de rendimiento y los parámetros para estimar la evapotranspiración. Se encontró que la demanda de agua para la producción de caña de azúcar se incrementa de 98 m<sup>3</sup>/ton a 100 m<sup>3</sup>/ton para el año 2020 y hasta 102 m<sup>3</sup>/ton para el 2050, valores promedio para los escenarios A2 y B1 y para los dos modelos de circulación general (GFDL y ECHAM) analizados en esta investigación. Estos resultados muestran que si no cambian las condiciones de producción, la huella hídrica se incrementará a futuro entre un 3 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 de la huella hídrica de la caña de azúcar son conservadores ya que podrán presentarse cambios en el rendimiento del cultivo y esperarse que la demanda de agua para riego se incremente hasta 150 m<sup>3</sup>/ton, estimada para un rendimiento de 72 ton/ha que equivale al valor promedio nacional. 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%.

Para el balance hídrico a futuro se encontró que la disponibilidad de agua en la región se verá seriamente comprometida, ya que habrá una disminución en el volumen de agua disponible del 20% para el año 2020 y del 30% para el 2050; a pesar de que los resultados de las proyecciones de los modelos (GFDL y ECHAM) muestran que la región recibirá más lluvia. Además el estrés hídrico en la región aumentará a 39% para el año

2020 y a 58% para el 2050, manteniéndose en el grado de presión alto, pero con condiciones más críticas para la atención de los usos consuntivos de agua.

Los resultados de esta investigación muestran que la producción del biocombustible etanol a partir de la caña de azúcar presenta una demanda muy importante de agua (137 millones m<sup>3</sup> por ciclo agrícola). Sin embargo, el mayor consumo de agua está en el riego de la caña (98%). Dado éste alto consumo de agua, sería útil contar con estimaciones de sus costos para dimensionar adecuadamente el impacto de esta alternativa energética, no sólo ambientalmente, sino también económicamente. Una limitante para estimar esos costos radica en el bajo o nulo valor que se asigna al uso agrícola, el uso consuntivo más importante del país. Por ello, sólo se estimó el costo del agua en la producción de alcohol en el ingenio Tamazula el cual correspondería al pago que realiza esta industria. En el Anexo 1 se incluye la estimación realizada.

Finalmente, en esta investigación se evaluó la posibilidad de atender el programa gubernamental federal del año 2008 de introducir el uso del etanol bajo la fórmula E-6, es decir, incorporar 6 L de etanol por cada 100 L de gasolina en las tres ciudades principales del país (DF, Guadalajara y Monterrey) para el último trimestre del año 2011. Hasta la fecha no hay perspectivas claras de que pueda cumplirse la meta planteada, ya que sólo para el uso se han realizado pruebas piloto en el transporte urbano.

Se estimó que para cubrir la demanda de las tres ciudades se requeriría de la producción de 800 millones de litros de etanol anualmente; sin embargo con la capacidad instalada en los 14 ingenios que actualmente podrían producir etanol en el país sólo es posible cubrir a lo más el 20% de la demanda de etanol planeada; suponiendo que se mantienen las prácticas de producción de subproductos (melaza y mieles) con un alto valor económico y comercial a nivel local en las distintas regiones cañeras. Además, no hay aún una política gubernamental de apoyo a la modernización y adecuación en los ingenios para la producción de etanol-combustible a gran escala. Por otra parte, es posible esperar que el uso de la mezcla gasolina-etanol en el transporte urbano de las grandes ciudades tenga un efecto positivo en la reducción de gases contaminantes y puede sustituir el uso del MTBE.

## 6. CONCLUSIONES

Se cumplió el objetivo de esta investigación, evaluar la huella hídrica por la producción de etanol a partir de caña de azúcar, al encontrar que la producción de caña de azúcar es altamente consumidora de agua en Tamazula. La estimación realizada en este estudio mostró que aún bajo situaciones de producción óptimas como es el caso del ingenio Tamazula, el volumen de agua comprometido para este uso puede poner en riesgo la disponibilidad de agua en la zona. Hecho que se hace evidente al analizar el ciclo completo de producción de etanol para ser empleado como biocombustible en el transporte, donde la mayor cantidad de agua (98%) se utiliza en el riego del cultivo de la caña de azúcar y ofrece los mejores rendimientos. Por ello, es importante implementar sistemas de riego eficientes para reducir el gasto del agua en la producción de etanol a través de los distintos tipos de riego los cuales pueden llegar a reducir entre un 30% (aspersión) y 40% (goteo) el consumo de agua.

Las variaciones de la precipitación y temperatura en los escenarios a futuro, probablemente tendrán poco impacto en la huella hídrica de la caña de azúcar si no cambian las condiciones del estudio. Sin embargo, en el país se produce caña de azúcar bajo diferentes condiciones climáticas, con rendimientos menores a los de este caso y con infraestructura de riego diferente, por lo cual es necesario evaluar escenarios actuales y futuros en cada sitio en particular para estimar la huella hídrica, identificar el impacto en la disponibilidad de agua, así como evaluar los efectos directos en el mercado local por la producción de subproductos en cada región azucarera.

El uso de biocombustibles en el país es una alternativa viable para reducir las emisiones de gases contaminantes asociados al transporte en las grandes ciudades de la República, además de ser una alternativa energética. Pero para implementarla se requiere sobretodo una política que considere capacidad que tienen los ingenios para producir etanol, definir reglas claras entre productores y Pemex, con metas progresivas viables para la incorporación de los biocombustibles, así como establecer una política de precios azúcar-etanol competitiva y contar con agua suficiente para el riego.





## BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes D., Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper Vol. 56). Roma: FAO.
- Álvarez, M. (2009). Biocombustible: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional, *Economía Informa*, 359 (3), 63-89.
- Aparicio, F.J. (1997). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México: Limusa.
- 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.
- Ariel, C.C., Sánchez, J., Montoya, O., Quintero, J.A. (2007). Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y maíz. *Scientia et Technica*, 28 (10), 187-192.
- 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*, 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%20.%20Estudio%20viabilidad%20biocombustibles.pdf>
- CEA (Comisión Estatal del Agua) Jalisco (2011). Región 05 Sureste. Sistema de Información del Agua. Consultado en línea el 15 de diciembre de 2011 <http://www.ceajalisco.gob.mx/>
- Chiu, Y., Walseth, B., Suh, S. (2009). Water Embodied in Bioethanol in the United States. *Environmental Science and Technology*. 43 (8), 2688-2692.
- Cisneros, A. R. (2003). *Apuntes de la materia de riego y drenaje*. México: Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado y Área Agrogeodésica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2007).. Organismo operador de Guadalajara, Jal. Información de tarifas del agua potable Consultado en línea el 7 de febrero de 2012 <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Jalisco.pdf>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). *Estadísticas del Agua en México 2011*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde, A., Gay, C. (2008). *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Decio, L. (2009). *Biocombustibles y alimentos en América Latina y el Caribe*. San José, Costa Rica: IICA.
- Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*, 88 (1), 17-28.
- Domingo, F., Villagarcía, L., Were, A. (2002). ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas* 2003/1. Consultado en línea: [<http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe1.htm>]
- Duarte, D., Marcia, V. (2010). *Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E-6) y la infraestructura para su manejo en México*. SENER. Consultado en línea el 4 de abril de 2011 [http://www.energia.gob.mx/res/169/sp\\_RecomendacionesTecEtanolMezclas.pdf](http://www.energia.gob.mx/res/169/sp_RecomendacionesTecEtanolMezclas.pdf)
- Dufey, A. (2006). *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas*. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo, Londres.
- Escartín, B. C. (2009). *Etanol: análisis de las repercusiones y perjuicios del uso de agrocultivos como fuentes de energía*, Tesis de licenciatura, Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Fernández, J. (2007). Presente y futuro de los biocarburantes en la Unión Europea. *Revista Vida Rural*, 250 (7), 25-29.
- 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..
- 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.
- García, C.A., Manzini, F. (2011). Environmental and economic feasibility of sugarcane ethanol for the Mexican transport sector. *Solar Energy*, 86 (4), 1063-1069.
- Gay, C., Estrada, F., Sánchez A. (2008). Global and hemispheric temperatures revisited. *Climatic Change*. *Springer Science*, 94 (3), 333-349.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y., Van Der Meer, T. H. (2008). The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bioenergy supply. *Ecological Economics*, 68 (4), 1052-1060.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y. (2009). The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize. *Ecological Economics*, 40 (6), 202-211.
- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A.Y., Van Der Meer, T.H. (2009) The water footprint bioenergy, *Proceedings of the National Academy of Sciences*,. 106 (25), 10219-10223.
- Guerrero, R., Madero, G. Martínez-Duarte, J. M., Puch, L.A. (2010). *Biocombustibles líquidos: situación actual y oportunidades de futuro para España*, Fundación ideas para el progreso. Consultado en línea el 26 de marzo de 2011: [http://fundacionideas.es/sites/default/files/pdf/DD-Biocombustibles\\_liquidos-Ec.pdf](http://fundacionideas.es/sites/default/files/pdf/DD-Biocombustibles_liquidos-Ec.pdf)
- Hazell, P., Pachauri R.K. (2009). Información general. En *Bioenergía y agricultura: promesas y retos*, 1-2. Washington, D.C. International Food Policy Research Institute.
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., Tiffany, D. (2006). Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Science*, 103 (30), 11206–11210.
- 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, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M., (2009), *Water Footprint Manual*. State of the Art 2009. Enschede, Netherlands.:Water Footprint Network.
- Honty, G., Gudynas, E. (2007). *Agrocombustibles y desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: situación, desafíos y opciones de acción*. Observatorio del Desarrollo. Montevideo, Uruguay.
- Ibarrarán, V.M., (2007). *Estudio sobre economía del cambio climático en México INE/ADE-008/2007*, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Iberoamericana Puebla, México. Consultado en línea el 17 de junio de 2011: <http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2007h.pdf>
- IEA (International Energy Agency).(2011). *Technology Roadmap Biofuels for Transport*. Francia, OECD/IEA
- IEA (International Energy Agency) (2010). *Key World Energy Statistic*. International Energy Agency. p. 6 Consultado en línea el 23 de mayo de 2012 [http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/Key\\_Stats\\_2010.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/Key_Stats_2010.pdf)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). Resumen para Responsables de Políticas. En *Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. van del Linden y C.E. Hanson. Eds. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 12pp
- Jiménez, B., Navarro, I. (2010). *Biocombustibles en México: una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y para la mitigación de gases efecto invernadero*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Johnston, M., Foley, J. A., Holloway, T. (2009). Resetting global expectations from agricultural biofuels. *Environmental Research Letters*. 4 (1), 1-9.
- Maluenda, G. M. (2011). Bioetanol. Perspectivas 2012. Consultado en línea el 02 de julio de 2012 en: <http://www.agrodigital.com/Documentos/bioetanolmz12.pdf>

- Meekeren van, B.T. (2008). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Science*. Consultado en línea el 5 de abril de 2011 <http://www.pnas.org/content/early/2009/06/03/0812619106.full.pdf+html>.
- Mekonnen, M.M., 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. National Reference Center on Biomass, Institute of Electrotechnology and Energy –CENBIO/IEE.University of São Paulo, São Paulo, Brazil,.
- Nakicenovic, N. e. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, U.K.*
- Narayanamoorthy, A. (2005). *Potential for Drip and Sprinkler Irrigation in India*. Consultado en línea el 20 de mayo de 2011 en:<http://nrlp.iwmi.org/.../12.%20Water%20Savings%20Technologies%20-%20Narayanamoorthy.pdf>
- PCIC (Pacific Climate Impacts Consortium) (2011). Regional Analysis Tool. Consultado en línea el 21 de diciembre de 2011 <http://tools.pacificclimate.org/select>
- PEMEX (Petróleos Mexicanos), (2009). Iniciativas PEMEX uso de biocombustibles. Consultado en línea el 7 de marzo de 2012 en: [http://gref.energia.gob.mx/GREF/\\_static/Presentacion\\_Jose\\_Antonio\\_Ceballos\\_Soberanis\\_PEMEX.pdf](http://gref.energia.gob.mx/GREF/_static/Presentacion_Jose_Antonio_Ceballos_Soberanis_PEMEX.pdf)
- Ralph S. M. (2008). From 1st to 2nd Generation Biofuel Technologies, An Overview of Current Industry and R&D&D Activities, OECD/IE
- Sánchez, C.J. (2009). Biocombustibles, la era de la nueva revolución agrícola. *Casa del Tiempo*. 2 (4).
- SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) (1997). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Consultado el 16 de enero de 2012 en: [http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=32](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=32)
- SEMARNAT-INE (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología) (2009). *Mexico's Fourth National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Comité Intersecretarial de Cambio Climático México.
- SENER (Secretaría de Energía) (2008). *Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos*. Consultado en línea el 11 de marzo de 2011: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- SENER (Secretaría de Energía) (2010). *Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E6) y la infraestructura para su manejo en México*. Consultado en línea el 15 de marzo de 2011: [http://www.energia.gob.mx/res/169/sp\\_RecomendacionesTecEtanolMezclas.pdf](http://www.energia.gob.mx/res/169/sp_RecomendacionesTecEtanolMezclas.pdf)
- SIEG (Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco) (2001). Gobierno de Jalisco. Consultado en línea el 21 de agosto de 2012 en <http://sieg.gob.mx/general.php?id=7&idg=106>
- UNC (Unión Nacional de Cañeros) (2011). Estadísticas de la Agroindustria de la caña de azúcar. Unión Nacional de Cañeros, A.C. –CNPR. Consultado en línea el 07 de julio de 2012 en: [http://www.caneros.org.mx/site\\_caneros/estadisticas/ingenios/tamazula.pdf](http://www.caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/ingenios/tamazula.pdf)
- ÚNICA (Sugar Industry Association) (2007). Sugar cane's energy, Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability, Sao Paulo, S. C .



## ANEXO 1

### **COSTOS DEL AGUA ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE ETANOL**

El agua para riego en México no tiene un costo. Los únicos costos que habría de incluirse corresponden a los asociados con el consumo energético para el bombeo de los múltiples pozos que hay en el ingenio estudiado; sin embargo, no se tomaron en cuenta debido a que no se contó con la información necesaria para poder hacer la estimación. Por lo tanto, sólo se estimó el costo asociado al consumo de agua industrial. Es importante mencionar que tampoco se contó con información para realizar la estimación del agua asociada al consumo industrial, por lo que se usó un dato de la literatura, el cual indica que el consumo de agua en la producción de etanol es de 1.8 m<sup>3</sup>/ton (UNICA, 2007) y éste se multiplicó por el precio del agua para la industria en la zona de estudio, así se obtuvo el resultado de la estimación del costo del agua en la producción de etanol. Cabe señalar que la tarifa del agua depende de cada estado. Para el caso en estudio la tarifa es de \$9.45 para un consumo de 45 a 275 litros y de \$29.66 para un consumo mayor a 275 litros (CONAGUA, 2007).

La estimación del costo asociado al agua se realizó bajo la consideración de que se utilizan 1.8 m<sup>3</sup>/ton de agua en la producción de etanol y el resultado del costo total del agua en la producción del biocombustible es de \$75,108,960. Este valor sólo contempla el uso del agua en la industria, ya que en la agricultura el agua no tiene costo alguno en el país.