

Balance energético del etanol brasilero: comparación entre métodos de medición

Energy balance of Brazilian Ethanol: comparison between measuring methods

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2011
Fecha de evaluación: 10 de mayo de 2012
Fecha de aprobación: 19 de junio de 2012

Carlos Ariel Ramírez Triana (Colombia)

carlosar@poli.edu.co
Politécnico Grancolombiano

Es economista y Magíster en Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Colombia. En la actualidad se encuentra cursando sus estudios doctorales en la Maquarie University de Australia, en el programa de Administración. Es coordinador de investigación y docente investigador de la Facultad de Ciencias Administrativas, Económicas y Contables del Politécnico Grancolombiano. Co-Director del grupo de investigación Empresa, Derechos y Globalización de la misma universidad. Este trabajo se inscribe dentro de la línea de investigación en Sostenibilidad del grupo mencionado. El autor agradece muy especialmente la valiosa colaboración académica del Profesor John Mathews, director de tesis doctoral y el apoyo de Maquarie Graduate School of Management (MGSM).

Resumen

Así como cualquier otro producto bio-energético, la producción de etanol requiere insumos fósiles; en consecuencia los supuestos beneficios de seguridad energética y mitigación de carbono dependen de en qué medida estos insumos son capaces de generar un importante rendimiento bio-energético. El etanol brasilero, hecho de caña azucarera, ha sido reportado como el sustituto más eficiente de la gasolina dentro de las tecnologías que están comercialmente disponibles. Es por esto que ha sido objeto de varios análisis de *energética*, es decir, balances energéticos. Resulta curioso que dichos estudios varían ampliamente dependiendo de la aproximación usada por los estudiosos del tema y adicionalmente no son comparables entre sí, debido a divergencias en el método de medición. El objetivo de este artículo es la estandarización de los resultados obtenidos por cuatro de los más prominentes autores en este campo, generan-

Abstract

Like any other bioenergetic product, ethanol production requires fossil inputs; therefore, the alleged energetic safety and carbon mitigation benefits depend on the ability these inputs have to generate an important bioenergetic performance. Brazilian ethanol, made of sugar cane, has been reported as the most efficient substitute of gasoline within the technologies that are commercially available. Because of this, it has been subject to various energy analyses, meaning energy balances. It is curious that these studies greatly differ depending on the approach used by the experts; likewise, they are not comparable between themselves due to divergences in the measuring method. The objective of this paper is to standardize the results obtained by four of the most reknown authors in this field, generating the possibility to contrast their studies and give some light on the energy studies applied to bioenergy.

do de esta manera la posibilidad de contrastar sus estudios y dar algunas luces sobre los estudios de energética aplicados a la bioenergía.

Palabras clave

Etanol brasileiro, biocombustibles de primera generación, energética, Balance energético, Tasa energética O/I, EROI.

Keywords

Brazilian Ethanol, first generation biofuels, Energetics, Energy balance, Energy tax O/I, EROI.

Introducción

La producción de biocombustibles líquidos ha surgido como alternativa frente al uso de combustibles de origen fósil para propósitos de transporte. La mitigación de las emisiones de carbono, la seguridad energética y el desarrollo del sector agrícola son los principales objetivos que se persiguen con la implementación de proyecto bioenergéticos. Por otro lado, en contraste con las ventajas anteriormente mencionadas, algunos inconvenientes también salen a la luz ya que bajo una mala implementación los biocombustibles pueden amenazar la seguridad alimentaria, generar impactos negativos sobre el medio ambiente y en últimas el balance energético es mirado con escepticismo por los actores involucrados.

El etanol, hecho de material biológico, o también llamado bioetanol, en un sustituto versátil para la gasolina ya que puede ser usado directamente en su forma hidratada en motores modificados especialmente; y puede ser mezclado con gasolina, en su forma anhídrica, en motores convencionales sin ninguna modificación, para niveles inferiores al 25% de etanol. Recientemente bajo motores flexibles (Flex-fuel) este límite deja de ser un problema y cualquier mezcla de alcohol gasolina se puede ser usada (Coelho, S., 2005).

Una vez entendido el uso y alcance del etanol, el verdadero problema que queda es mirar la fuente del mismo. La materia prima para elaborarlo tiene un gran espectro. Por ejemplo, actualmente se usan aquellos cultivos ricos en azúcares o almidones y que son fuente de alimento como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, maíz, yuca entre otros. Cuando el etanol se elabora siguiendo esta ruta se

consideran como Biocombustibles de primera generación y son llamados en ocasiones agrocombustibles.

No obstante, la producción de etanol puede hacer uso de una fuente de materiales mucho más amplia y que cuentan con un alto contenido de lignina y celulosa, tal como gramíneas o pastos perennes y desperdicios agrícolas como aserrín, astillas, cortezas y ramas o subproductos como el bagazo. Estas fuente son la base de los biocombustibles de segunda generación y posteriores¹.

A primera vista los combustibles biológicos de segunda generación generan una gran expectativa; no obstante la ruta tecnológica que debe ser recorrida para alcanzar los azúcares incrustados en la celulosa es de alta complejidad y el costo asociado es aún prohibitivo para hacer una implementación a escala tecnológica. Dado que una solución para el mercado de la gasolina es apremiante, la necesidad de respuestas temporales descansa sobre la producción responsable de etanol de primera generación.

Bajo las tecnologías actuales, el etanol de caña ha sido reportado como el más eficiente dentro de las diferentes materias primas y ha sido objeto de varios estudios creando un rango de resultados bastante amplio. Brasil es, de lejos, el país con más experiencia en el mundo en cuanto a la elaboración de etanol de caña, siendo el principal exportador y el segundo productor más grande después de Estados Unidos; y adicionalmente, su posición geográfica y condiciones naturales

1 En la literatura se han identificado hasta cuatro generaciones de biocombustibles. Ver explicación en la referencia 2. Ramírez Triana, C.A., *Biocombustibles: seguridad energética y sostenibilidad. Conceptualización académica e implementación en Colombia*. Punto de Vista, 2010. 2: p. 43-79.

son comparativamente similares a las de países que han tratado de seguir el camino de la experiencia brasilera y que pueden eventualmente convertirse en exportadores de alcohol en el futuro cercano.

Varias herramientas han tratado de capturar el impacto energético neto del etanol basado en diferentes fuentes y algunos académicos han hecho uso del Análisis del Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) y diferentes clases de balances para establecer la tasa O/I (output/input) con el fin de justificar la implementación de esta clase de proyectos bioenergéticos.

La comparación del resultado de esta tasa entre diferentes autores no representa ningún inconveniente, porque sin importar las unidades usadas en el estudio, siempre se responde la misma pregunta: cuantas unidades de bioenergía pueden ser obtenidas de una unidad de energía fósil. Lo que causa curiosidad es la diferencia que hay entre los autores y a través de la lectura puede notarse las variaciones que existen en sus aproximaciones al cálculo de la tasa, específicamente en cuanto al monto de energía fósil utilizada, es decir, el insumo energético. Para este fin, cada uno de ellos descompone el análisis en diferentes etapas en distintos niveles. Al final se encontró que las etapas comunes fueron el componente agrícola, el proceso industrial y en algunos casos la etapa de distribución. El problema surge porque la medición en cada caso fue tomada con base en unidades heterogéneas, lo cual representa un impedimento para contrastar resultados. Así pues, el objetivo final de este documento es cubrir las divergencias en estudios de energética aplicados al caso del etanol brasilero, unificando las unidades de medida presentadas por los académicos.

Este artículo está estructurado como sigue: Inicia con una primera sección en donde se hace un barrido de la estructura e historia de la industria brasilera de la caña de azúcar en general y de la generación de etanol en particular. En seguida, en una segunda sección se da una introducción al concepto de tasa energética en el contexto de análisis tipo LCA, mostrando la importancia del estudio de la energética del etanol. La tercera sección para finalizar antes de las conclusiones, unifica cuatro visiones distintas de mediciones del balance energético neto del etanol brasilero haciendo comparable el impacto de combustible fósil que fue usado en su elaboración.

Caminos hacia el etanol brasilero: historia y proceso técnico

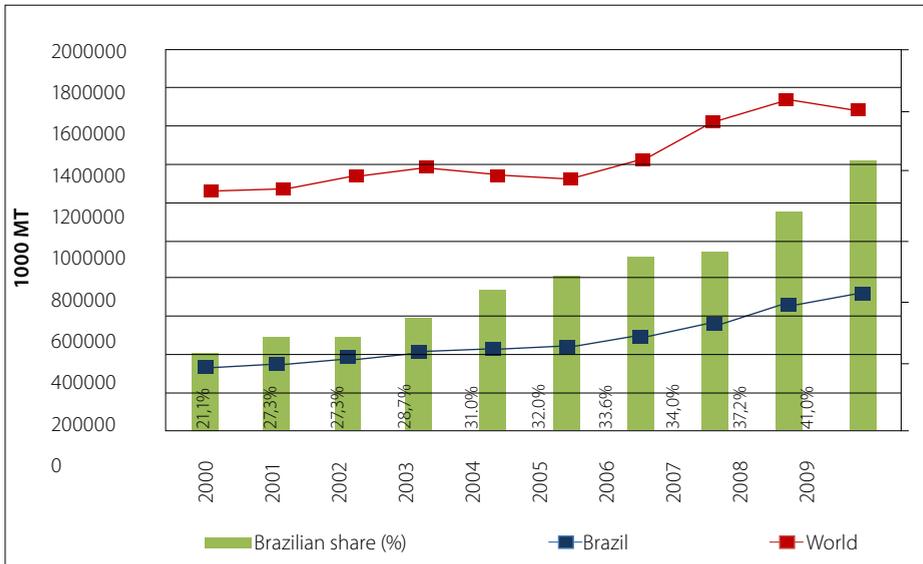
Como el propósito de este artículo es entender la *energética* de la producción de etanol es importante seguir el camino trazado por la industria procesadora de caña de azúcar desde sus orígenes, pasando por las motivaciones que justifican el establecimiento de la industria de bioalcohol. Del mismo modo, más allá del proceso histórico es igualmente importante dividir el proceso de elaboración de etanol en diferentes etapas y tratar de reconocer su contribución en los diferentes balances energéticos presentados en la segunda sección.

Establecimiento de las industrias del azúcar y el alcohol en Brasil: perspectiva general

De acuerdo con las estadísticas de la FAO, en el año 2008, la caña azucarera fue, en términos de ponderación, el principal rubro en la producción agrícola brasileña, con más de 645 millones MT y el segundo más importante en cuanto ingreso (tuvo un valor superior a los 13 mil

millones de dólares americanos a precios internacionales) siguiendo de cerca a la carne vacuna. En ese momento Brasil fue el mayor productor de caña de azúcar del mundo, seguido de lejos por India y China con producciones de 348 y 124 MT respectivamente.

Figura 1. Sugarcane Production



Elaborado por el autor. Fuente de información FAOSTAT 2010

En la última década Brasil ha incrementado su producción de caña, alcanzando para el año 2009 más de 40% de la oferta mundial y triplicando el nivel exhibido en el año 2000 (Ver figura 1). Sin embargo, estos resultados no son nuevos

en lo absoluto y tienen una extensa historia detrás de su éxito como se presenta a continuación.

El célebre modelo del caso brasileiro para la elaboración de azúcar y posteriormente etanol es el resultado combinado de la

incorporación inicial del azúcar por los colonizadores, una gran necesidad de combustible durante la crisis del petróleo y una perspectiva sorprendente por parte del Gobierno.

La caña azucarera rápidamente pasó a ser el primer cultivo a gran escala a principios del siglo XVI, poco después de haber sido traída desde la isla de Madeira por la expedición portuguesa. Este producto fue tan importante como otros cultivos coloniales como el caucho y el café. Fueron los esclavos, justo después del período colonial quienes proveyeron la mano de obra que dicha industria solicitaba (Schwartz, 2005). Más adelante, hacia 1883 un gran grupo de inmigrantes de Europa se encargaron de garantizar la oferta de fuerza laboral de bajo precio, consolidando al sector azucarero como una de las industrias más prominentes hoy en día (Boddey, et al., 2008).

En el año 1933 se funda el Instituto del azúcar y el alcohol y se llevan a cabo las primeras pruebas de mezclas con etanol en motores convencionales para gasolina. La investigación continuó con algunos esfuerzos exitosos que se realizaron para ampliar el alcance del proyecto; pero no fue sino hasta 1973, durante la crisis petrolera donde el gobierno militar del Brasil toma la decisión de apoyar plenamente un desarrollo exclusivo de la producción de etanol, lanzando dos años más tarde el Programa Nacional de Alcohol, PROÁLCOOL (Xavier, 2007).

Bajo dicho programa se desarrollaron motores especiales capaces de funcionar con etanol hidratado y se propusieron algunas mezclas voluntarias con etanol anhidro para motores convencionales. No solamente se impulsó el lado de la demanda, sino que la oferta fue ampliamente beneficiada por un paquete económico que incluyó impuestos e inversiones

para favorecer la industria; permitiendo el establecimiento de nuevas plantas y la ampliación de destilerías, simultáneamente con la expansión de los proyectos agrícolas azucareros.

A principios de los años 90 los subsidios para el bioetanol fueron eliminados, pero los grandes impuestos a la gasolina combinados con generosos subsidios a los carros que funcionan con etanol, crearon un fuerte incentivo para consolidar el mercado. Sin embargo al final de la década dos hechos simultáneos representaron un traspie significativo en la confianza del consumidor: los proveedores de etanol, debido a una sequía estuvieron presionados para suplir adecuadamente el mercado; y los bajos precios del petróleo generaron estrés sobre el desempeño y logros del programa (Martines-Filho, J., et al., 2006).

Dadas las anteriores circunstancias el Gobierno decidió, desde el año 2001 implementar la oxigenación obligatoria del combustible, por el orden de entre un 20% y 24% de etanol anhidro y el resto gasolina (Martines-Filho, J., et al., 2006). Más recientemente, en el año 2003 se desarrolló la tecnología de motores flexibles (Flex-fuel) que ha permitido cualquier combinación de etanol hidratado con la mezcla de gasolina oxigenada por ley. Esto ha venido ganando popularidad entre la población y sólo se han reportado problemas menores cuando se hace uso de gasolina pura, pero esta situación solo ocurre cuando se viaja otros países del cono sur.

La información anterior le permite al lector visualizar una industria agrícola fuerte desde afuera, donde las condiciones históricas, en conjunto con las iniciativas gubernamentales y del sector privado hacen funcionar a un sector con al menos dos productos emblemáticos que contribuyen a

la creación de empleo nacional y al potencial del ingreso exportador: alcohol y azúcar. Sin embargo, aún es fundamental una explicación interna de cómo el etanol es elaborado con el fin de entender el balance energético de este producto. Este análisis se presenta a continuación.

Proceso de producción de etanol en Brasil

En el caso de Brasil, el ciclo del cultivo está bastante estandarizado y es el motor de las operaciones agrícolas. La semilla es sembrada cada seis años y, al cabo de año y medio, se obtiene la primera cosecha de la plantación inicial, para posteriormente obtener cuatro cosechas, con un intervalo de doce meses entre ellas, que provienen de retoños y no de semillas adicionales. La tierra se deja descansar por seis meses antes de iniciar nuevamente todo el proceso (Macedo, 1996). Esta clase de información resulta trascendental para realizar el cálculo del promedio de rendimiento anual de etanol, debido a la reducción de la cantidad de azúcar contenido de acuerdo a la cosecha correspondiente.

En Boddey et. al. (2008), se encuentra una explicación detallada del resto del proceso y se resume a continuación. En la etapa inicial, antes de iniciar con la siembra, se lleva a cabo una labor de arado intensivo. Esto por supuesto acarrea un gran consumo de diesel pero también deteriora la acumulación de materia orgánica en el suelo y libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, GEI, a la atmósfera. Recientemente se viene explorando con una técnica de “arado cero” (*Zero tillage*) para cultivos de caña de azúcar en pequeñas porciones de tierra, pero a pesar de las posibles ventajas ambientales obtenidas, el consumo de combustible es similar al del

método tradicional, ya que se vierten herbicidas en lugar del proceso mecánico de desyerbe y limpieza de malezas. En cualquiera de los dos casos la formación de surcos se hace con maquinaria.

Después de la preparación de la tierra, inicia la etapa de fertilización y abono. Los pedúnculos de caña, una vez plantados, se cubren con cachaza. Como la cachaza se usa para la separación de materiales suspendidos del jugo de la caña, cuenta con una gran cantidad de nutrientes acumulados que son absorbidos por el suelo. Adicionalmente, con el objetivo de mejorar los resultados, se aplica a los retoños en etapas posteriores un fertilizante conocido como 4-24-24 (que es una combinación de 20kg de nitrógeno, 120kg de pentóxido de fósforo y 120kg de óxido de potasio).

Así como sucede en otras prácticas agrícolas el nitrógeno (N) es ampliamente usado en la elaboración de fertilizantes; sin embargo, parece que algunas variedades de caña en Brasil fueron introducidas en suelos bajos en N, disminuyendo la necesidad de este elemento y en consecuencia el consumo de combustible y el impacto de N sobre la atmósfera como GEI.

La cosecha finaliza la así llamada etapa agrícola. Resulta común, sobretodo en cultivos de caña, realizar la quema del terreno antes del corte y recolección. Al hacer esto, se disminuye la exposición de los trabajadores a animales venenosos y a los cortes ocasionados por las afiladas hojas de la caña. Esta práctica ha triplicado la productividad de los trabajadores. No obstante, existe evidencia de que la quema pre-cosecha amenaza la salud humana por la generación de pavesas y humo. Como consecuencia de lo anterior, el gobierno brasileiro ha creado una ley para el gobierno de Sao Paulo con el fin de

eliminar esta práctica para el año 2022 en aquellas tierras que cuenten con una pendiente menor a 12° de pendiente (es decir que son fácilmente mecanizables). Este principio se aplicaría a un 20% de los cultivos paulistas.

El uso de regulaciones de esta naturaleza podría generar cambios drásticos en los balances energéticos o en últimas en términos de estudios LCA, ya que los costos incentivarían la cosecha mecanizada; aminorando los riesgos respiratorios y las emisiones de carbono generadas en la quema. El efecto negativo de lo anterior es la disminución de la participación de la mano de obra, porque las tecnologías de cosecha están en capacidad de sustituir entre 80 y 100 hombres. Por consiguiente serían adquiridos simultáneamente más maquinaria y combustible fósil generando presión en cuanto a emisiones de carbono se refiere; pero también implica el incremento de biomasa disponible (hojas) para los sistemas de cogeneración de electricidad, o inclusive como materia prima para la producción de etanol de segunda generación, elevando la tasa energética.

La segunda etapa es el transporte que debe incluir el movimiento de distintos elementos, como maquinaria, combustible, diversos insumos requeridos en los campos de cultivo y los ingenios y también el transporte de la caña una vez es cosechada hacia la planta de procesamiento.

La tercera etapa (industrial) es el resumen de todos los procesos necesarios para convertir la caña en alcohol (molienda, bombeo de agua, clarificación de jugo entre otros). Los requerimientos **internos** energéticos de esta etapa son altos, sin embargo estos son suplidos a través de la quema del bagazo creando potencia y electricidad a través de vapor, indicando que esta

industria es autosuficiente en energía. De hecho, existe un remanente eléctrico que se exporta a la malla local. A pesar de la práctica común de construir la destilería junto a las refinerías de azúcar, en el 2008 un tercio de las destilerías se instalaron aparte de los ingenios y se han dedicado exclusivamente a la producción de alcohol (Empresa de pesquisa energética, 2008).

Hay también insumos **externos** (químicos, levaduras, enzimas, etc.) para la fermentación y destilación, de la misma forma que se requieren todos los materiales para la construcción de la planta tal como cemento y acero que son además de indispensables altamente consumidores de energía en su elaboración.

Los pasos siguientes son descritos por la Cooperativa de productores de azúcar y alcohol de Brasil, Copesucar (Copesucar, 2010). Después que la levadura es aplicada en el proceso de fermentación, es recuperada usando un equipo centrífugo que separa el jugo fermentado que es enviado a la etapa de destilación que se lleva a cabo en tres columnas diferentes, finalizando con la obtención de etanol hidratado (biocombustible en forma de alcohol con un contenido de 5% de agua).

Parte del etanol se comercializa en esta forma en Brasil, que cuenta con una flota de vehículos capaces de funcionar con 100% etanol hidratado. Sin embargo para las mezclas obligatorias que se aplica a los autos convencionales el exceso de agua debe ser eliminado. Esto implica que el etanol en su versión hidratada debe someterse a un proceso de deshidratación, en donde se aplica benceno para densificar la concentración de alcohol, que pasa por una última destilación. El benceno aplicado es recuperado de la mezcla casi en su totalidad usando una columna especial para este propósito.

Después de la separación, el etanol anhidro (99.95% etanol) está listo para ser almacenado.

El problema de la energética

Los biocombustibles han surgido como una alternativa que, de acuerdo con sus promotores, no sólo ayuda a abordar el problema de la seguridad energética, en el sector del transporte, pero tiene el potencial de mitigar el cambio climático y puede tener efectos positivos en cuanto al desarrollo rural Dale, B.E. (2007), Mathews, J.A. (2007) Goldemberg, J. (2007). Con base en esos supuestos, varias políticas se han lanzado alrededor del mundo. Los biocombustibles líquidos, en particular el etanol y el biodiesel, han recibido mucha atención por parte de investigadores, políticos, agricultores, empresarios y ONGs y están ocupando lugares prioritarios en las agendas internacionales y locales, así como en discusiones académicas.

Ahora bien, el camino recorrido por el “petróleo verde” no ha sido para nada cómodo. Algunos críticos de la bioenergía Pimentel, D. (2003). Searchinger, T., et al. Brown, L. (2008) han documentado que la implementación de programas de producción agresiva de esta clase de combustibles, como resultado de políticas ambiciosas, revela fallas ambientales que incluyen la pérdida de la biodiversidad, la degradación de la calidad del aire, agotamiento del recurso hídrico, contaminación y cambios de uso del suelo.

Adicional a lo anterior, se necesita terreno y biomasa para la producción de biocombustibles, lo cual desencadena

otro problema. La competencia que emerge por fuentes de alimento, y su consecuente impacto en precios, es probablemente el mayor obstáculo que los combustibles de primera generación deben superar; y es precisamente ésta la categoría en donde se encuentra el etanol de caña de azúcar. Por otro lado, existe una segunda generación de biocombustibles que está siendo desarrollada, pero a pesar del futuro prominente con que cuenta, dado por altos rendimientos por hectárea y una alta diversidad de materias primas, su implementación hoy en día es económicamente costosa y tecnológicamente compleja.

Dada la dualidad y controversia planteada arriba se necesita un balance ecológico con todo el rigor científico. Apuntando en esa dirección, diversos análisis de ciclo de vida (LCAs) han sido efectuados por académicos con el propósito de evaluar los posibles beneficios o efectos colaterales negativos de los biocombustibles. La metodología LCA es un análisis muy completo de las etapas de un producto desde su nacimiento hasta su muerte, en términos de los requerimientos de insumos y resultados obtenidos. La evaluación comienza con la extracción de las materias primas, seguido por una fase de procesamiento y posteriormente por distribución y comercialización. Un LCA completo termina cuando el producto en cuestión alcanza la etapa de disposición (o no uso), pero en ocasiones termina con su uso final.

Los LCAs no han sido diseñados exclusivamente para el estudio de bioenergía, pero en este caso en particular se estructuran en tres grandes áreas de análisis: Medición de GEI, impacto sobre el ambiente y la salud humana; y finalmente el balance energético.

En el primer componente el objetivo es tratar de establecer la neutralidad de la producción bionenergética, en términos del cambio climático. Esto se hace basado en el rastreo de flujos de CO₂, es decir, el carbón emitido a través de la combustión de combustibles fósiles durante la producción de bioenergía (biocombustible+bioelectricidad) menos el carbono que se captura durante el crecimiento de los cultivos. En estudios posteriores la inclusión del efecto de otros GEI que surgen de uso de fertilizantes y actividades agrícolas, como el metano y dióxido nitroso, han enriquecido el análisis. Estas adiciones resultan no solo importantes sino también necesarias dado que el potencial de calentamiento de estas sustancias en términos de CO₂ es 21 y 310 veces mayor para CH₄ y N₂O respectivamente (Von Blottnitz and Curran, 2007).

Un LCA ideal sobre bioenergía debería incluir un amplio rango de variables como el potencial de toxicidad (sea esta toxicidad para la salud humana o el ecosistema o ambos), desgaste de los recursos abióticos, impacto sobre la creación de smog fotoquímico, eutroficación y potencial de acidificación. Todos estos elementos hacen parte de la evaluación de impacto sobre el ambiente y la salud humana. Es recurrente que los LCAs obvien de manera parcial o completa este componente. Esto se debe principalmente a que la información requerida no es lo suficientemente amplia (no hay medición completa de todas las variables clave) o los datos son de difícil consecución o no están disponibles. Resulta bastante improbable la obtención de conclusiones válidas a partir de un contraste de este tipo de análisis, porque los investigadores están restringidos a la libertad que les da los datos y de acuerdo a ésta fijan objetivos y

alcances de sus informes. Adicional a esto no hay claridad en los supuestos en muchos de los documentos. A partir de estudios de esta naturaleza no hay evidencia, en términos de bioenergía, que el etanol posea beneficios en este aspecto más allá de la reducción de las emisiones de GEI en contraste con la alternativa fósil (Von Blottnitz and Curran, 2007).

Finalmente, un LCA para bioenergía debe efectuar un balance energético o un análisis de la **energética**. Este concepto es entendido como el flujo y transformación de energía dentro de un sistema particular, que en este caso implica la transformación de una combinación de energía solar capturada a través de un proceso fotosintético e hidrocarburos convencionales usados como insumos agrícolas e industriales; dando como resultado el etanol de biomasa (después de la conversión bioquímica) y electricidad o potencia que surgiría como co-producto.

La conversión de la biomasa en etanol, o cualquier otro bioenergético, requiere insumos energéticos adicionales, que usualmente están presentes en forma fósil. No obstante, no hay razón para llevar a cabo una activa defensa de una industria bionenergética si ésta no es capaz de bajar el monto de combustible que se requiere para impulsar un vehículo sin la necesidad de hacer mayores cambios en el motor ni incurrir en un gran uso de hidrocarburos tradicionales para producir biocombustibles.

Como se mencionó antes los LCAs rara vez son culminados en toda su extensión, pero por el contrario sí es frecuente ver en la literatura estudio parciales que hacen la aproximación a al menos el componente de balance energético, y esos son precisamente el objetivo de este análisis. Hay dos indicadores que suelen

tenerse en cuenta en esta clase de estudios y se presentan a continuación.

El primero es la tasa de rendimiento energético, que también se encuentra en la literatura como EROI (por sus siglas en inglés *Energy return over investment* [Rendimiento energético sobre inversión energética]) y se expresa como el cociente entre la cantidad de energía obtenida y la energía usada en su elaboración (Cleveland & Costanza, 2008). Tanto el numerador como el denominador están expresados en la misma unidad energética, que se mide en Btus, julios, calorías, etc. El EROI puede ser leído como el monto de bioenergía que se obtiene a partir de una unidad de energía fósil. Es importante aclarar que en ningún caso el EROI permite comparaciones de unidades volumétricas porque el contenido energético por unidad de volumen no es el mismo (un litro de etanol contiene menos energía de un litro de gasolina).

El segundo es el reemplazamiento neto de energía fósil y se mide, ya sea como el efecto que determinado biocombustible tiene sobre eficiencia de locomoción (ej.: kilómetros recorridos) o relativo a la cantidad de área agrícola utilizada por unidad de volumen o de energía. Este indicador casi nunca es reportado. Por esta razón este estudio se centra en el EROI.

Para hacer la medición los insumos para el balance energético se requiere la categorización de los mismos como se indica en se indica en (Smeets, et al. 2006) y (Boddey, et al., 2008): Se necesitan hidrocarburos tradicionales (principalmente el diesel), tal como se describió en la sección 1.2, para la etapa agrícola, dividida en pequeñas tareas: arado, fertilizado, cosecha entre otros. Posteriormente, en la segunda etapa, se debe transportar la caña con camiones de diferentes capacidades para ser procesada posteriormente en el ingenio o

destilería. La etapa final se efectúa en la fábrica, previa a la llegada del etanol al mercado. Distintos insumos dentro de la cadena productiva, tal como los fertilizantes y el material de construcción de la planta demandan un gran contenido de energía; de tal suerte que deben ser incluidos dentro de un balance energético neto.

Algunos autores han estudiado el caso del etanol de caña de Brasil. En la siguiente sección se procede a comparar detalladamente los resultados de los cuatro autores más destacados y citados, y al final se nombrarán algunos otros reportes para efectos de referencia y comparación.

Balance energético del etanol brasileiro: revisión y comparación de estudios previos

Brasil se ha convertido en el referente académico por defecto, cuando se habla de bioenergía. De hecho, Brasil permaneció durante mucho tiempo como el mayor productor de bio-alcohol en el mundo, siendo sobrepasado recientemente por Estados Unidos. No obstante, este duradero y desatado desempeño brasileiro ha llamado la atención de diferentes investigadores, quienes han llevado a cabo revisiones tipo LCA, entre otra clase de estudios. La muestra que estos reportes que se usará esta sección está conformada por los trabajos más recientes, destacados y citados referentes al etanol de caña de Brasil, y los autores son los siguientes:

- a. Pimentel & Patzek 2008
- b. Macedo et al. 2008
- c. Boddey et al. 2008

d. Dias de Oliveira et.al. 2005

Pimentel y su compañero presentan un análisis de la energética basado en la conversión de caña de azúcar en etanol, comparando las prácticas brasilera y estadounidense. En este estudio se asume hipotéticamente que las instalaciones de procesamiento son las mismas (ver insumos industriales de la tabla 1). En ambos casos la tasa energética es positiva y mayor que 1, lo que implica que por cada Kcal de energía fósil se logró obtener 1.48 y 2.29 kcal de bioenergía en los casos

americano y brasilero respectivamente. A pesar de que la productividad (toneladas por hectárea) fue más alta en Luisiana, también lo fueron sus requerimientos energéticos, dando como resultado una tasa energética menor. En este trabajo se reconoce el uso de bagazo como fuente energética para la electricidad, pero el exceso que se transfiere a la malla de distribución es ignorado, bajando el potencial de la tasa.

Tabla 1.

Inputs per 1000 L of 99.5% ethanol produced from U.S. and Brazilian sugarcane						
Inputs	USA			Brazil		
	Quantity		kcal x 1000	Quantity		kcal x 1000
Agricultural inputs						
Sugarcane	12,000	kg	1,828	12000	kg	612
Sugarcane transport	12,000	kg	490	12000	kg	490
Agricultural inputs			2,318			1,102
Industrial inputs						
Water	21,000	L	90	21000	L	90
Stainless steel	3	kg	165	3	kg	165
Steel	4	kg	92	4	kg	92
Cement	8	kg	384	8	kg	384
Steam	2,546,000	Kcal	0	2546000	kcal	0
Electricity	392	kWh	0	392	kWh	0
95% ethanol to 99.5%	9	kcal/L	9	9	kcal/L	9
Sewage effluent	20	kg BOD	69	20	kg BOD	69
Distribution	331	kcal/L	331	331	kcal/L	331
Sub-total Industrial inputs			1140			1140
TOTAL INPUTS			3,458			2,242
Outputs	Quantity		kcal x 1000	Quantity		Kcal x 1000
Ethanol Fuel	1		5130	1	L	5130
TOTAL OUTPUTS						5130
Energy ratio						
Output/Input			1.48			2.292.29

Fuente: Pimentel & Patzek. 2008. Energy ratio analysis.

Macedo y su equipo han trabajado el caso brasileiro desde hace ya varios años. En su trabajo más reciente calcularon las tasas energéticas sobre métodos que actualmente se encuentran en funcionamiento en Brasil (2005/2006) y también se incluyó un pronóstico de un escenario para el año 2020 donde se asume que la mecanización para todas las actividades

agrícolas aumenta y se elimina la quema pre-cosecha dando la oportunidad de aprovechar de usar los desechos como combustible para la producción de electricidad y optimizar el uso del bagazo también. También se muestra con propósitos de contraste. Los resultados energéticos son resumidos en la tabla 2.

Tabla 2.

Fossil energy consumption in the production of ethanol including agricultural and industrial stages			
Item	2002	2005/	2020
Agricultural inputs			
Agricultural operations	16.4	13.3	14.8
Harvesting	21.7	33.3	46.9
Cane transportation	39	36.8	44.8
Inputs transportation	4	10.9	13.5
Other activities		38.5	44.8
Fertilizer	66.5	52.7	40
Lime, herb, insect	19.2	12.7	11.1
Seed	5.9	5.9	6.6
Machinery	29.2	6.8	15.5
Sus Total	201.9	210.3	238
Industrial inputs			
Chemical and lubricants	6.4	19.2	19.7
Buildings	12	0.5	0.5
Equipament	31.1	3.9	3.9
Sub total	49.5	23.6	24.1
TOTAL INPUTS	251.4	233.9	262.1
Output			
Ethanol	1921.3	1926.4	2060.3
Bagasse surplus	168.7	176	0
Electricity susplus	0	82.8	972
TOTAL OUTPUTS	2090	2185.2	3032.3
Ethanol Only			
Ethanol Only	7.64	8.24	7.86
Ethanol + Bagasse	8.31	8.99	7.86
Ethanol + Bagassel + Electricity	8.31	9.34	11.57

Fuente: Macedo et al 2008. Energy ratio analysis

Resulta interesante la reducción de la tasa energética, dentro del pronóstico de Macedo para el año 2020, para el caso de solo alcohol. Hay una explicación plausible al respecto dado que se necesita más diesel para poner en funcionamiento la

nueva maquinaria agrícola. Ahora bien, si son tenidos en cuenta los sistemas de co-producción, el uso del bagazo y otros residuos, la tasa energética incrementa considerablemente para el mismo período.

Tabla 3.

Fossil energy input, total energy yield and energy balance of bioethanol produced from sugarcane under present day Brazilian conditions				
Input	Quantity	Unit	MJ/unit	MJ/ha/yr
Field operations				
Labour	128.0	h	7.84	1003.5
Machinery	155.4	kg	8.52	1785.6
Diesel	22.3	L	47.73	1064.4
Nitrogen	56.7	kg	54.00	3061.8
Phosphorus	16.0	kg	3.19	51.0
Potassium	83.0	kg	5.89	488.9
Lime	367.0	kg	1.31	478.9
Seeds	2000.0	kg		252.2
Herbicides	3.2	kg	451.66	1445.3
Insecticides	0.2	kg	363.83	87.3
Vinasse disposal	180.0	m3	3.64	656.0
Transport of consumables	820.0	kg		276.8
Cane transport	24.7	L	47.73	2334.8
Total transport				12709.7
Total field operations				
Factory inputs				
Chemicals used in factory				487.6
Water				0.0
Cement	11.5	L		750.9
Structural mild steel	28.1	kg		841.8
Mild steel in light equipment	23.1			693.5
Stainless steel	4.0	kg		287.1
95% ethanol to 99.5%				225.3
Sewage effluent	0.0			0.0
Total Factory inputs				2611.2
Total all fossil energy inputs				15320.9
Output				
Sugarcane yield	76.7	Mg/ha		
Total ethanol yield	6281.0	L/ha	21.45	134750.4
Final Energy Balance				

Energy values expressed a perha paryear basis

Fuente: Bodder et al 2008. Energy ratio analysis

Por su parte, el estudio de Boddey hace un acercamiento distinto: acá los cálculos se hicieron mediante la revisión de todo el proceso y lo que se requiere para convertir 1 ha de caña de azúcar en etanol. Quizás este trabajo no es el reflejo de una planta representativa, ya que todos los datos se tomaron de una planta moderna recién construida; pero es un ejercicio muy importante debido a que establece el potencial de producción para Brasil. En la tabla 3 se puede ver que el EROI obtenido es similar al equipo de Macedo, indicando que se requiere 15.3 GJ de energía fósil para obtener etanol de una hectárea de caña; obteniendo en este producto 8.8 veces ese contenido de energía. Al igual que en Pimentel y Paztek en este estudio el excedente energético transferido al sistema no es incluido dentro del cálculo.

Por último, Dias de Oliveira y su equipo realizaron una comparación entre el etanol de maíz de Estados Unidos y la experiencia con caña del Brasil. En este artículo sólo se analiza el caso brasilero por la naturaleza de la materia prima objeto de este estudio. Una vez más se reconoce la autosuficiencia de las plantas pero no hay una separación meticulosa de las diferentes tareas de cosecha y procesamiento, evitando la identificación y separación clara de los usos energéticos. Por el contrario, la contabilidad energética da cuenta de un grueso monto de diesel que se presenta en la fase agrícola. Estudios posteriores critican el resultado presentado por este autor, toda vez que el cálculo de los insumos de diesel se dieron mediante energía y no energía [18]. Estos dos conceptos son distintos, puesto que la energía es un subconjunto de la energía² y de hecho tienen di-

ferenciación en sus unidades de medida. El mezclar estos conceptos conlleva fácilmente una sobrestimación energética. Un resumen de los resultados es presentado en la tabla 4.

Tabla 4.

Energy balance of ethanol production from sugarcane in Brazil	
Input	GJ/ha
Agricultural sector	35.98
Industrial sector	3.63
Distribution	2.82
Total	42.43
Output*	154.4
Energy ratio	3.64

*Assumption: 1 ha sugarcane = 6.4

m³ of ethanol = 5.17GL

Fuente: Olivera et. al. 2005. Energy ratio analysis

No existe inconveniente cuando se comparan entre sí los estudios a través de las tasas energéticas, porque a pesar de que usen unidades distintas al final están expresando exactamente lo mismo. El problema surge cuando se intenta hacer un análisis transversal dentro de sus elementos comunes. Como el reporte más breve fue el presentado por Dias de Oliveira, las unidades de medida (GJ/ha) serán tomadas como la base del análisis así como los componentes del estudio. Esto significa el análisis de 3 etapas: agrícola (incluye actividades desde la totalidad de actividades del campo hasta el transporte del a caña a la planta), Industrial (desde la molienda hasta le almacenamiento de etanol) y distribución (transporte

vicio en unidades de un tipo particular de energía. Para profundizar en este concepto consultar referencia 21. Odum, H., M. Brown, and S. Brant-Williams, *Handbook of Energy Evaluation. A Compendium of Data for Energy Computation*. Draft ed. Vol. 1. 2000, Miami, FL: Center for Environmental Policy.

2 La Energía es una expresión de toda la energía usada en los procesos que generan un producto o ser-

desde la destilería hasta el distribuidor minorista).

En la tabla 5 se organizan y resumen los datos de las cuatro tablas anteriores en el panel A. Como se indicó anteriormente por efectos de comparación se

presentan todos los datos en el panel B en GJ/ha. En cada caso todas las etapas son calculadas por la ponderación de su participación en la totalidad del insumo de energía (total energy input) del panel A.

Tabla 5. Comparación de estudios de tasas energéticas para el Etanol de Caña de Brasil

Study	Pimental & Patzek2 2008	Macedo et al 2008. Energy ratio analysis (case 2005/2006)	Boddey et al 2008. Energy ratio analysis	Olivera et. al . 2005. Energy ratio analysis
A.				
Original Unit	kcalx1000/m ³ ethanol	MJ/ton	MJ/ha	GJ/ha
Input according to stage				
Agricultural	1,102	210.	12709.7402	35.98
Industrial (without distribution)	809	23.6	2611.2	3.63
Distribution	331			2.82
Total	2,242	233.9	15,320.2	42.43
Original energy ratio	2.29	8.24	8.80	3.64
B.				
Standardized units	GJ/ha			
Input according to stage				
Agricultural	25.36	16.19	12.71	35.98
Industrial (without distribution)	18.62	1.82	2.61	3.63
Distribution	7.62	0.00	0.00	2.82
Total input	51.59	18.01	15.32	42.43
C				
Assumed output	135.44	135.44	135.44	135.44
Recalculated energy ratio	2.63	7.52	8.84	3.19

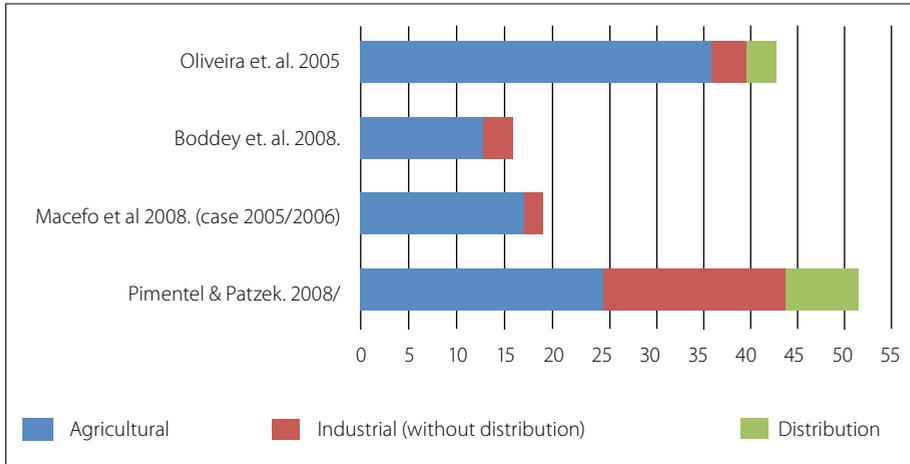
Fuente: Elaboración propia del autor

Para obtener la conversión del trabajo de Pimentel y Paztec se consideró la siguiente información: Se requieren 2240 Kcalx1000 (es decir 9.38 GJ) de combustible fósil para producir 1000 L de etanol. De acuerdo con estos autores este monto necesita entre 12 y 14 toneladas de caña fresca (en este caso se asuma 14). Esto da un contenido energético de 0.67 GJ/ton y se reportó una eficiencia de 77 ton/ha, dando un insumo total de 51.59 GJ/ha.

En el caso de Macedo también fue usado el supuesto de 77 ton/ha y en su trabajo se reporta un consumo energético de 0.23 GJ/ton. Esto se traduce en un insumo de energía de 18.01 GJ/ha.

En el trabajo de Boddey se usa una conversión simple de unidades de MJ a GJ, mientras que el informe de Dias de Oliveira no requiere de ningún cambio en particular. El resumen de estos resultados se puede ver en la figura 2.

Figura 2. Recalculation of energy inputs for sugarcane-based ethanol (GJ/ha)



Fuente: Elaboración propia del autor

Se realizó un cálculo del contenido calórico producto energético con el fin de estandarizar resultados. Se sumió una producción de 82 L de etanol hidratado a partir de una onelada de caña (Ministério da Agricultura de Brasil, 2007) y una productividad de 77 ton/ha dando como resultado 6314 L/ha para las condiciones brasileras. El valor calorífico de un litro de etanol es 21.45 MJ [24], así que una hectárea de caña de azúcar una vez procesada arroja 135.4 GJ que fue el valor usado para calcular el EROI. Haciendo la comparación entre las tasas energéticas aquí obtenidas con aquellas presentadas originalmente surgen apenas discrepancias menores³, de tal suerte que un contraste entre los estudios basado en estos resultados es absolutamente válido.

3 Esto se puede deber a diferencias con respecto a los supuestos originales. Por ejemplo en el trabajo de Macedo se aume una productividad de 81ton/la y una tasa de procesamiento de 85.4L/ton.

Boddey y Macedo obtuvieron las tasas I/O más favorables, sin embargo ninguno de estos dos estudios abarca la etapa de distribución. Ahora bien si se asume el peor escenario de distribución presentado aquí (el caso de Pimentel y Paztek) la inclusión de la distribución representaría un insumo adicional de energía del orden de 17.3% por encima de los insumos preestablecidos y reduciría las tasas energéticas de Boddey y Macedo a 6.4 y 7.5 respectivamente. Si el cálculo se realizara baso en los resultados de Dias de Oliveira se requeriría una energía extra de 7.1% y las tasas O/I darían 7 y 8.25 indicando que, a pesar de la etapa de distribución reduce la tasa energética su contribución total no es significativa.

En el estudio de Pimentel y Paztek hay una incidencia evidente de la etapa industrial que da cuenta de más del 35% del insumo total, mientras que en los otros estudios esta misma variable escasamente supera el 17% (menos de la mitad).

Es posible que se asumiera un período de tiempo muy corto de las operaciones de la planta, de manera que se dio una sobrestimación de la energía contenida en algunos de los materiales usados en su construcción, tal como el cemento y acero (Ver tabla 1).

La única coincidencia a lo largo de estos estudios fue la preponderancia que tiene la etapa agrícola, con una participación superior al 80% de los insumos energéticos en 3 de los estudios. En el caso de Pimentel y Paztek fue cercana al 50%.

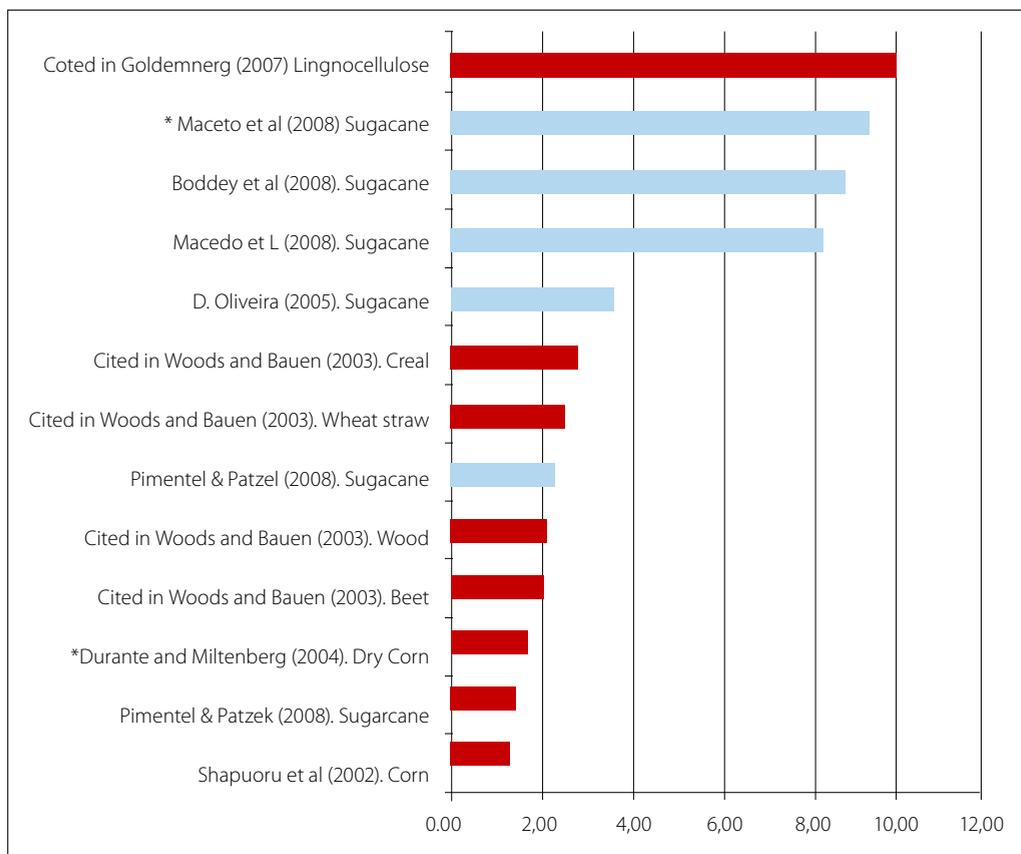
Conclusiones y comentarios finales

A lo largo de este artículo se ha mostrado una comparación entre cuatro estudios recientes sobre energía producida a partir de etanol de caña de azúcar. En todos ellos se obtuvo una tasa energética mayor a uno, lo cual implica que por cada unidad de combustible fósil usada en proceso se crea más de una unidad de biocombustible equivalente en contenido calórico. Los equipos de Pimentel y Paztek, y Dias de Oliveira muestran algún escepticismo en los beneficios obtenidos a partir de cultivos energéticos y esto se traduce en bajas tasas energéticas; sin embargo se presentan en este documento evidencia de algunos cálculos erróneos en términos de la inclusión de variables como la *energía* (emergy) o mal interpretación de tiempos de funcionamiento de planta, que aparentemente alteran los resultados.

De cualquier manera, si se realiza una comparación a través de diferentes insumos usados mundialmente para la elaboración de etanol, es evidente que la caña azucarera en Brasil clasifica con los resultados más destacados dentro de las tecnologías de primera generación como se muestra en la figura 3.

La tecnología basada en lignocelulosa tiene un potencial energético aún mayor, pero tiene limitaciones para alcanzar la producción a escala comercial.

Es importante seguir mejorando la eficiencia del etanol, mediante diferentes caminos: incrementos de la productividad de la materia prima, en donde resulta fundamental la inclusión de mejores y más modernas prácticas agrícolas; la difusión de tecnologías flexibles (Flex-fuel) que creen incentivos de hacia la demanda sin crear presión innecesaria sobre el consumidor; y finalmente la mejora de las tecnologías disponibles de procesamiento que permitan en un futuro cercano el aprovechamiento del material celulósico para la producción de etanol. Sin embargo, es un hecho que, actualmente el etanol de caña, producido bajo las condiciones de Brasil, se erige como una de las mejores alternativas dentro de los combustibles para transporte. Adicionalmente, varios países de Latinoamérica que cuentan con condiciones naturales similares tienen un gran potencial para entrar en el mercado mundial de este producto expandiendo la oferta y diseminando los beneficios del etanol de azúcar en un futuro cercano.

Figura 3. Bio-ethanol O/I ratio according to selected feedstock in different studies

Fuente: Elaboración propia del autor

Notas: Fuentes [4, 12, 19, 20, 22, 25-27] Barras gris claro indican el caso brasileiro.

* Incluye co-productos (energía eléctrica y vapor).

Bibliografía

1. Coelho, S. *Brazilian sugarcane ethanol: lesson learned.* in *Workshop & Business Forum on Sustainable Biomass Production for the World Market.* 2005. São Paulo: CENBIO – The Brazilian Reference Center on Biomass.
2. Ramírez Triana, C.A., *Biocombustibles: seguridad energética y sostenibilidad. Conceptualización académica e implementación en Colombia.* Punto de Vista, 2010. **2:** p. 43-79.
3. Schwartz, S.B., “A commonwealth within itself”. *The early Brazilian sugar industry, 1550-1670.* Revista de Indias, 2005. LXV(233): p. 49-116.
4. Boddey, R., et al., *Bio-Ethanol Production in Brazil in Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*

- Benefits and Risks* D. Pimentel, Editor. 2008, Springer Netherlands. p. 321-356.
5. Xavier, M.R., *The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience*, in *Advancing Liberty From the Economy to Ecology*. 2007, Competitive Enterprise Institute: Washington.
 6. -Filho, J., H.L. Burnquist, and C.E.F. Vian, *Bioenergy and the Rise of Sugarcane-Based Ethanol in Brazil*, in *Choices: The magazine of food, farm and resource issues*. 2006, America Agricultural Economics association.
 7. Macedo, I.d.C., *Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996)*. Biomass and Bioenergy, 1998. 14(1): p. 77-81.
 8. EPE (Empresa de pesquisa energética), *Perspectives for Ethanol in Brazil [Perspectivas para o etanol no Brasil (Portuguese)]*, in *Cadernos de Energia EPE*. 2008: Brasília. p. 36.
 9. COPERSUCAR. *Ethanol elaboration process 2010* [cited 31/07/2010]; Available from: <http://www.copersucar.com.br/institucional/ing/academia/alcool.asp>.
 10. Dale, B.E., *Thinking clearly about biofuels: ending the irrelevant 'net energy' debate and developing better performance metrics for alternative fuels*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2007. 1(1): p. 14-17.
 11. Mathews, J.A., *Biofuels: What a Biopact between North and South could achieve*. Energy Policy, 2007. 35(7): p. 3550-3570.
 12. Goldemberg, J., *Ethanol for a Sustainable Energy Future*. Science, 2007. 315(5813): p. 808-810.
 13. Pimentel, D., *Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts Are Negative*. Natural Resources Research, 2003. 12(2): p. 127-134.
 14. Searchinger, T., et al., *Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change*. Science, 2008. 319(5867): p. 1238-1240.
 15. Brown, L. (2008) *Why Ethanol Production Will Drive World Food Prices Even Higher in 2008*. Volume, 1-5
 16. Von Blottnitz, H. and M.A. Curran, *A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective*. Journal of Cleaner Production, 2007. 15(7): p. 607-619.
 17. Cleveland, C.J. and R. Costanza (2008) *Energy return on investment (EROI)*.
 18. Smeets, E., et al., *Sustainability of Brazilian bio-ethanol*. 2006, Copernicus Institute– Department of Science, Technology and Society: Utrecht, The Netherlands.
 19. Pimentel, D. and T.W. Patzek, *Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane, in Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*. 2008. p. 357-371.
 20. Macedo, I.C., J.E.A. Seabra, and J.E.A.R. Silva, *Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020*. Biomass and Bioenergy, 2008. 32(7): p. 582-595.
 21. Odum, H., M. Brown, and S. Brant-Williams, *Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation*. Draft ed. Vol. 1. 2000, Miami, FL: Center for Environmental Policy.
 22. Dias De Oliveira, M.E., B.E. Vaughan, and E.J. Rykiel, *Ethanol as Fuel: Energy,*

- Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint*. BioScience, 2005. 55(7): p. 593-602.
23. MAPA, *Balanço Nacional da Cana-de-Açúcar e Agroenergia* P.e.A. Ministério da Agricultura, Editor. 2007: Brasília. DF.
 24. Pimentel, D., ed. *CRC Handbook of energy utilization in agriculture*. 1980, CRC Press: Boca Raton.
 25. Durante, D. and M. Miltenberger, *Net Energy Balance of Ethanol Production*. Ethanol Across America, 2004.
 26. Shapouri, H., J.A. Duffield, and M. Wang, *The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update*, E.R.S. United States Department of Agriculture, Agricultural Economics Reports, Editor. 2002.
 27. Woods, J. and A. Bauen, *Technology status review and carbon abatement potential of renewable transport fuels in the UK*. 2003, Imperial College London: London.