

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA PROCEDENTE DE LA BIOMASA SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA HUELLA HÍDRICA

GARCÍA CARMONA, MINERVA



Tutor: GARCÍA RUBIO, MIGUEL ÁNGEL

Departamento de Economía Aplicada

Grado en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias

Curso 2013-2014

Universidad de Granada

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA PRODUCCIÓN
DE ENERGÍA PROCEDENTE DE LA BIOMASA
SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS: UNA
APROXIMACIÓN DESDE LA HUELLA HÍDRICA**

GARCÍA CARMONA, MINERVA

Tutor: GARCÍA RUBIO, MIGUEL ÁNGEL

Departamento de Economía Aplicada

Grado en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias

Curso 2013-2014

Universidad de Granada

ÍNDICE

1.Introducción.....	3
2.La biomasa en la transición energética.....	5
3.Revisión de la literatura.....	8
3.1.Metodología utilizada en los estudios analizados.....	8
3.2.Resultados obtenidos de los estudios analizados.....	10
4.La escasez producida por los biocombustibles.....	18
4.1.¿Dónde se producen los biocombustibles?.....	18
4.2.¿Qué modos de producción se utilizan para la producción de biocombustibles?.....	19
4.3.¿Es un país propenso a sufrir escasez de agua debido a los biocombustibles?.....	20
5.Conclusiones.....	23
6.Referencias bibliográficas.....	28

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las emisiones de gases de efecto invernadero son aceptadas como las principales responsables del cambio climático antrópico. El CO₂, procedente de la combustión de fuentes de energía fósil, encabeza la lista de aquellos que hay que reducir.

Los combustibles fósiles han sido nuestra principal fuente de energía en los dos últimos siglos, pero por las cuestiones relacionadas con la calidad del medio, sumada a las relacionadas con la seguridad energética, se ha impulsado el desarrollo de las fuentes alternativas. Son muchos los gobiernos que han cambiado en las actitudes políticas para promover fuentes de energía alternativas, como es el caso de los combustibles renovables, ya que se espera un especial cambio en el sector transporte como uno de los mayores contaminadores.

Se presenta la biomasa como una de las alternativas más viables para la producción energética, sobretodo en la producción de biocombustibles líquidos. Algunos gobiernos tienen medidas de reemplazo para los tradicionales combustibles, pero al mismo tiempo el crecimiento económico estimula el incremento del transporte.

La producción de biomasa para alimentos y fibras en la agricultura representa cerca de un 86% de la demanda mundial de agua, compitiendo con el uso urbano o las actividades industriales en muchas partes del mundo. El crecimiento de biomasa requiere agua, un recurso escaso. Por tanto, en un escenario de deterioro de los recursos hídricos, la esperada transición desde las fuentes de energía fósil hacia la biomasa, ejercen una presión adicional sobre los recursos hídricos. En continuo crecimiento genera conflictos entre energía y seguridad en la disponibilidad de agua.

En este contexto, el presente trabajo pretende analizar el impacto sobre los recursos hídricos de la producción de energía a partir de la biomasa, e identificar qué cultivos y qué productos derivados de la biomasa- bioelectricidad, bioetanol o biodiesel- . Con este objetivo se hará uso del concepto de huella hídrica como indicador de impacto sobre los recursos hídricos.

La huella hídrica puede utilizarse para gestionar los suministros de agua y predecir dónde habrá escasez, muy útil en la práctica agrícola. En este sentido, en este trabajo también se analizarán dónde se producen principalmente los biocombustibles, cómo influyen los modos de producción y finalmente, dónde es previsible que se produzca escasez de agua derivada de la producción de biocombustibles, como objetivo en el análisis a realizar.

Por tanto el presente trabajo plantea dos preguntas para lograr los objetivos de la investigación, y estas se desglosan a su vez en preguntas para tener en cuenta los puntos clave de la investigación.

- ¿Cuál es la huella hídrica asociada a los biocombustibles?
 - ¿Cuál es la huella hídrica de otras fuentes primarias?
 - ¿Cuál es la huella hídrica de las materias primas asociadas a los biocombustibles?
 - ¿Cuál es la huella hídrica de los productos derivados de la biomasa-bioelectricidad, bioetanol y biodiesel-?

- ¿Los cambios en la huella hídrica asociada a biocombustibles generará escasez de agua?
 - ¿Dónde se producen los biocombustibles?
 - ¿Bajo qué modos de producción se producen?
 - ¿Es un país propenso a sufrir escasez de agua debido a los biocombustibles?

Para conseguir tales objetivos, primero se presentará cómo se produce la energía a través de la biomasa, sus productos derivados. A continuación, en la revisión de la literatura se responderá a la primera pregunta realizada, analizando la huella hídrica de los cultivos y de los productos derivados. Una vez visto estas huellas hídricas, comprobaremos su influencia en el territorio, analizando los lugares de producción, los modos y escenarios futuros que dan información de qué países pueden ser propensos a sufrir escasez de agua debido a los biocombustibles.

Desde un primer momento se percibe que una mayor producción de biocombustibles dará lugar una huella hídrica mayor. Esto será así hasta el punto de incrementarse en diez veces para 2030, de $90\text{km}^3/\text{años}$ a día de hoy a $970\text{km}^3/\text{año}$ en 2030. Se espera además que la huella hídrica azul de los biocombustibles aumente en un 0,5% del agua azul disponible en 2005 al 5,5% en 2030.

2. LA BIOMASA EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La biomasa se presenta como una de las grandes alternativas para la transición energética de las energías fósiles. Son muchos los países que siguen explorando opciones para reemplazar principalmente la gasolina por biocombustibles; Estados Unidos o la Unión Europea son ejemplos de puesta en práctica de tales políticas al poner objetivos concretos a este reemplazo. El cultivo de biomasa a gran escala, tal y como es planteado, para sustituir a los combustibles fósiles, influirá en las demandas futuras de agua (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a).

Biomasa es un término general para todos los flujos de materiales que derivan de la biosfera (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008) y es definido como todo material de origen orgánico que requiere recursos como la tierra, agua, nutrientes y luz solar para crecer, y que una vez alcanzado un tamaño adecuado puede ser cosechado como materia prima para bioenergía (Van Lienden *et al.*, 2010; Gerbens-Leenes *et al.*, 2012). La biomasa puede proporcionar diferentes formas de bioenergía, tanto calor, electricidad o biocombustibles (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a).

Gerbens-Leenes *et al.* (2008) hacen una distinción en la biomasa para la producción de energía en tres categorías: cultivos alimentarios, como la caña de azúcar para bioetanol o la colza para biodiesel; cultivos energéticos, como es el caso del miscanthus; y los residuos orgánicos, ya sea de la agricultura, industria u hogares. Como ya se ha indicado, la biomasa puede convertirse en otro portador de energía –biocombustibles líquidos– siendo los más comunes el bioetanol y el biodiesel para la sustitución de los combustibles fósiles (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008; Van Lienden *et al.*, 2010).

El bioetanol se produce por la fermentación del azúcar extraído de cultivos ricos en azúcares. Estos cultivos presentan un alto nivel de glucosa que por fermentación se metabolizan a etanol y CO₂. Este proceso es el más eficiente y fácil, pero existe otra manera de producirse, a partir del almidón de los cultivos de cereales. Ambos, etanol a partir del azúcar y del almidón, son procesos de primera generación. Esto quiere decir que se utiliza solo una pequeña porción relativa del cultivo –azúcar o almidón–, frente al uso de todo material celulósico, como proceso de segunda generación. Los procesos de primera generación tienen un rendimiento del combustible más limitado al usar solo fracciones de las plantas, pero los de segunda no se espera una comercialización hasta el 2030 (Van Lienden *et al.*, 2010). Son dos los procesos existentes para la elaboración de etanol, molienda seca y molienda húmeda, y en ambos se ha conseguido con el tiempo la disminución del consumo de agua en el proceso. Según Gerbens-Leenes y Hoekstra (2009) el 95% de todo el bioetanol producido a nivel mundial procede de la fermentación de azúcar y almidón, siendo el restante de origen sintético. Los tres cultivos más importantes en la producción de bioetanol son la caña de azúcar, la

remolacha azucarera y el maíz (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009). De todo el bioetanol producido el 75% se utiliza como combustible para el transporte.

La elaboración del biodiesel, un proceso de primera generación, se elabora a partir de cultivos ricos en aceites. El aceite vegetal se trata haciéndolo reaccionar con alcohol –en una esterificación– para producir esteres de alquilo de aceites grasos de cadena larga y, como subproducto, glicerol. En la producción de biodiesel, en países más cálidos puede usarse directamente el aceite vegetal sin la necesidad de la esterificación puesto que presentan una viscosidad más baja que le permite la utilización directa (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009).

La producción de biomasa para el suministro de energía utiliza tierras productivas; ello reduce el área de tierra bioproductiva disponible para otras demandas –producción de alimentos, recursos industriales– o incluso la vegetación natural. Por tanto, el cultivo masivo de biomasa puede provocar un aumento de los precios de los productos agrícolas y forestales, y un incremento de las presiones medioambientales (Stoeglehner y Narodslawsky, 2009). Adicionalmente, la sustitución masiva de los combustibles fósiles por biocombustibles puede suponer grandes impactos en los recursos hídricos, ya que la producción de biomasa es una actividad fuertemente demandante de agua (Van Lienden *et al.*, 2010; Galán del Castillo y Velázquez, 2010).

El transporte en las sociedades occidentales requiere cerca de una tercera parte del total de energía. Este consumo se traduce en una contribución sustancial en los gases de efecto invernadero (GEI). Frente a las sociedades occidentales, los países en transición o en vías de desarrollo tienen requerimientos de energía relativamente bajos. Con los pronósticos de crecimiento económico en estos países intensificará la necesidad de combustibles, con enormes consecuencias. La introducción gradual de biocombustibles para el reemplazo de los tradicionales del transporte llevará a grandes esfuerzos, en requerimientos de agua principalmente (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2010). La transición a una mayor producción de biocombustibles dará lugar a un incremento en la huella hídrica, en relación al sistema de transporte global, en un factor de 10 en la huella hídrica anual tal y como apunta Gerbens-Leenes *et al.* (2012) para 2030, un paso de 90km³/año a 970km³/año.

En relación con los biocombustibles hay un debate polarizado en la comunidad científica. Algunos autores los consideran útiles para promover el desarrollo económico y hacer frente a la pobreza rural; pero otros destacan los aspectos negativos relacionados con el uso del suelo, el aumento de los precios de los alimentos y el aumento de la presión sobre los recursos hídricos (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2010). No obstante, aunque se reconoce el vínculo entre la producción de biocombustibles y el aumento del consumo de agua, los efectos potenciales no han sido analizados en detalle (Galán del Castillo y Velázquez, 2010; Van Lienden *et al.*, 2010)

Si la problemática del vínculo entre la producción de biocombustibles y los recursos hídricos se plantea bajo un enfoque global, integral y de planificación territorial, la huella hídrica es un instrumento de gran utilidad (Galán del Castillo y Velázquez, 2010). La huella hídrica permite comparar los requerimientos de agua de distintos cultivos, así como establecer una pauta de comparación entre los biocombustibles y otras fuentes energéticas alternativas. Además, permite identificar los cultivos y países productores de bioenergía más eficientes en el uso de los recursos hídricos (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a), así como identificar escenarios críticos y estrategias de mitigación (Domínguez Faus *et al.*, 2009).

Por otra parte, como se comprobará en el apartado de revisión de la literatura, la huella hídrica de la biomasa depende del tipo de cultivo, del modo de producción agraria y del clima (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008); por tanto, aunque los biocombustibles puedan presentar enormes beneficios frente a los combustibles fósiles, el grado o la medida en que su producción sea sostenible solo pueden decidirse en un contexto regional (Stoeglehner y Narodslawsky, 2009).

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para dar respuesta a los objetivos planteados en este trabajo se ha realizado una revisión de la literatura. En primer lugar se muestra sintéticamente la metodología utilizada para la estimación de la huella hídrica en los estudios analizados. En segundo lugar se ofrecen los principales resultados de la literatura revisada en profundidad; más específicamente se compara la huella hídrica de la biomasa con otras fuentes de energía renovables y no renovables, y se muestran los datos de huella hídrica de los principales cultivos utilizados en la producción de bioelectricidad, bioetanol y biodiesel.

3.1 Metodología utilizada en los estudios analizados

La metodología para la estimación de la huella hídrica de los cultivos es la metodología estándar establecida por Hoekstra y Chapagain (2011).

La huella hídrica es definida como un indicador de uso de agua dulce que analiza tanto el uso de agua directo como indirecta de un consumidor o productor. La huella hídrica de un individuo, comunidad o negocio se define como el total de agua dulce usada para producir bienes y servicios consumidos por un individuo o comunidad o producidos por un negocio. El uso de agua se mide en términos de volumen consumido -evaporado o incorporado en el producto- y/o la contaminada por unidad de tiempo (Hoekstra y Chapagain, 2011).

Sin embargo, para los propósitos de este trabajo es más útil la huella hídrica de un producto, definida en Gerbens-Leenes *et al.* (2009a) como el volumen de agua dulce utilizada a lo largo de toda la cadena de suministro para la producción en un lugar determinado. Realmente el contenido de agua en el producto es insignificante en comparación con la huella hídrica en el ciclo de vida, dominado principalmente por la etapa de producción agrícola cuando se trata de biomasa.

La huella hídrica consta de tres componentes: huella hídrica verde, huella hídrica azul y huella hídrica gris. Aplicándolas a la producción de biomasa, la huella hídrica verde hace referencia al agua de lluvia que se evapora durante la producción, sobre todo durante el crecimiento del cultivo; la huella hídrica azul se refiere a las aguas superficiales y subterráneas utilizadas para riego que se evaporan durante el crecimiento del cultivo; y, por último, la huella hídrica gris, o el volumen de agua contaminada durante la producción, definida como la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes vertidos en el sistema natural para que la calidad de agua esté por encima de las normas de calidad acordadas (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a; Hoekstra y Chapagain, 2011).

Una diferencia evidente entre las huellas hídricas de otras fuentes primarias y la de la biomasa, es que en esta última proviene de plantas que tienen importantes

requerimientos de agua (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008). La huella hídrica de la bioenergía depende del uso de agua del cultivo (m^3/ha), los rendimientos del cultivo (t/ha) y la energía contenida en el mismo (GJ/t).

Concretamente, el uso de agua del cultivo (enm^3/ha) depende de los requerimientos de agua del cultivo, las precipitaciones y el riego. El uso de agua verde es el volumen de precipitación efectiva –retenida en el suelo– que se evapotranspira desde el campo de cultivo; y el uso de agua azul se refiere al volumen de agua de riego que se evapotranspira desde el campo durante el periodo de crecimiento. Las necesidades de riego se calculan como la diferencia entre los requerimientos de agua del cultivo y la precipitación efectiva (Van Lienden *et al.*, 2010).

Como consecuencia de lo anterior el uso del agua por parte de los cultivos es diferente según el tipo de cultivo, la localización del mismo, las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas (Gerbens-Leene *set al.*, 2009a; Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009, 2010; Van Lienden *et al.*, 2010).

En relación al rendimiento de los cultivos, es decir, aquella parte con valor económico almacenada en la cosecha, también puede variar entre países. La relación entre rendimiento de los cultivos y el rendimiento total de biomasa se denomina índice de cosecha –harvest index, HI– (Van Lienden *et al.*, 2010).

Gerbens-Leenes *et al.* (2008) calculan la huella hídrica de la bioenergía en cinco pasos; metodología que seguirán luego posteriormente otros autores para el cálculo de la huella hídrica.

- Paso 1. Cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos (CWR) en m^3/ha . Se calcula en áreas específicas la estimación de evapotranspiración de referencia.

$$CWR(c) = 10 \cdot \sum_{d=1}^{lp} Kc \cdot ET_0$$

Donde el factor 10 se aplica para convertir los mm a m^3/ha , ET_0 es la evapotranspiración de referencia del cultivo en mm/día y Kc es el coeficiente del cultivo.

- Paso 2. Cálculo del rendimiento total de la biomasa (BY) en t/ha . La diferencia entre el rendimiento de la biomasa total y el rendimiento del cultivo está en la fracción residual, que no es adecuada para alimentos, piensos o materiales de producción, pero sí para la producción de energía.

$$BY(c) = \frac{Y(c)}{HI(c)}$$

Siendo $Y(c)$ es el rendimiento del cultivo en t/ha, y HI es el índice de cosecha para el cultivo c .

- Paso 3. Cálculo de la huella hídrica del cultivo por unidad de masa ($WF_M(c)$) en m^3/t .

$$WF_M(c) = \frac{CWR(c)}{BY(c)}$$

- Paso 4. Cálculo del contenido medio de energía por cultivo hipotético ($E(c)$) en GJ/t. El cálculo se realiza con los datos de combustión de los distintos componentes de las plantas –HHV en KJ/gr, equivalente a GJ/t– con la información de la composición de los cultivos hipotéticos en gr/gr.

$$E(c) = HI(c) \cdot DM_y(c) \cdot \sum_{i=1}^5 C_i \cdot A_{y,i} + [1 - HI(c) \cdot DM_r(c)] \cdot \sum_{i=1}^5 C_i \cdot A_{r,i}$$

Donde $DM_y(c)$ es la fracción de masa seca del rendimiento del cultivo, $DM_r(c)$ es la masa seca de la fracción residual, C es el calor de combustión para cada componente i , y A es la cantidad de cada componente de i de la masa seca.

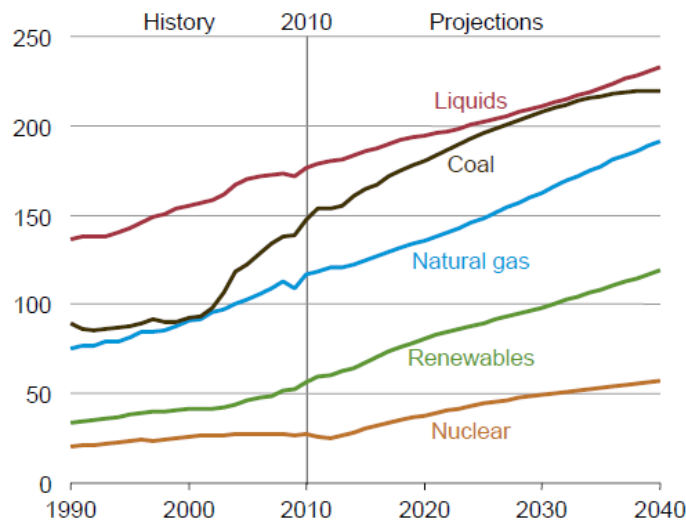
- Paso 5. Cálculo de la huella hídrica de la biomasa ($WF_E(c)$) en m^3/GJ , que se obtiene dividiendo el resultado del apartado 3 por el 4.

$$WF_E(c) = \frac{WF_M(c)}{E(c)}$$

3.2 Resultados obtenidos en los estudios analizados

Van Lienden *et al.* (2010) aportan el dato de 12.000 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) como consumo total anual de energía aproximado de la población humana; de ésta más del 80% procede de los combustibles fósiles –carbón, petróleo y gas natural–. Representa hasta un 7% la energía nuclear –uranio predominantemente– y aproximadamente el 13% lo constituyen fuentes renovables –biomasa, energía eólica y energía hidroeléctrica. De la contribución actual de las energías renovables, la biomasa representa alrededor de un 80%, mientras que el 16% es hidroelectricidad. Si se tiene en cuenta solo el sector del transporte, la mayoría de la energía, un 95% en 2004 procede del petróleo; este sector contribuye con un quinto del incremento mundial de la demanda. La Figura 1 muestra el consumo mundial de energía por tipo de fuente hasta 2010 y proyecciones de consumo hasta 2040.

Figura 1. Consumo mundial de energía por tipo de fuente (en 10^{15} BTUs)



Fuente: EIA (2013).

Comparando las huellas hídricas de las fuentes de energías primarias renovables y no renovables, se obtiene una menor huella hídrica para las primeras. Los datos presentados en Gerbens-Leenes *et al.* (2008), revisados posteriormente en Gerbens-Leenes *et al.* (2009b), muestran que las fuentes primarias no renovables presentan una baja huella hídrica: el uranio de $0,09\text{m}^3/\text{GJ}$, el gas natural $0,11\text{m}^3/\text{GJ}$, el carbón $0,16\text{m}^3/\text{GJ}$, y la mayor huella hídrica corresponde al petróleo crudo ($1,06\text{m}^3/\text{GJ}$). Por lo que respecta a las energías renovables, la huella hídrica de la energía eólica resulta despreciable, la solar térmica es de $0,27\text{m}^3/\text{GJ}$ y, por último, la hidroeléctrica aparece como la gran destacada en el grupo con $22,3\text{m}^3/\text{GJ}$ (ver Tabla 1).

Gerbens-Leenes *et al.* (2008) objetan que los resultados presentados de las huellas hídricas de las fuentes de energía no renovables están subestimados, debido a que los valores presentados son relativamente bajos en comparación a la alta contaminación hídrica que suelen generar tales fuentes.

De acuerdo con los resultados presentados en Gerbens-Leenes *et al.* (2008), la biomasa presenta entre 70-400 veces mayor huella hídrica que las restantes energías primarias, excluyendo la hidroeléctrica. La huella hídrica de la energía hidroeléctrica es de $22,3\text{m}^3/\text{GJ}$ (Gerbens-Leenes *et al.*, 2008), si bien en Mekonnen y Hoekstra (2011) dicho valor alcanza $68\text{m}^3/\text{GJ}$. Al comparar la huella hídrica de la energía derivada de la hidroelectricidad con las huellas hídricas de otras fuentes renovables, se comprueba que la ésta presenta una huella hídrica relativamente grande por GJ. Sin embargo, una comparación más equilibrada entre hidroelectricidad y bioelectricidad exige utilizar las

huellas hídricas azules de ambas fuentes- Así, resulta que la mayoría de los cultivos utilizados para la producción de bioelectricidad presentan huellas hídricas mayores a la de la hidroelectricidad, aunque también existen otros cultivos que son más eficientes en el consumo de agua, presentando una menor huella hídrica, como es el caso de la caña de azúcar, la remolacha y el maíz. Sin embargo, estos resultados no permiten deducir que toda la energía hidroeléctrica pueda ser sustituida por biomasa para la generación de bioelectricidad; de una parte, ello resulta inviable debido a la falta de disponibilidad de tierra; por otra, numerosas veces las presas son construidas con otros fines –laminación de avenidas, reservorios para usos agrícolas o urbanos, etc.– (Mekonnen y Hoekstra, 2011). En todo caso, debe considerarse a la hidroelectricidad como una gran consumidora de agua.

Tabla 1. Huella hídrica de la producción de energía a partir de diversas fuentes primarias.

Autor/es (año)	Fuente	Huella Hídrica (m ³ /GJ)
Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2008) Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2009b)	Carbón	0,16
	Electricidad calor del sol	0,27
	Electricidad energía del viento	0,00
	Electricidad hidroeléctrica	22,3
	Gas natural	0,11
	Petróleo crudo	1,06
	Uranio	0,09
Mekonnen y Hoekstra (2012)	Energía hidroeléctrica	68

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

Al evaluar la huella hídrica de los distintos tipos de biomasa como productores de electricidad se manifiesta, en primer lugar, que la huella hídrica de la bioelectricidad es menor generalmente que la de los otros biocombustibles –bioetanol y biodiesel–; es decir, es más eficiente usar la biomasa total –la planta entera– ya sea para producir electricidad o calor, que solo fracciones del cultivo para obtener biocombustible –como en el caso de azúcar, almidón o cultivos con alto contenido en aceite– (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a). Comparando bioetanol y biodiesel, se demuestra que en el primer caso la huella hídrica es menor, lo que indica que el bioetanol es más eficiente en el consumo de agua que el biodiesel como se verá con los datos aportados a continuación.

Estudiando concretamente el caso de la bioelectricidad a partir de diversos cultivos, puede verse como tres cultivos destacan como los más eficientes (ver Tabla 2): el maíz –valores entre 17-50m³/GJ–, la caña de azúcar y la remolacha azucarera –con valores cercanos a 50m³/GJ–; y entre los menos eficientes según su huella hídrica aparecen la jatrofa y la colza –396m³/GJ y 383m³/GJ respectivamente–. Es destacable la gran diferencia existente entre los cultivos más y menos eficientes siendo la diferencia de un factor de 10 entre la remolacha azucarera y la jatrofa, 48m³/GJ frente a 396m³/GJ (Gerbens-Leenes *et al.*,2009a). Por tanto, la bioelectricidad a partir de maíz resulta la vía más eficiente en términos de consumo de agua, siendo por tanto este cultivo el más frecuentemente utilizado para este fin (Gerbens-Leenes y Hoekstra 2010, 2011).

No obstante, los resultados no están exentos de polémica. Maes *et al.* (2009) objetan que en Gerbens-Leenes *et al.* (2008) se sobreestima el valor de huella hídrica asignado a la jatrofa. Ello sería debido a un uso inapropiado de la metodología, utilizando datos insuficientes que no permiten extraer conclusiones sólidas a partir de las estimaciones realizadas. Para Gerbens-Leenes *et al.* (2009c) no existiría un problema metodológico, aunque si se reconoce un problema de falta de datos disponibles sobre la producción de jatrofa. En Gerbens-Leenes *et al.* (2009d), con datos de mejor calidad, la jatrofa aparece como un cultivo relativamente ineficiente; en condiciones de estrés hídrico la huella hídrica por unidad de aceite podría reducirse, por lo que es esencial diferenciar entre cultivos de secano, con escasez de agua, y cultivos de regadío o en condiciones de suficiente lluvia.

En la producción de bioetanol destacan tanto la caña de azúcar como la remolacha azucarera como los dos cultivos con menores huellas hídricas (ver tabla 3) y más ampliamente utilizados–valores de caña de azúcar entre 70 y 119m³/GJ y remolacha azucarera entre 36 y 56 m³/GJ–; pero también la patata presenta una huella hídrica relativamente baja –alrededor de 103 m³/GJ–. Entre la remolacha azucarera y caña de azúcar, la primera presenta un mayor rendimiento en obtención de bioetanol por hectárea, pero su uso está limitado todavía frente a la caña de azúcar ya que se cultiva en climas templados (Gerbens-Leenes y Hoektra 2009).El sorgo es el menos eficiente en consumo de agua (Gerbens-Leenes *et al.* 2009a). Otros cultivos, como el maíz, el trigo, la yuca o la cebada –entre otros–, se encuentran en posiciones intermedias en relación a sus huellas hídricas (ver Tabla 3).

Tabla 2. Huella hídrica de la producción de bioelectricidad a partir de diversos cultivos

Autor/es (año)	Lugar del estudio	Cultivos	Huella hídrica (m ³ /GJ)			
			HHt	HHv	HHa	HHg
Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2008) Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2009b)	Países Bajos, Brasil, Zimbabue, EE.UU.	Biomasa	71,54	-	-	-

Tabla 2. (continuación)

Autor/es (año)	Lugar del estudio	Cultivos	Huella hídrica (m ³ /GJ)			
			HHt	HHv	HHa	HHg
Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2009a)	Brasil, China, Rusia, Alemania, Nigeria, Japón, Sudáfrica, Australia, Angola, Guinea, Filipinas, Vietnam, India, Bangladesh, Argentina, Egipto, Kazajstán, Yemen, Indonesia, Guatemala, Italia, Paraguay, etc.	Caña de azúcar	50	23	27	-
		Cáscara arroz	85	54	31	-
		Cebada	70	31	39	-
		Centeno	77	42	36	-
		Colza	383	154	229	-
		Jatrofa	396	165	231	-
		Maíz	50	30	20	-
		Patata	105	58	47	-
		Remolacha	46	19	27	-
		Soja	173	78	95	-
Sorgo	180	102	78	-		
Trigo	93	39	54	-		
Yuca	148	127	21	-		
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2009)	Diversos países	Caña de azúcar	1500*	675*	735*	90*
		Maíz	561*	-	-	-
		Remolacha	935*	327,25*	420,75*	149,6*
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2010)	UE, India, China, EEUU, Pakistán, Perú, Chile, Rusia, Nigeria, Argentina, Canadá, Indonesia, etc.	Maíz	33	15	18	-
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2011)	UE	Maíz	17	14	3	-
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2012)	UE	Maíz	-	522*	63*	176*

Notas: **HHt**, huella hídrica total; **HHv**, huella hídrica verde; **HHa**, huella hídrica azul; **HHg**, huella hídrica gris.
*unidades en m³/T.

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

Tabla 3. Huella hídrica de la producción de bioetanol a partir de diversos cultivos

Autor/es (año)	Lugar del estudio	Cultivos	Huella hídrica (m ³ /GJ)			
			HHt	HHv	HHa	HHg
Gerbens-Leenes <i>et al.</i> (2009a)	Brasil, China, Rusia, Alemania, Nigeria, Japón, Sudáfrica, Australia, Angola, Guinea, Filipinas, Vietnam, India, Bangladesh, Argentina, Egipto, Kazajstán, Yemen, Indonesia, Guatemala, Italia, Paraguay, etc.	Arroz	191	121	70	-
		Caña de azúcar	108	40	58	-
		Cebada	159	70	89	-
		Centeno	171	92	79	-
		Maíz	110	67	43	-
		Patatas	103	56	46	-
		Remolacha	59	24	35	-
		Sorgo	419	283	182	-
		Trigo	211	89	123	-
Yuca	125	107	18	-		
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2009)	Diversos países	Caña de azúcar	3280,1*	-	-	196,81*
		Maíz	2432,19*	1216,1*	875,59*	340,51*
		Remolacha	1717,36	-	-	-
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2010)	Asia (sin China)	Caña de azúcar	119	42	77	-
	Australia	Caña de azúcar	70	38	32	-
	China	Caña de azúcar	83	58	25	-
	Latino América	Caña de azúcar	104	56	48	-
	Norte América	Maíz	78	41	37	-
	UE	Remolacha	39	19	20	-
	URSS	Remolacha	163	43	120	-
	África	Yuca	141	124	17	-
Mekonnen y Hoekstra (2010a) Mekonnen y Hoekstra (2011)	UE, India, China, EEUU, Pakistán, Perú, Chile, Rusia, Nigeria, Argentina, Canadá, Indonesia, etc.	Caña de azúcar	-	60	25	6
		Cáscara arroz	-	113	34	18
		Cebada	-	119	8	13
		Centeno	-	140	2	10
		Maíz	-	94	8	19
		Patata	-	62	11	21
		Remolacha	-	31	10	10
		Sorgo	-	281	10	9
		Trigo	-	126	34	20
		Yuca	-	106	0	3

Tabla 3. (continuación)

Autor/es (año)	Lugar del estudio	Cultivos	Huella hídrica (m ³ /GJ)			
			HHt	HHv	HHa	HHg
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2011)	UE	remolacha	36	36	2	-

Notas: **HHt**, huella hídrica total; **HHv**, huella hídrica verde; **HHa**, huella hídrica azul; **HHg**, huella hídrica gris
*unidades en m³/T.

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

En relación con la utilización de biomasa para la producción de biodiesel, la colza destaca como el cultivo más eficiente –valores entre 99 m³/GJ y 409 m³/GJ–, junto con el aceite de palma, cacahuetes o la soja –respectivamente, 150 m³/GJ, 177 m³/GJ y 326-345 m³/GJ– (ver Tabla 4); los cultivos más ineficientes en consumo de agua son el coco, con la mayor huella hídrica azul presente en todos los cultivos estudiados con un valor de 4720 m³/GJ, seguido de lejos por la jatrofa –547 m³/GJ–.

Tabla 4. Huella hídrica de la producción de biodiesel a partir de diversos cultivos

Autor/es (año)	Lugar del estudio	Cultivos	Huella hídrica (m ³ /GJ)			
			HHt	HHv	HHa	HHg
GerbensLeenes <i>et al.</i> (2009a)	Jatrofa: India, Indonesia, Nicaragua, Brasil y Guatemala	Colza	409	165	245	-
GerbensLeenes <i>et al.</i> (2009c)		Jatrofa	547	239	335	-
		Soja	349	177	217	-
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2010)	UE	Colza	139	78	60	-
Mekonnen y Hoekstra (2010a) Mekonnen y Hoekstra (2011)	UE, India, China, EEUU, Pakistán, Perú, Chile, Rusia, Nigeria, Argentina, Canadá, Indonesia, etc.	Aceite de palma	-	150	0	6
		Cacahuetes	-	177	11	12
		Coco	-	4720	3	28
		Colza	-	145	20	29
		Girasol	-	428	21	28
		Semilla algodón	-	310	177	60
	Soja	-	326	11	6	
Gerbens-Leenes y Hoekstra (2011)	UE	Colza	99	99	0	-

Notas: **HHt**, huella hídrica total; **HHv**, huella hídrica verde; **HHa**, huella hídrica azul; **HHg**, huella hídrica gris.

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la tabla.

En conclusión, los cultivos más eficientes desde el punto de vista de su huella hídrica para la producción de los distintos productos derivados de la biomasa son: el maíz para la bioelectricidad, la remolacha azucarera para el bioetanol y, por último, la colza para la producción de biodiesel. Comparándolos entre ellos, la bioelectricidad obtenida del maíz sería la más eficiente en términos de consumo de agua, seguida de cerca por el bioetanol obtenido de la remolacha y, por último, como menos eficiente, el biodiesel producido con colza.

No obstante lo anterior, es importante señalar que no en todos los cultivos anteriormente citados se han calculado todos los componentes de la huella hídrica; en muchos de ellos es evidente la falta del cálculo de la huella hídrica gris. Esta suele ser pequeña, alrededor de un 10% del total de la huella hídrica, pero pueden encontrarse ejemplos de países en los que puede alcanzar un 20% cuando se utiliza maíz. Y dichos valores pueden ser mayores según la norma de calidad que se usen para el cálculo (Gerbens-Leenes y Hoektra, 2009), por lo que no tomar en consideración la huella hídrica gris puede suponer una importante infravaloración de las huellas hídricas totales.

4. LA ESCASEZ DE AGUA PRODUCIDA POR LOS BIOCOMBUSTIBLES

Para dar respuesta a este objetivo de la investigación se analizarán tres aspectos de los biocombustibles: en primer lugar, en qué países o regiones se producen principalmente; en segundo lugar, cuáles son los modos de producción; y, por último, cuáles son los países propensos a sufrir escasez de agua.

4.1 ¿Dónde se producen los biocombustibles?

La huella hídrica de los cultivos varía según dónde se produzcan como se ha comprobado en la revisión de literatura (Mekonnen y Hoekstra, 2010).

Teóricamente todos los cultivos pueden usarse para la producción de bioenergía, lo que no ocurre en la práctica, dominada por una serie de cultivos: caña de azúcar, remolacha azucarera, maíz, colza y soja; a los que se les suma, en menor proporción, cebada, centeno, cáscara de arroz, trigo, yuca, sorgo y jatrofa. Estos doce cultivos contribuyen en el 80% a la producción mundial (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a).

En relación a estos cultivos, no todos los países contribuyen por igual en la producción a nivel mundial. Gerbens-Leenes *et al.* (2009a) lista la contribución de distintos países: Brasil produce el 27% de la caña de azúcar a nivel mundial; EEUU el 50% de la soja, 40% del maíz y el 25% del sorgo; China el 18% de todo el trigo, 33% del arroz con cáscara, el 20% de patatas, y el 27% de semillas de colza. Por otra parte, en cuanto al 50% del centeno mundial proviene de Rusia y Alemania, y Nigeria tiene la mayor producción de la yuca. En cuanto a la producción de remolacha azucarera y cebada queda distribuida entre distintos países. Son lo tanto, Brasil, Estados Unidos y China, los países con mayor contribución a la producción global (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009a).

El análisis por regiones de Van Lienden *et al.* (2010) proporciona los cultivos dominantes para la elaboración de biodiesel y bioetanol. Para la elaboración de biodiesel, en América del Norte y del Sur y Asia se utiliza predominantemente la soja; mientras que en Europa, la ex Unión Soviética y Australia se utiliza la colza. Para el caso del bioetanol, en América Latina, África y Asia la caña de azúcar; en Europa y la ex Unión Soviética, la remolacha azucarera y trigo; y en América del Norte y el Pacífico, el maíz.

En relación al total de combustibles de transporte en el mundo, solo el 2% lo componen biocombustibles líquidos. De este 2%, el 85% es etanol, de los que los mayores productores son Brasil a partir de caña de azúcar y EEUU procedente de maíz. El resto es biodiesel, del que la Unión Europea es el mayor productor –en un 60%– predominantemente con el uso de colza (Gerbens y Hoekstra, 2009; Van Lienden *et al.*, 2010)

Coincidiendo con una elevada producción de biocombustibles, hay tres cuencas fluviales importantes con un alto grado de estrés hídrico relacionado con tal producción: la cuenca Dniéper en Ucrania, y las cuencas del Indo y Ganges en la India y Pakistán. En la cuenca del Dniéper, principal río de Ucrania, se cultiva remolacha azucarera, cuya huella hídrica azul corresponde al 47% de la huella hídrica azul de toda Ucrania. El mayor problema que presenta la cuenca, no es la retirada de agua azul, sino la contaminación que sufre el río por el uso excesivo de fertilizantes, por la industria y el mal tratamiento de las aguas residuales. La alta huella hídrica gris de la remolacha azucarera sumada a una alta producción, contribuyen a la gran huella hídrica gris de la cuenca (Gerbens y Hoekstra, 2009, 2012).

Las cuencas del Indo y Ganges en la India y Pakistán, donde se produce principalmente caña de azúcar, también presentan estrés hídrico. El Ganges durante ciertas épocas experimenta estrés hídrico severo, previendo peores situaciones en el futuro. En el Indo, tanto en la India como en Pakistán se produce caña de azúcar en zonas de escasez de agua. Especialmente Pakistán sufre de graves problemas de estrés hídrico; han canalizado el río para su utilización, resultando en una alta sobreexplotación de las aguas subterráneas y salinización del suelo (Gerbens y Hoekstra, 2009, 2012).

4.2 ¿Qué modos de producción se utilizan para la producción de biocombustibles?

Como se ha visto en la revisión de la literatura, los modos de producción es otro factor del que depende la huella hídrica. El riego es un factor importante, por lo que influirá si la agricultura es de secano o de regadío.

Generalmente, la huella hídrica promedio mundial de consumo de agua –verde más azul– por tonelada cosechada, es menor en cultivos de regadío que en cultivos de secano. A nivel mundial, la huella hídrica de la agricultura de secano es de 5173 Gm³/año –91% verde, 9% gris–, frente a al regadío, 2230 Gm³/año –48% verde, 40% azul y 12% gris–. Esto se debe principalmente a que en el regadío los rendimientos son mayores que en secano (Mekonnen y Hoekstra, 2010, 2011).

Existen excepciones, como el caso del trigo en que la huella hídrica de secano y regadío con muy parecidas a escala global, y para la soja, caña de azúcar y la colza, ocurre a la inversa, siendo la huella hídrica menor en secano. Se debe a que, aun siendo los rendimientos mayores en regadío, hay más agua para satisfacer las necesidades de los cultivos, lo que se traduce en una evapotranspiración real muy cerca de la potencial. A la inversa, en secano la evapotranspiración real es menor que la potencial en el período de crecimiento (Mekonnen y Hoekstra, 2010, 2011).

Gerbens-Leenes *et al.* (2009a) analiza las excepciones de cultivos que no requieren riego en ciertos lugares, así como el caso contrario, los muy dependientes del riego. Ejemplos de la no necesidad de riego son: la remolacha azucarera en Japón; el maíz en Sudáfrica; el trigo en Australia; la yuca en Nigeria, Angola, Benín, Guinea, Filipinas, Vietnam e India; la patata en Bangladesh, Perú y Japón; el sorgo en Nigeria, Etiopía, Chad y Venezuela; y en Bangladesh la colza. Frente a estos países, aquellos en que las necesidades de riego corresponde casi por completo a los requerimientos de agua del cultivo: la caña de azúcar en Argentina (96%) y Egipto (92%); trigo en Argentina (100%), Kazajstán (98%) y Uzbekistán (98%); la patata y cebada en Kazajstán (100%); el sorgo de Yemen (100%); y de soja de Brasil (95%).

4.3 ¿Es un país propenso a sufrir escasez de agua debido a los biocombustibles?

Como se ha visto a lo largo del estudio, un aumento en la producción de biocombustibles incrementará significativamente la demanda de agua, agudizando la escasez local. La expansión de la irrigación tendrá consecuencias negativas, ya que aun habiendo regiones en las que la lluvia puede suplir todas las necesidades de agua de los cultivos, fundamentalmente la mayoría de los cultivos dependen del agua de riego (Domínguez Faus *et al.*, 2009).

En la actualidad, el estrés hídrico ya es un problema en muchos países del mundo, áreas que se espera que se expandan. Las poblaciones afectadas por el estrés hídrico sufrirán aún más por el cambio climático, el crecimiento económico se verá afectado, consecuencias vinculadas a la expansión del regadío. Un ejemplo es la caña de azúcar, cuya localización principal son cuencas estresadas (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2009).

Actualmente, las zonas con mayor contribución en la huella hídrica azul por los biocombustibles coinciden en muchos casos con grandes regiones áridas y semiáridas: la parte occidental de Estados Unidos, una franja a lo largo de la costa occidental de América del Sur –Perú y Chile–, el sur de Europa, el norte de África, la Península Arábiga, Asia central, Pakistán, el norte de la India, el noroeste de China y partes de Australia (Mekonnen y Hoekstra, 2010).

Las decisiones que afectan al suministro futuro de un país se toman ahora, y aun habiendo muchas incertidumbres acerca de la energía que se consumirá y las fuentes de las que será, existe una necesidad de planificar el suministro. Para tener una perspectiva de lo que puede pasar en un futuro se utiliza la planificación de escenarios como un instrumento útil. Estos se basan en suposiciones sobre fuerzas motrices y las relaciones entre ellas, resultando diversos escenarios para un mismo caso (Van Lienden *et al.*, 2010). Haciendo uso de la planificación de escenarios, diversas investigaciones se han llevado a cabo para predecir los futuros países propensos a sufrir escasez de agua.

Un ejemplo de estudio es la Unión Europea, que ha ido estableciendo progresivas obligaciones de reemplazo de gasolina por biocombustibles, marcando como objetivo el 10% de reemplazo para 2020. Este objetivo resultará en una huella hídrica de $62\text{Gm}^3/\text{año}$ -95% verde, 5%-, equivalente al 10% de la actual huella hídrica europea para comida y algodón (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2010, 2011).

Las diferencias entre países europeos son grandes; dependen del total de energía usada para el transporte y la huella hídrica propia para los cultivos dedicados a los biocombustibles para transporte. Las diferencias de uso de energía per cápita suponen, por ejemplo, que Bulgaria presente una huella hídrica de 60 m^3 por año y per cápita, frente a Finlandia, con 500m^3 por año y per cápita (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2010, 2011).

Si el 10% de reemplazo se compusiera íntegramente de etanol, y se cumpliera para 2020, las huellas hídricas de los países europeos cambiarían. Según estos supuestos, España, Alemania, Italia y Reino Unido presentarían las huellas hídricas más altas, seguidas de Francia, Suecia, Países Bajos y Polonia. Alemania e Italia presentan una huella hídrica parecida a pesar de que Alemania dedica un 50% más de uso de la energía para el transporte. Resaltan España, Portugal y Grecia al sur de Europa con gran dependencia del riego y con una alta huella hídrica. Eslovenia, Letonia, Estonia e Islandia presentan la huella hídrica menor, principalmente debido al poco uso de energía en el sector transporte.

La principal limitación del estudio está en la posibilidad real del uso de un mix de bioetanol y biodiesel, o la exportación fuera de la Unión Europea, por lo que los datos presentados variarían, incrementándose las huellas hídricas (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2010, 2011).

Van Lienden *et al.* (2010) y Gerbens-Leenes *et al.* (2012), por otro lado, estudian el cambio en el consumo de bioenergía –biodiesel y bioetanol– en un periodo de tiempo comprendido entre 2005-2030. Las primeras conclusiones anuncian que el consumo, tanto de biodiesel como bioetanol, se incrementará significativamente. Si en 2005 el bioetanol supone el 85%, frente el biodiesel un 15%, para 2030 se incrementará bastante más el consumo del biodiesel que el bioetanol –15 veces frente 6 veces–.

Los biocombustibles ya contribuyen de manera importante en las regiones desarrolladas: Europa es el principal consumidor de biodiesel; el América del Norte, seguido de cerca por América Latina, de etanol. Se espera que estas mismas regiones sigan siendo importantes consumidoras en 2030. Sin embargo se incorporará Asia, que según sus metas establecidas, incrementará el bioetanol en 25 veces y el biodiesel 84 veces. Para 2030 se espera que Asia supere a América del Norte en el consumo de biodiesel, aunque Europa siga siendo el mayor consumidor. En consumo de bioetanol Europa superará a América Latina, detrás de América del Norte (Van Lienden *et al.*, 2010; Gerbens-Leenes *et al.*, 2012).

El incremento de consumo de biocombustibles tiene efectos directos en el uso de agua de la región. El crecimiento del sector transporte y un aumento en los biocombustibles son los factores que explican un incremento en la huella hídrica de las regiones. Existe una coincidencia casi directa en el tamaño de la huella hídrica con el consumo de la región de biocombustibles. Sin embargo, existen diferencias en las magnitudes relativas a los componentes verde y azul de las huellas hídricas de las regiones, pero sin duda el incremento de la huella hídrica azul en especial será notorio. A nivel mundial se espera que la huella hídrica azul de los biocombustibles aumente en un 0,5% del agua azul disponible en 2005 al 5,5% en 2030. De la demanda total de agua azul, para 2030 los biocombustibles representarán el 9%, frente al 47% de la agricultura, el 24% de los hogares y el 20% de la industria (Van Lienden *et al.*, 2010; Gerbens-Leenes *et al.*, 2012).

En general, en 2030 las extracciones excederán la disponibilidad de agua, principalmente en la agricultura, mientras que la producción de biocombustibles presentará extracciones relativamente bajas del total.

Del total de la huella hídrica para 2030, Estados Unidos, China, Brasil e India serán los mayores consumidores tanto de agua azul y verde, seguidos de Sudáfrica, Pakistán, Alemania, España, Francia e Italia. Estos son seis países que excederán el agua disponible y usarán los flujos medioambientales. En Europa, son esencialmente los cuatro países mencionados los que, con su huella hídrica de los biocombustibles, contribuirán significativamente a la escasez de agua (Van Lienden *et al.*, 2010; Gerbens-Leenes *et al.*, 2012).

Es posible que para 2030 se desarrollen los procesos de segunda generación, resultando así huellas hídricas menores gracias a una mayor eficiencia en cultivos y procesos.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo actual y futuro no solo crea mayores necesidades de energía, también de más recursos naturales, como es el caso del agua dulce. El patrón de consumo al estilo occidental no puede mantenerse en todo el mundo, ya que los recursos son limitados. Esto lleva a la reconsideración por parte de algunos gobiernos sobre uso de la energía fósil, tras volverse dependientes de otros países. La biomasa se presenta por tanto como un recurso que puede disminuir esta dependencia. Pero el uso de biomasa no está exento de problemas, como el aumento de precio de los alimentos o un uso desmedido de suelo. En vínculo entre biomasa y agua es tal, que un incremento en el consumo de biomasa puede llevar a generar problemas con la disponibilidad y calidad de las aguas, así como generar problemas de estrés hídrico en determinadas zonas (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2011).

La biomasa puede proporcionar diferentes formas de bioenergía, tanto electricidad como biocombustibles. Estos últimos son portadores de energía a su vez, siendo los más comunes bioetanol y biodiesel para la sustitución de los combustibles fósiles. El indicador de huella hídrica, entendido como indicador de uso de agua dulce, directo e indirecto, en la producción agrícola sirve para analizar la apropiación humana de agua dulce en el uso de biomasa para la producción de bioenergía.

En la comparación de huellas hídricas, fuentes primarias no renovables y las renovables, resulta un valor inferior relativamente inferior para las primeras. Tanto la energía hidroeléctrica como la biomasa, son grandes consumidoras de agua. Excluyendo la hidroeléctrica, la huella hídrica de la biomasa es entre 70 y 400 veces mayor que las restantes energías primarias.

Al evaluar la huella hídrica de los distintos tipos de biomasa, vemos que para la producción de bioelectricidad, los análisis muestran como el maíz es el cultivo más eficiente, con una huella hídrica entre 17-50m³/GJ, seguido de la caña de azúcar y la remolacha azucarera, con valores cercanos a 50m³/GJ. Los cultivos menos eficientes son la jatrofa y la colza, alrededor de los 400m³/GJ.

En la producción de bioetanol, destacan la caña de azúcar y la remolacha azucarera como los cultivos más utilizados así como los más eficientes, con valores de huella hídrica entre 70-119 m³/GJ y 36-56 m³/GJ, respectivamente. El sorgo se destaca como el cultivo menos eficiente.

Para la producción de biodiesel la colza destaca como el cultivo más eficiente, con valores de huella hídrica de entre 99- 409 m³/GJ, seguida del aceite de palma, cacahuets o la soja. En este caso destaca el coco como cultivo con mayor huella hídrica azul de todos los cultivos estudiados, 4720 m³/GJ.

Comparando los productos derivados de la biomasa entre sí, y teniendo en cuenta el cultivo más eficiente en cada caso, la bioelectricidad obtenida con el maíz es forma de producción más eficiente, seguida de cerca del bioetanol con la remolacha, y por último y menos eficiente, el biodiesel producido con colza.

La huella hídrica de los cultivos varía según dónde se produzcan. Destacan Brasil, Estados Unidos y China como países con mayor contribución a la producción global de biocombustibles.

En cada región del mundo predomina un cultivo en especial. Para la elaboración de biodiesel, en América del Norte y del Sur y Asia se utiliza predominantemente la soja; mientras que en Europa, la ex Unión Soviética y Australia se utiliza la colza. Para el caso del bioetanol, en América Latina, África y Asia la caña de azúcar; en Europa y la ex Unión Soviética, la remolacha azucarera y trigo; y en América del Norte y el Pacífico, el maíz.

Destacan la cuenca Dniéper en Ucrania, productora de remolacha azucarera, y las cuencas del Indo y Ganges en la India y Pakistán, productoras de caña de azúcar, como regiones que sufren de estrés hídrico debido a tales producciones.

Los modos de producción es otro factor del que depende la huella hídrica. A nivel general, la huella hídrica promedio de consumo de agua –verde más azul– por tonelada cosechada, es menor en cultivos de regadío que en cultivos de secano. La agricultura de secano tiene una huella hídrica de 5173 Gm³/año –91% verde, 9% gris–, frente a al regadío, 2230 Gm³/año –48% verde, 40% azul y 12% gris–. Se debe principalmente a que en la producción por regadío los rendimientos son mayores que en secano.

Una de las conclusiones claves es que, el incremento en la producción de biocombustibles incrementará significativamente la demanda de agua, agudizando la escasez local. La expansión del riego tendrá consecuencias altamente negativas sobre todo en países que ya presentan problemas de estrés hídrico.

En la Unión Europea, según el objetivo de reemplazo del 10% a biocombustibles para 2020, dará como resultado el aumento de la huella hídrica en 62Gm³/año -95% verde, 5%-, equivalente al 10% de la actual huella hídrica europea para comida y algodón. Los países con las huellas hídricas más altas en 2020 serían España, Alemania, Italia y Reino Unido, seguidas de Francia, Suecia, Países Bajos y Polonia. Alemania e Italia. Resaltan España, Portugal y Grecia al sur de Europa con gran dependencia del riego y con una alta huella hídrica.

Para 2030, a nivel mundial, se espera que tanto el consumo de biodiesel como de bioetanol, se incrementen significativamente. Se espera que la huella hídrica azul de los biocombustibles aumente en un 0,5% del agua azul disponible en 2005 al 5,5% en 2030. Los biocombustibles representarán el 9% de la demanda total de agua azul, frente al

47% de la agricultura, el 24% de los hogares y el 20% de la industria. En general, las extracciones excederán la disponibilidad de agua para 2030.

Del total de la huella hídrica para 2030, Estados Unidos, China, Brasil e India serán los mayores consumidores tanto de agua azul y verde, seguidos de Sudáfrica, Pakistán, Alemania, España, Francia e Italia. Estos países contribuirán significativamente a la escasez de agua de las regiones.

A lo largo del análisis puede observarse que la gran proporción de agua verde indica su importante papel en la producción global. El agua azul es proporcionalmente menor, excepto en regiones áridas o semiáridas donde la escasez aumenta la proporción de agua azul. El uso de agua azul, aun siendo más eficiente que la verde, es el que está asociado a los impactos medioambientales y energéticos (Galán del Castillo y Velázquez, 2010). Sin embargo, es en las regiones áridas y semiáridas, la producción sin uso adicional de agua azul es casi imposible. Por tanto es imprescindible una estrategia de uso de agua azul-verde equilibrada para abordar el aumento de la demanda sin comprometer los recursos hídricos disponibles (Mekonnen y Hoekstra, 2010).

Para que la transición hacia la producción de biomasa sea sostenible, es la política la que debe tomar decisiones acertadas. Las evaluaciones de la huella hídrica proporcionan información crítica a los políticos para implementar programas sostenibles con el medio ambiente. Existen distintas posibilidades que puedan tenerse en cuenta para la disminución de la huella hídrica para disminuir los impactos asociados a la producción de biocombustibles.

En primer lugar se impone la necesidad de la transformación del sistema de transporte actual. El consumo de biocombustibles no puede sino acompañarse de una reducción de la demanda de energía para el transporte. Son además muchos los países que ignoran el agua en sus políticas de biocombustibles, por lo que es una necesidad la concienciación de las autoridades de que este es un problema relevante, sobre todo en las zonas de escasez de agua.

Para la disminución de la huella hídrica, es necesario reducirla en sus tres componentes. Para la huella hídrica verde, se reducirá incrementando la productividad de la tierra; para la huella hídrica azul, la disminución tendrá lugar con riego más eficiente y seleccionando los mejores cultivos para cada caso; y en el caso de la huella hídrica gris, con la menor aplicación de químicos en los cultivos (Gerbens-Leenes y Hoekstra, 2011).

Otra medida de actuación, como recoge Domínguez Faus *et al.* (2009), sería reflejar los precios reales del agua en el precio final de los biocombustibles.

Un método para reducir las presiones internas puede ser a través de la importación a países con mayores rendimientos. Se trataría así de transferir las presiones a otros

países, sin que ello suponga superar los límites domésticos y causar escasez. Pero esta práctica tiene riesgos, por lo que sería útil poner un límite a la huella hídrica interna y externa de los biocombustibles, evitando así los incentivos perversos, como generar sobreexplotación o la ineficiencia en la gestión. Al final, disminuir la presión interna en los recursos hídricos de este modo puede suponer un incremento en la dependencia energética exterior, por lo que la producción de biocombustibles exige una evaluación de en qué medida se reduce realmente la inseguridad energética (Galán del Castillo y Velázquez, 2010).

En cuanto a las limitaciones de la metodología, o de los trabajos, se identifican algunas.

En GerbensLeenes *et al.* (2012) se recogen cuatro debilidades del indicador de la huella hídrica: primero, solo “sigue la pista” de la demanda humana sobre el agua dulce; segundo, se basa en datos locales que a menudo no se encuentran disponibles; tercero, aunque la incertidumbre de los estudios es considerable, no hay estudios sobre ello; y cuarto, la evaluación de agua gris no se basa en mediciones.

Los datos de los estudios son en muchos casos recopilaciones de muchos otros estudios, cada uno de ellos con sus propias incertidumbres, lo que hace que los resultados no deban entenderse en sentido literal sino más bien como indicativos.

En relación a la huella hídrica gris, una deficiencia es la contabilización de todos los posibles contaminantes, solo los compuestos nitrogenados. El fósforo u otros de gran importancia, quedan excluidos, resultando al final una huella hídrica conservadora, subestimada (GerbensLeenes *et al.*, 2008). Se le añade además que numerosos estudios no incluyen la huella hídrica gris, lo que supone que los resultados debieran ser alrededor de un 10% mayor, subestimando así la huella hídrica final.

En cuanto al indicador de huella hídrica no hay consenso entre distintos autores. La huella hídrica es un indicador de uso de recurso, no de impacto social, por lo que hay autores que buscan su redefinición; pasar de una medida volumétrica a un índice de impacto medioambiental local. Para reflejar impactos sociales y medioambientales necesita ser complementado con otros indicadores de impacto. Esto se realizaría multiplicando los volúmenes por factores de impacto, es decir, el componente de huella hídrica azul por un índice de estrés hídrico. Esta operación descuida la huella hídrica verde, ya que se considera que sus impactos serían despreciables. Pfister y Hallweg (2009) comparan los resultados tras la aplicación del índice de estrés hídrico y los resultados del modelo estándar, reflejándose diferencias por la distribución global de los biocombustibles de acuerdo a la escasez hídrica, siendo más pronunciada en regiones específicas de escasez. Sin embargo, tras la aplicación del índice, se considera que se perdería mucha información relevante, pues conocer el consumo de agua es importante para la discusión del reparto del recurso. Además se añade la duda de si el índice de impacto aplicado podría hacer justicia a la variedad de factores locales que pueden

determinar los impactos ambientales y sociales derivados del consumo de agua. Por tanto, hay cierto consenso en seguir con la metodología estándar, y de forma adicional puede realizarse un indicador de impacto (Pfister y Hallweg, 2009; Galán del Castillo y Velázquez, 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2012).

Por tanto, las limitaciones planteadas abren temas para posibles investigaciones futuras, así como otros temas de interés.

En primer lugar sería interesante en cuanto al futuro, ver cómo se desarrollan las tecnologías para procesos de segunda generación de los biocombustibles, así como ver de antemano los efectos en las posibles disminuciones en la huella hídrica de los biocombustibles. Así pues investigar cómo de eficientes pueden ser estas reducciones sería interesante para una mejor planificación futura de las políticas sobre biocombustibles.

Otra investigación de gran utilidad sería una acerca el comercio de la biomasa y los biocombustibles. En toda investigación se asume que los biocombustibles producidos que consumen en el mismo país, y sin embargo, existe comercio de biocombustibles y comida entre países. El comercio puede tener efectos significativos en la huella hídrica anual de un país, lo que interesaría ser fruto de investigación.

La huella hídrica podría ser un indicador útil para el asesoramiento de cuanta energía producir a partir de los biocombustibles. En el proceso de planificación, esta es una herramienta que puede evaluar si el suministro de energía se ajusta al entorno de la región. Teniendo en cuenta las características medioambientales, sociales y económicas, podrían llevarse a cabo estudios detallados de la producción, a escalas más reducidas permitiendo el correcto asesoramiento. Podría por tanto tener relevancia si los gobiernos deciden incorporar objetivos más ambiciosos para transiciones energéticas futuras.

Un tema a tener en cuenta es que la cantidad de producción de biocombustibles no lo define la demanda sino la capacidad de producción, y esta no solo depende de la naturaleza, sino también del uso de la tierra o el manejo (Stoeglehner y Norodoslawsky, 2009). Por tanto la tierra real a dedicar a los biocombustibles no puede derivarse exclusivamente del conocimiento científico, sino debe ser negociado en procesos de deliberación pública. Estudios hechos a escala en las regiones podrán facilitar la priorización en las tierras de cultivo.

Las transiciones de energía solo mejorarán el nivel de vida, así como la productividad, si se tienen en cuenta todos los impactos, y es negociada en la sociedad en deliberación pública.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DOMÍNGUEZ-FAUS, Rosa, POWERS, Susan E., BURKEN, Joel G. & ALVAREZ, Pedro J., “The water footprint of biofuels: a drink or drive issue?”, *Environmental Science & Technology*, 43(9), (2009), 3005-3010.

GALÁN DEL CASTILLO, Elena & VELÁZQUEZ, Esther, “From water to energy: The virtual water content and water footprint of biofuel consumption in Spain”, *Energy policy*, 38, (2010), 1345-1352

GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers”, *Value of water*, 29, (2008).

GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “The water footprint of bioenergy”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 106 (25), (2009a), 10219-10223.

GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply”, *Ecological Economics*, 68, (2009b), 1052-1060.

GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “Reply to Maes et al.: A global estimate of the water footprint of *Jatropha curcas* under limited data availability”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 106 (40), (2009c), 113.

GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “Reply to Jongschaap et al.: The water footprint of *Jatropha curcas* under poor growing conditions”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 106 (42), (2009d), 119.

GERBENS-LEENES, P. Winnie, VAN LIENDEN, A. R., HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “Biofuels scenarios in water perspective: The global blue and

green water footprint of road transport in 2030”, *Global Environmental Change*, 22, (2012), 764-755.

GERBENS-LEENES, P. Winnie & HOEKSTRA, Arjen, “The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize”, *Value of water*, 38, (2009).

GERBENS-LEENES, P. Winnie & HOEKSTRA, Arjen, “Burning water: The water footprint of biofuels- based transport”, *Value of water*, 44, (2010).

GERBENS-LEENES, P. Winnie & HOEKSTRA, Arjen, “The water footprint of biofuel-based transport”, *Energy & Environmental Science*, 4, (2011), 2658-2668.

GERBENS-LEENES, P. Winnie & HOEKSTRA, Arjen, “The water footprint of sweeteners and bio-ethanol”, *Environment International*, 40, (2012), 202-211.

HOEKSTRA, Arjen, CHAPAGAIN, Ashok, ALDAYA, Maite & MEKONNEN, Mesfin, “The water footprint assessment manual. Setting the global standard”, Londres, Earthscan, 2011.

MAES, Wouter H., ACHTEN, Wouter M. J. & MUYS, Bart, “Use of inadequate data and methodological errors lead to an overestimation of the water footprint of *Jatropha curcas*”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 106 (34), (2009), 91.

MEKONNEN, Mesfin & HOEKSTRA, Arjen, “The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products”, *Value of water*, 47, (2010a).

MEKONNEN, Mesfin & HOEKSTRA, Arjen, “The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, (2011), 1577-1600.

MEKONNEN, Mesfin & HOEKSTRA, Arjen, “The water footprint of sweeteners and bio-ethanol”, *Environment International*, 40, (2012), 202-211.

PFISTER, Stephan & HELLWEG, Stefanie, “The water “shoesize” vs. footprint of bioenergy”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 106 (35), (2009), 93-94.

STOEGLEHNER, Gernot & NARODOSLAWSKY, Michael, “How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising from an ecological footprint perspective”, *Bioresource Technology*, 100, (2009), 3825-3830.

VAN LIENDEN, A. R., GERBENS-LEENES, P. Winnie, HOEKSTRA, Arjen, & VAN DER MEER, Theo H., “Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030”, *Value of water*, 43, (2010).

Figuras

EIA (2013) *International Energy Outlook 2013*. U.S. Energy Information Administration, Washington DC. Disponible en: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).