



DIAGNÓSTICO DEL DESARROLLO DE BIORREFINERÍAS EN MÉXICO A DIAGNOSTIC STUDY ON THE DEVELOPMENT OF BIOREFINERIES IN MEXICO

J.C. Sacramento-Rivero^{1*}, G. Romero¹, E. Cortés-Rodríguez¹, E. Pech¹ y S. Blanco-Rosete²

¹Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán, México, Campus de Ingeniería y Ciencias Exactas, Periférico Norte Km. 33.5, Tablaje Catastral 13615, Col. Chuburná de Hidalgo Inn, Mérida, Yucatán, 97203, México

²School of Chemical Engineering and Analytical Science, The University of Manchester, M60 1QD, Manchester, Reino Unido

Recibido 24 de Junio 2010; Aceptado 21 de Septiembre 2010

Resumen

Las biorrefinerías son instalaciones de transformación de biomasa en una variedad de productos de valor agregado incluyendo combustibles, energía, químicos y productos finales. Éstas se conciben como la base tecnológica de una nueva industria basada en la biomasa. En este estudio se describen los retos y oportunidades que implican su desarrollo e implementación con el propósito de establecer la situación actual y el futuro del sistema energético y económico mexicano, identificando las áreas de oportunidad en materia de investigación, desarrollo e innovación. Mediante una revisión bibliográfica de las crisis energética y alimentaria, y de las estrategias de desarrollo, producción y aprovechamiento de biocombustibles y biomasa en las últimas décadas, se realizó un diagnóstico de la situación energética actual, a nivel mundial y nacional paralelamente. En un análisis Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas se analizaron y propusieron posibles estrategias para mitigar riesgos y enfrentar problemáticas inherentes al desarrollo sostenible de las biorrefinerías, existiendo una oportunidad única para México en este ámbito debido a sus recursos agroindustriales y su capacidad de desarrollo e innovación tecnológica, a pesar de la disminución anual de presupuesto en ciencia y tecnología y la ausencia de una estrategia nacional que le dé prioridad al desarrollo de biorrefinerías.

Palabras clave: biorrefinería, biocombustibles, químicos renovables, sostenibilidad, sustentabilidad, análisis FODA, DAFO.

Abstract

Biorefineries are facilities comprised of biomass-transformation equipment and processes, capable of producing a range of products including biofuels, energy, platform chemicals and final-use products. The biorefinery concept will be the technological building block of a new biomass-based economy. This article describes the current challenges and opportunities on the development and implementation of biorefineries on a global level, as well as opportunity areas on R&D, aiming to recognise the current and future scenarios of the energetic and economic system in Mexico. A literature review on the energy and food crisis and on the development strategies, production and use of biofuels and biomass over the last decades allowed to make a diagnosis of the current global and national energy situation. A SWOT analysis was performed providing a basis for the formulation of contingency strategies before the risks and problems idiosyncratic to biorefineries. Mexico was identified as being in a privileged position due to its vast natural resources and good capacity for technology innovation, despite of an annual reduction on the national science-and-technology budget and a lack of a national strategy for prioritising the development of biorefineries.

Keywords: biorefinery, sustainability, biofuels, renewable chemicals, platform chemicals, SWOT analysis.

* Autor para la correspondencia. E-mail: julio.sacramento@uady.mx

1 Introducción: Biorrefinerías y el desarrollo sostenible

Las actividades de refinación de petróleo y la petroquímica marcaron la segunda mitad del siglo pasado como industrias de gran crecimiento y fuente de un vertiginoso desarrollo tecnológico. Sin embargo, al día de hoy se resienten los efectos de varios acontecimientos relacionados con esta importante industria, por ejemplo (Davenport, 2008, FEDIT, 2007): 1) la incertidumbre en la disponibilidad y precio del petróleo, la cual tiene un gran impacto sobre las decisiones que se toman hoy sobre las políticas energética, fiscal y comercial de las naciones; 2) la imposibilidad de establecer un modelo de desarrollo sostenible debido a esta misma incertidumbre; 3) el impacto ambiental que inevitablemente supone el uso de energéticos fósiles y 4) el deseo de muchas naciones de lograr independencia energética e incrementar sus prácticas de desarrollo sostenible. Éstas entre otras razones justifican ampliamente la búsqueda de alternativas que disminuyan drásticamente la dependencia del petróleo.

Irónicamente, las propuestas que hoy se nos presentan al respecto, exigen volver la vista a conceptos de desarrollos pasados, claro está, desde nuevos enfoques tecnológicos. Destaca el concepto *Chemurgy*, nacido y desarrollado en los años 20, principalmente en los Estados Unidos. Básicamente, *Chemurgy* fue un intento por “utilizar productos agrícolas con fines distintos a los alimentarios” (Hale, 1934). Las tecnologías desarrolladas bajo este concepto se enfocaron en transformar productos y residuos agrícolas en productos químicos. Las investigaciones alrededor de este concepto cesaron casi en su totalidad después de la 2ª Guerra Mundial debido a que los productos obtenidos con estas tecnologías no eran competitivos con los producidos por la industria petroquímica. Casi un siglo después los derivados del petróleo son cada vez más escasos y el perjuicio ambiental que suponen hace cuestionable su uso. Esto obliga a la comunidad científica a afrontar los retos tecnológicos y económicos que presenta la explotación de los recursos renovables como plataforma productiva.

En promedio, la industria química utiliza en promedio un 15% del total de petróleo: 10% como materia prima y 4-5% como combustible (FEDIT, 2007). El resto es utilizado para la producción

de combustible, en donde una parte significativa recae en el sector de transportación. Así, si bien es cierto que la presión más grande recae en encontrar fuentes alternas para combustibles, también es cierto que para hacer económicamente viable la producción de los biocombustibles, es necesario darle valor agregado a los subproductos que de esta actividad se generen. La mejor manera de hacer esto es convirtiendo estos subproductos en químicos novedosos (con nuevas aplicaciones) y en químicos de plataforma o base (bloques básicos de los que se desprenden cadenas de producción de muchos otros químicos).

Es así como en los años 90 se acuña el término “biorrefinería” (“BR”), que amplía el concepto de *Chemurgy* al considerar el uso de todo tipo de biomasa como materia prima para producir una amplia gama de productos que incluya combustibles, químicos de plataforma, derivados y energía utilizable (EUA NREL, 2008). La proliferación de este tipo de instalaciones favorecerá la paulatina transición de una petroeconomía (basada en el petróleo) a una bioeconomía (basada en recursos renovables de origen biológico) (Jenkins, 2008).

Para los países que dependen altamente del petróleo en su matriz energética y que cuentan con recursos agroindustriales y la diversidad natural suficientes (como es el caso de México) este tema representa una oportunidad sin precedentes, tanto como un reto para sus capacidades de desarrollo e innovación tecnológica. Es relevante entonces preguntarse, ¿está México a la altura de este reto? ¿Cuáles serán las consecuencias en caso de no estarlo?

1.1 Desarrollo sostenible

Es imperativo que el estudio y desarrollo de las BR se realice en un marco de desarrollo sostenible, entendiendo por esto como “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las propias” (ONU, 1987). La razón principal del auge de la temática de las BR hoy en día se debe precisamente al uso desmedido que se le ha dado a los recursos energéticos fósiles, que ha originado la crisis energética que vivimos hoy. Desplazarnos al uso de la biomasa sin una estrategia de sostenibilidad, con el tiempo nos conducirá inexorablemente a una situación semejante. Caso muy conocido es el del Programa

Nacional de Alcohol en Brasil, que aunque logró el desplazamiento de la gasolina con alcohol de caña, en 10 años se manifestaron problemas causados por la mala planeación y una limitada visión a largo plazo, tales como escasez de alcohol por mala planificación de cosechas, incrementos en las exportaciones y reducciones en los incentivos fiscales para los agricultores (Blanco-Rosete y Webb, 2008).

Así, cualquier estrategia de desarrollo que contemple la utilización de materias primas renovables debe medirse y evaluarse en cada proyecto y política que se proponga, preferentemente de manera cuantitativa, con herramientas de evaluación de sostenibilidad.

2 Objetivos y alcance

Este trabajo presenta un diagnóstico de los retos y oportunidades en México ante el diseño e implementación de biorrefinerías como elementos básicos del desarrollo sostenible. Como resultado de este diagnóstico, se pretenden identificar las áreas de oportunidad en materia de investigación, desarrollo e innovación (“I+D+I”) en el país y un esbozo de las estrategias posibles para mitigar los riesgos y enfrentar las problemáticas inherentes al desarrollo sostenible de biorrefinerías.

3 Metodología

Las conclusiones de este trabajo están basadas en el análisis de la información recabada durante una revisión bibliográfica. Las etapas de trabajo fueron:

- 1) Revisión bibliográfica en artículos científicos, libros, reportes técnicos, revistas y periódicos e informes empresariales a los que se tuvo acceso con los recursos bibliotecarios de la Universidad Autónoma de Yucatán. Fueron de especial ayuda las páginas web de las instancias gubernamentales de los diferentes países que se mencionan.
- 2) Clasificación, análisis y síntesis de la información recabada, siguiendo la lógica de discurso plasmada en la estructura del presente documento. Particularmente, durante la etapa de análisis se realizó un

análisis FODA (Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas) de México ante el desarrollo de las biorrefinerías.

- 3) Identificación de los riesgos encontrados a partir del análisis FODA y la propuesta de estrategias para mitigarlos.

4 El estado actual de las biorrefinerías en el mundo

4.1 Perspectivas de desarrollo

A raíz de la crisis petrolera, las potencias mundiales han incrementado su presupuesto y capacidad de I+D+I en materia de combustibles. Internacionalmente, el Protocolo de Kioto es el mecanismo que motiva este cambio, al vincular jurídicamente a las naciones con el compromiso de reducir las emisiones globales de Gases con Efecto Invernadero (“GEI”) a la atmósfera a un nivel 5% menor de lo que se generaba en 1990, en el período comprendido entre 2008 y 2012. Mientras que el Protocolo no fue ratificado por el mínimo de naciones sino hasta 2005 con la entrada de Rusia, su texto fue adoptado desde 1995 y los mecanismos de aplicación, en especial el Mecanismo de Desarrollo Limpio (“MDL”) y el Mercado de Carbono, se han ido implementando desde entonces (ONU, 2009b). Se espera que un nuevo protocolo se elabore en México, durante la reunión de la Convención Marco de Naciones Unidas de Cambio Climático COP-16 en diciembre de 2010 (ONU, 2009a), donde probablemente los límites de disminución de emisiones se hagan más estrictos. Todo esto supone una presión constante para las potencias y países en desarrollo de aumentar su capacidad de producción de energía renovable que implique reducciones considerables de emisiones de GEI. Esto a su vez representa una oportunidad para los países en vías de desarrollo para obtener subsidios para implementar soluciones limpias a través de mecanismos como el MDL.

En este sentido, la Unión Europea se ha planteado la meta de satisfacer con bioenergía el 12.5% de sus necesidades energéticas en el sector doméstico e industrial para 2010, el 26% para 2020 y el 58% para 2050. Las metas para el sector de transporte (porcentaje de demanda satisfecha con biocombustibles líquidos) son de 5.8% en 2010 y

20% en 2020 (Kamm y col., 2006b). En cuanto a producción de químicos renovables, la Unión Europea no cuenta con metas oficiales, aunque se estima que en Alemania el 12% de la producción de químicos base provienen de fuentes renovables (Sustainable Chemistry 07, 2007).

Un breve vistazo a estas metas deja en claro que la transición hacia una bio-economía será muy paulatina y posiblemente no se verá en el presente siglo. Sin embargo, la implementación de soluciones energéticas renovables demandará que éstas sean tanto ambiental como económicamente factibles. La producción simultánea de químicos renovables tendrá que ser considerada, de manera que los costos de producción se diluyan y las ganancias netas se incrementen al ampliar la gama de productos con valor agregado. Esto es justo lo que ocurre dentro del marco de las biorrefinerías.

Por su parte Estados Unidos, a pesar de no haber ratificado el Protocolo de Kioto, se ha planteado metas similares a las de la Unión Europea. Así, para 2020 la demanda de bioenergía en el sector doméstico e industrial deberá ser del 5%, permaneciendo constante en 2030, y en el sector de transporte, 10% deberán ser biocombustibles en 2020 y 20% en 2030.

Destaca que Estados Unidos junto con Alemania son los únicos países que contemplan metas oficiales de desplazamiento de químicos tradicionales con sus contrapartes renovables. Así se habla de que para el 2020, 18% de los químicos seleccionados como de plataforma sean de fuentes renovables, aumentando a un 25% para 2030 (Kamm y col., 2006b).

En los eventos especializados en biorrefinerías realizados en los últimos años se ha consensado que el horizonte para la implementación de biorrefinerías es de aproximadamente 10 años (Kamm, 2008). Sólo en el 2007 se organizaron en Europa más de 30 reuniones (en Italia, Bélgica, Alemania, Suecia y España) (Biorefinery Euroview, 2009), tratándose temas como: tecnologías para las biorrefinerías de aprovechamiento integral de cosechas, de bosques y lignocelulosa, la biorrefinería verde y la biorrefinería de plataforma múltiple; sostenibilidad de biorrefinerías; políticas y agroindustria. En contraste, en América Latina los únicos eventos internacionales se registran en Chile, celebrándose el primer Congreso Latinoamericano de Biorrefinerías en noviembre de 2006, y su segunda edición en mayo de 2009

(<http://www.bio-refinerias.cl/introduccion.html>).

4.1.1 En Estados Unidos y Europa

Solamente Estados Unidos (“*EEUU*”) y la Unión Europea (“*UE*”), y en menor medida Canadá y Japón, contemplan una estrategia nacional para el desarrollo de una industria basada en la biomasa (FEDIT, 2007). Estas estrategias nacionales son el motor que impulsa a estos países hacia las metas mencionadas en la sección anterior. Dichas estrategias se enfocan al desarrollo de biorrefinerías de los distintos tipos; por ejemplo, en EEUU ya existen plantas que producen ácido láctico a partir del maíz y en Europa plantas que producen etanol a partir de la remolacha y de cereales; al mismo tiempo, se están construyendo u operando nuevas plantas en España, Islandia, Austria y Alemania (Kamm y col., 2006a).

El primer paso de estas estrategias nacionales fue la arquitectura de un marco legal y la creación de instancias que dirijan el desarrollo en el sentido deseado. Siguen a esto fuertes asignaciones de fondos y capacidad de I+D+I.

Estados Unidos y el Programa Biomasa

En el caso de los EEUU, los avances han sido producto del trabajo conjunto de su Departamento de Energía (USDOE) y el Departamento de Agricultura (USDA) en el Programa Biomasa (*Biomass Program*). Esta cooperación fue detonada por la *Sustainable Fuels and Chemicals Act* y la *Biomass Research and Development Act*, firmadas en el 2000. La misión del Programa Biomasa es “fomentar, junto con la industria de EEUU, la investigación y desarrollo en tecnologías avanzadas que transformarán [los] abundantes recursos de biomasa en biocombustibles, generación de energía y bioproductos de alto valor añadido producidos localmente de manera limpia y económicamente asumible, por medio del desarrollo de biorrefinerías. Los resultados serán opciones para el suministro de energía, seguridad energética y desarrollo económico” (Werpy y Petersen, 2004).

Más aún, en 2005 se firma el *Energy Policy Act* que focaliza las áreas técnicas de desarrollo en la producción y recolección avanzadas de materias primas (biomasa), la superación de los problemas de fraccionamiento de la biomasa

celulósica, la diversificación de productos basados en biomasa obtenidos en biorrefinerías y el análisis para proporcionar una guía estratégica para las tecnologías relacionadas con la biomasa (FEDIT, 2007).

Para focalizar los esfuerzos de I+D y los recursos disponibles, el Ministerio de Energía en conjunto con el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (“NREL”) publicaron una investigación en donde se identificaron 12 químicos de plataforma o base con el potencial de obtenerse de fuentes de biomasa y de los que se deriva una cantidad de productos químicos capaces de sustituir a la gran mayoría de los químicos actualmente producidos en petroquímica (Werpy y Petersen, 2004).

Actualmente el proyecto más aterrizado en el país es el *Cellulosic ethanol biorefineries*, financiado por el Departamento de Energía y compañías privadas de EEUU y europeas. Este consiste en la construcción de seis biorrefinerías en escala piloto para demostración de etanol celulósico, con una inversión de aproximadamente US\$770 millones de 2007 a 2010 (Jenkins, 2008).

La Unión Europea y SusChem

En la UE la estrategia ha sido diferente. Mientras que el Programa de Investigación Estratégica hacia el 2025 fue planteada por la UE como organismo centralizado, a través de su Plataforma Tecnológica Europea de Química Sostenible (“*SusChem*”) (SusChem, 2005), la implementación de la investigación debe hacerse en cada uno de los países miembros. El Programa de Investigación Estratégica de SusChem fue publicado oficialmente en 2006 y establece dentro de su visión la necesidad, entre otras, de aumentar la disponibilidad de químicos sostenibles provenientes de biomasa. Destacan dos proyectos marco en esta área: 1) la biorrefinería integrada, enfocada a la construcción de plantas piloto y de demostración, 2) la fábrica F3 (rápida, flexible y del futuro - *fast, flexible, future*), enfocada a la construcción de instalaciones piloto de I+D+I en donde se logre la integración máxima de tecnologías existentes para el diseño de nuevos procesos en biotecnología industrial (o biotecnología “blanca”), nuevos materiales y química sostenible (o química “verde”), entre otros.

Basándose en las áreas prioritarias de

SusChem, se aprobó *Biorefinery Euroview*, un proyecto madre para monitorear y evaluar las actividades de desarrollo tecnológico de las biorrefinerías, así como sus implicaciones para el sector agrícola y forestal (Biorefinery Euroview, 2009). Paralelamente, el proyecto BIOPOL existe para evaluar el estatus técnico, social, ambiental, político y de implementación de los resultados de investigación en biorrefinerías y sus implicaciones en las políticas necesarias para estimular dichos desarrollos, desde la perspectiva de los sectores agrícola y forestal (Annevelink, 2008). Este proyecto engloba un núcleo básico de 8 universidades e institutos de investigación de distintos países europeos.

Los distintos temas de implementación se han desarrollado paralelamente y los resultados dados a conocer a través de conferencias internacionales. Por ejemplo en la Conferencia Europea sobre la Investigación en Biorrefinerías 2006 en Helsinki (Comisión Europea, 2006) se abordaron temas acerca de la biomasa como materia prima, su uso potencial, los avances en la conversión bioquímica y termoquímica, y los análisis económico, técnico y ambiental. Mientras que esta conferencia fue una iniciativa gubernamental, también se han seguido eventos organizados por el sector industrial, como la Conferencia sobre Biorrefinerías de Madera del Norte en Estocolmo 2008 y Helsinki 2009 (KCL, 2009), organizada por las empresas STFI-Packforsk, Solander Science Park, Processum, KCL, VTT y Åbo Akademi. Ahí se reportaron avances en los procesos de separación y conversión, así como los productos potenciales (energía, químicos y materiales) de las biorrefinerías basadas en la madera. Por su parte, los temas de bioeconomía, fermentaciones industriales, bioquímicos, financiamiento y sostenibilidad se tratan en la Conferencia Internacional en Recursos Renovables y Biorrefinerías por iniciativa de universidades, centros de investigación y empresas privadas. La sexta edición de esta conferencia anual se realizará en Alemania en 2010 (RRB, 2009).

La participación de los diversos sectores, gubernamental, industrial y académico, y la sinergia generada en cada país es posible, en gran medida, gracias al apoyo de la UE mediante la plataforma SusChem y a que se ubica dentro de un marco de financiamiento centralizado. Un ejemplo muy claro de esto es

la iniciativa *Integrated Biorefining Technologies Initiative* (IBTI), en donde participa el Consejo Británico para la innovación industrial y empresas privadas. El objetivo de la iniciativa es la identificación de necesidades de I+D en la cadena de suministro para lograr todo el potencial económico de la biomanufactura de químicos y materiales de insumos renovables y cuenta con un financiamiento de £5 millones para 2008-2013 (Jenkins, 2008).

4.1.2 En Latinoamérica

Existen análisis desde la perspectiva socio-económica que intentan predecir la dirección de la economía de los países en función de su involucramiento en el desarrollo de productos derivados de la biomasa. La empresa de consultoría financiera y de desarrollo tecnológico Rabobank Int. publicó un estudio de este tipo para México (Reca, 2007) y concluye que la indiferencia ante el cambio de industria pudiera resultar fatídico para la economía del país.

En América Latina el tema de la producción de químicos a partir de productos renovables ha sido un tema de interés secundario. Los esfuerzos de los gobiernos y la comunidad científica se han centrado en la exploración y producción de biocombustibles, principalmente bioetanol y más recientemente biodiesel. Desafortunadamente, muchas de las iniciativas fomentadas en esta dirección con frecuencia generan polémica debido a un mal planteamiento agro-industrial, falta de previsión de los efectos de importación/exportación o a su falta de sostenibilidad; podemos citar por ejemplo la crisis de la tortilla en México en 2007, que se asume fue ocasionado por factores como: aumento internacional del precio del maíz, provocado en parte por la desviación de maíz hacia la producción de etanol, falta de incentivos adecuados para productores mexicanos e inadecuada operatividad en el Tratado de Libre Comercio de Norteamérica (Roig-Franzia, 2007, Asociación de Productores de Energías Renovables, 2007).

Por otra parte, los proyectos de implementación en los últimos años han girado en torno a la generación de energía eléctrica con energías alternas (Blanco-Rosete y Webb, 2008). Ningún país latinoamericano cuenta con una estrategia nacional que considere la producción

de químicos renovables, comparable con las de Estados Unidos y la Unión Europea. Esto se traduce en una escasez de fondos, falta de incentivos y de políticas fiscales que promuevan entre el sector productivo el interés en las biorrefinerías.

Los países latinoamericanos pueden beneficiarse directamente de la producción local de biocombustibles, pero se requiere de un marco legal adecuado sobre bioenergía que proteja a comunidades rurales (ámbito social) y ecosistemas (ámbito ambiental) de la explotación desmedida por parte de grandes firmas transnacionales. En este sentido, la legislación de países latinoamericanos en materia de biocombustibles es muy reciente. Excluyendo los casos de Brasil (1975), Guatemala (1985) y Honduras (1988) las legislaciones son todas del siglo XXI. Los países latinoamericanos que cuentan con alguna legislación para biocombustibles son Nicaragua (2002), Perú (2003), Colombia (2004), Costa Rica (2004), Ecuador (2004), Paraguay (2005), Bolivia (2005), Argentina (2006). (Ajila y Chiliquinga, 2007). Más recientemente se han consolidado similares legislaciones en Chile, Cuba, El Salvador, México, Panamá, República Dominicana, Uruguay y Venezuela. Sin embargo, a pesar de ser legislaciones nuevas, ninguna contempla la producción de químicos renovables o introduce la figura de las biorrefinerías.

El país latinoamericano con plataforma tecnológica más favorable para el establecimiento de biorrefinerías es Brasil. Su experiencia obteniendo energía a partir de caña de azúcar se remonta a 1975 con el Programa Nacional de Alcohol, con el que se logró un avance arrollador en la sustitución de gasolina por alcohol, logrando que el 96% de los vehículos en el mercado operen con 100% de bioetanol en 1985 (Moreira y Goldemberg, 1999). Esta experiencia comenzó a extrapolarse a la producción de biodiesel en 2004/2005 al destinar el Gobierno Federal la cantidad de US\$5.7 millones para investigación y desarrollo de procesos industriales de biodiesel, esto con la visión de utilizar biodiesel en mezclas del 5% para 2013 en sustitución del petrodiesel (National Biodiesel Production & Use Program, 2004).

Además, en un esfuerzo interdepartamental del gobierno brasileño, los Ministerios de Agricultura, de Pesca y Abastecimiento, de Ciencia y Tecnología, de Minería y Energía y de Desarrollo,

Industria y Comercio publicaron los Lineamientos para Políticas en Agroenergía, que contemplan 4 áreas de desarrollo: 1) producción de alcohol, 2) producción de biodiesel, 3) cosechas energéticas y 4) aprovechamiento de residuos agroforestales. Los factores que le dan ventaja competitiva a Brasil en estos cuatro aspectos son su experiencia como productores de bioetanol, disponibilidad de tierra, clima y disponibilidad de mano de obra (Blanco-Rosete y Webb, 2008).

En Chile se han realizado ya dos congresos internacionales (en 2006 y 2009) (Congreso Latinoamericano de Bio-refinerías, 2009) sobre biorrefinerías. Aunque la temática se ha centrado principalmente en el tema de la biorrefinería forestal, se han manejado también temas como la transformación bioquímica, la transformación termoquímica y la transformación química o física, así como las implicaciones en materia política y el contexto internacional. Además de la biorrefinería forestal, en Chile se han hecho estudios extensos sobre la producción de biocombustibles a partir de microalgas (Universidad Arturo Prat, 2005).

4.1.3 En México

En materia legal, en el 2005 se aprobó en México la iniciativa de Ley sobre el Aprovechamiento de Fuentes Renovables de Energía con el objetivo de alcanzar un 8% de la energía eléctrica generada (sin contar hidroeléctricas) con recursos renovables para el 2012 (Blanco-Rosete y Webb, 2008). Además, en febrero de 2008 fue aprobada en la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos ("LPDB"). Se contempla como prioridad estratégica en la producción de biocombustibles cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha para la producción de etanol, y la jatrofa, higuera y palma de aceite para producir biodiesel (México SENER, 2006).

La LPDB tiene como objetivo el reconocimiento y la promoción de la bioenergía en México para apoyar el desarrollo sustentable en México, muy particularmente en las áreas rurales; en la misma línea, México también cuenta ya con políticas para fomentar el desarrollo de tecnología para aprovechar fuentes de energías renovables a través del Programa Especial para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE). Finalmente, para coordinar las acciones de regulación en

el uso de las bioenergías, se ha creado una Comisión Intersecretarial para el Desarrollo de los Bioenergéticos integrada por las Secretarías de: Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), de Energía (SENER), de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de Economía (SE), de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y diversas comisiones e institutos (Comisión Reguladora de Energía, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, Instituto de Investigaciones eléctricas, Comisión Federal de Electricidad entre otros) (México, 2009).

En 2008 existían 31 proyectos registrados para la producción de etanol y biodiesel, con cultivos tradicionales como la caña y alternativos como la higuera y la jatrofa, la mayoría proyectados para el 2010. En la Tabla 1 se resumen algunos proyectos representativos en el campo de aprovechamiento de bioenergéticos en México.

El apoyo económico federal para el desarrollo de los bioenergéticos se centra primordialmente en el nivel de investigación aplicada a través de las diversas convocatorias del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ("CONACYT"), especialmente los Fondos Mixtos de investigación, en los que se reúne presupuesto federal, estatal y de las empresas interesadas y en donde en los últimos 3 años han predominado las demandas en fuentes renovables de energía, eficiencia energética y desarrollo sostenible (CONACYT, 2010a).

A nivel de implementación, el Gobierno del Distrito Federal ha manifestado su disposición para que, sumando esfuerzos con el Gobierno Federal, a través de las autoridades del ramo energético, se oriente un plan piloto con el doble propósito de apoyar tanto al campo cañero como a la industria azucarera. El plan consistiría en destinar un importante lote de vehículos que utilizarían gasolina mezclada con un 10% de alcohol anhidro, y en establecer un programa de seguimiento para el control de las emisiones y la verificación del rendimiento de los motores y la evaluación de las partes susceptibles de desgaste (elastómeros). Para todo ello, se contaría con el apoyo del Instituto Mexicano del Petróleo, el Programa Universitario de Energía (PUMA) y de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, entre otros (Seixas, 2007).

Como puede apreciarse en la Tabla 1, ninguno de los proyectos en vías de implementación encon-

Tabla 1. Algunos proyectos representativos de aprovechamiento de bioenergéticos en México

Empresa/Estado	Proyecto	Fecha de arranque	Ref
Grupo Energético, ITESM / Nuevo León	Planta de biodiesel de sebo animal (Capacidad de 1 millón de litros por mes)	2005	(México SENER, 2006)
Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V. / Nuevo León	Proyecto de Bioenergía de Nuevo León S.A. (Aprovechamiento de biogás del relleno sanitario para producir 7 MW de energía eléctrica) / Proyecto de ampliación a 17 MW	2005/2010	(Gobierno del Estado de Nuevo León, 2010)
BioFields / Sonora	Bioetanol de algas verdeazules	2010	(BioFields, 2009)
Energías Renovables del Bierzo S.L / Guanjuato	Sistema de calefacción centralizado a partir de biomasa forestal	2008	(Diario de León, 2008)
Gobierno Federal / Nacional	Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar (Producir 60.7 millones de toneladas de caña de azúcar en 2012, incluyendo 6.5 millones para la elaboración de etanol)	2008	(México SAGARPA, 2010a)

trados para México considera la producción de químicos renovables. Sin embargo, a nivel de investigación existen muchos proyectos que proponen procesos de producción de diversos químicos y productos a partir de materias primas renovables. Aunque estos nuevos procesos son susceptibles de incluirse en un esquema de biorrefinería integrada, no se encontró referencia de ninguna investigación que contemple un esquema tal. En la Tabla 2 se enlistan algunos proyectos representativos que pudieran servir de base para iniciar investigación aplicada de biorrefinerías integradas.

Además de los proyectos mencionados, una revisión de los términos “biorrefinería”, “químicos renovables” y similares arrojó un total de 14 artículos publicados del 2005 al 2008 en las revistas Tecnología Ciencia y Educación del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos y la Revista Mexicana de Ingeniería Química de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. Esto es evidencia de que estos conceptos comienzan a madurar en la investigación nacional y puede esperarse que se

incremente la producción relacionada de acuerdo a la tendencia internacional.

4.1.4 En el resto del mundo

Canadá

Canadá ha sido por años líder en responsabilidad ambiental y en el uso responsable de recursos naturales. En los 90's inició el programa de Administración de Bosques Sostenible (*Sustainable Forest Management*). Se promueve el desarrollo sostenible como inherente en el planteamiento de su visión y metas de la estrategia de desarrollo nacional y aplica una herramienta de administración llamada desarrollo sostenible estratégico (*Strategic Sustainable Development*) para plantear sus directrices en materia de agricultura. Parte de la estrategia nacional es incorporar el diseño de biorrefinerías dentro de la ya consolidada industria forestal, más específicamente en los molinos de pulpa y papel y el procesamiento de cáñamo (Wellisch, 2008).

La Red de Innovación en Biomasa Canadiense fue creada para facilitar la interacción entre el go-

Tabla 2. Algunos proyectos de investigación en México relacionados con la producción de químicos renovables

Institución	Proyecto	Fecha	Ref
Centro de Investigación de Energía, UNAM Campus Morelos	Optimización del proceso de producción de biocombustibles sustentables (biodiesel de soya, algodón, girasol y maíz)	2008	(Gutierrez Alcalá, 2008, septiembre)
Depto. de Ingeniería y Ciencias Químicas de la UIA, Instituto de Tecnología de la UNAM, Campus Cuaajimalpa de la UAM	Diseño de una planta de bioetanol de residuos celulósicos y otros compuestos secundarios	2008	(Jiménez, 2008)
INIFAP	Bioetanol y biodiesel de diversas especies (remolacha azucarera, sorgo dulce, palma de aceite, jatrofa)	2007-2008	(México INIFAP, 2008)
Universidad Autónoma de Coahuila	Desarrollo de un bioproceso a escala microindustrial para la extracción y recuperación de bioproductos (pectina y bioflavonoides) de alto valor agregado a partir de residuos cítricos generados por la industria citrícola del Estado de Hidalgo	2003	
Universidad Autónoma de Yucatán	Diseño de proceso de separación y purificación de ácido láctico producido por fermentación de residuos de cáscara de naranja	2007	(Gil Horán, 2007)

bierno, las universidades y las empresas con el objetivo de impulsar la innovación en el desarrollo de bioproductos y bioprocesos (Canadian Biomass Innovation Network, 2010). Su trabajo se enfoca en el aprovechamiento de los biorrecursos identificados en el reporte “*Canadian R&D Biostrategy: Towards a Canadian R&D Strategy for Bioproducts and Bioprocesses*”, en donde se identificaron 10 productos clave o de plataforma de gran proyección industrial: biodiesel, metanol, etanol, etilenglicol, ácido láctico, ácido levulínico, ácido succínico, metano, gas de síntesis e hidrógeno (FEDIT, 2007).

Asia: ASEAN Biomass R&D Integrated Strategy

Impulsada principalmente por el *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* de Japón y actualmente formada por nueve países (Malasia, Filipinas, Singapur, Tailandia, Brunei, Vietnam, Laos y Myanmar), la *Association of South-East Asian Nations* dispone de enormes reservas de biomasa, tecnología y un sistema productivo de bajos costos mientras que Japón dispone de tecnología punta y propiedad intelectual para explotarla. Su objetivo es incrementar el número de instalaciones en Asia que procesen biomasa para crear nuevas industrias y nuevos mercados (FEDIT, 2007).

China

China cuenta con el programa “863 National High-Tech Programme”, que consiste en financiamiento gubernamental para I+D en áreas prioritarias de alta tecnología. La biomanufactura de químicos renovables comenzó a ser área prioritaria a partir de 2006. (£1,600 millones de 2006 a 2010) (Jenkins, 2008).

4.2 Proyectos de biorrefinerías en el mundo

Actualmente hay muchos ejemplos de plantas productoras de biocombustibles a partir de biomasa. Este tipo de plantas es referido en ocasiones como biorrefinerías de primera generación. Las biorrefinerías de segunda generación consisten en plantas que acoplan la producción de algunos co-productos a la de biocombustible. Alrededor del mundo existen varias iniciativas para la construcción de biorrefinerías de segunda generación. A continuación se enlista una selección de estas últimas alrededor del mundo.

Canadá

- *Canadian Agriculture Bioproducts Innovation Network*: Proyecto altamente participativo (universidades, compañías privadas, organizaciones de investigación privadas y públicas y dependencias gubernamentales) dirigido a promover el desarrollo y comercialización de bioenergía, bioquímicos y biofarmacéutica (US\$145 millones de 2006 a 2011) (Jenkins, 2008)

Brasil

- En 2011 arrancará una planta de fermentación-deshidratación de etanol y producción de otros químicos a partir de 200 mil ton/año de azúcar de caña. Se planea procesar 350 mil ton/año en el largo plazo.

Islandia

- Planta de demostración escala piloto para procesar 20 mil ton/año de lignocelulosa, proveniente de diversas fuentes. El producto

principal es etanol y tiene como co-productos lignina, proteínas y fertilizante (Kamm, 2008).

Suecia

- *Chemrec y Domsjö Fabriker*: Dos biorrefinerías forestales, utilizando 70% de madera local como materia prima para producir diversos productos como electricidad, lignosulfonatos para alimento animal y bio-fertilizantes. También procesan aceite residual de procesos de cocción (Karbowski, 2009).

Reino Unido

- *British Sugar*: Procesa remolacha y genera como producto principal betaína (para acuacultivos), y como co-productos bioetanol, CO₂, energía térmica y carbonato de calcio, que se destinan al cultivo de tomate, así como pellets de proteína para alimento animal (Karbowski, 2009).
- *Cargill/Cerestar*: Localizada en Manchester, es una biorrefinería de aprovechamiento integral de cosechas, que fabrica derivados de almidón a partir de trigo, así como un amplio rango de polioles excipientes naturales (Karbowski, 2009, Frost & Sullivan, 2010).

España

- *Biorrefinería Multifuncional*: La empresa GCE Bioenergy planea la construcción en 2011 de una biorrefinería de remolacha para producción de bioetanol, pienso y electricidad, con un plan de expansión para producir en el mismo complejo biobutanol, butadieno, aldoles, así como otros productos químicos diversos (GCE Bioenergy, 2010).
- *BFS, Bio Fuel Systems*: empresa basada en Alicante, posee las patentes de un proceso de producción de bio-petróleo. Según sus declaraciones a partir de fitoplancton producirán hidrocarburos de tal manera que podrán obtener la misma gama de productos que se produce del petróleo fósil. Desde 2007 se encuentran en fase de investigación y desarrollo (BFS, 2010).

- *Abengoa Bioenergy*: Actualmente tiene en construcción instalaciones para producir etanol y lignina a partir de 70 ton/día de paja de trigo, maíz y heno. Otro de sus proyectos a escala piloto en construcción consiste en procesar 1 ton/día de residuos agrícolas mediante hidrólisis enzimática (Abengoa Bioenergía, 2010).

Francia

- *BIOHUB*: Consorcio industrial para el desarrollo de químicos basados en materias primas agrícolas en biorrefinerías (€98 millones en 7 años para I+D, €730 millones de la industria a partir de 2010) (Jenkins, 2008).

Alemania

- *CLIB 2021*: Consorcio industrial y de algunas universidades. Programa dirigido a establecer la biotecnología en la industria y la academia, a través de planes de negocio innovadores que fomenten la vinculación entre ambos sectores (€40 millones para 2007-2008) (Jenkins, 2008)
- Otro consorcio industrial construye una biorrefinería verde para obtener proteínas, ácido láctico, alimento animal y biogás a partir de 30 mil ton/año de una mezcla de pasto y alfalfa (Kamm, 2008).
- *Biowert*: Biorrefinería verde en Brensbach, Alemania que procesa desperdicios de pasto y residuos municipales de jardinería y produce componentes proteínicos para forraje y fertilizante natural (Karbowski, 2009).

Holanda

- *Greenmills, Amsterdam*: Su materia prima son aceites vegetales usados para producir biodiesel.
- *BioMCN*: Aprovecha glicerina residual de plantas de biodiesel, principalmente proveniente de Singapur y también genera metanol a partir de gas de síntesis (Karbowski, 2009).

- *Nedalco*: Produce bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, la mayoría de cosechas de trigo (de importación) y paja/heno de actividades agrícolas locales.

Austria

- Un consorcio industrial construye una biorrefinería verde para procesar 5 ton/h de pasto y producir ácido láctico, aminoácidos, fibras y biogás (Kamm, 2008).

Japón

- *Osaka Eco Town*: Planta demostrativa de producción de bioetanol, gas de síntesis y aceite pirolítico mediante hidrólisis con agua subcrítica de materiales lignocelulósicos (King, 2008).

Quizás el ejemplo más notorio de éxito de estas plantas de demostración es el de Islandia. Se trata de una biorrefinería basada en la producción de 7 millones l/año de etanol lignocelulósico, rentable y sostenible (Kamm, 2008). Las razones más destacadas para su éxito son que:

- a) La I+D fueron financiadas en parte por el gobierno de Islandia y parte por la Unión Europea.
- b) Islandia dispone de un mercado de energía renovable (geotérmica) eficiente y rentable.
- c) El proyecto fue operado y financiado entre la iniciativa privada y el gobierno.
- d) Los mercados de biomasa para procesar y de los productos generados pudieron organizarse sin la necesidad de subsidios.

4.3 Necesidades de I+D+I

4.3.1 En tecnología

En la primera década del siglo XXI se probó experimentalmente el concepto de biorrefinería en molinos de estado seco y de estado húmedo, creando la biorrefinería de segunda generación basada en la producción de almidón. En los últimos cinco años se ha logrado fraccionar algunas materias primas para extraer productos de valor agregado antes de procesarla para producir etanol y también ha habido extensos estudios sobre el incremento en la producción

de etanol mediante el uso óptimo de celulosas, hemicelulosas y almidón residual (Kamm, 2008). A corto plazo se requiere dominar las tecnologías para fraccionar los residuos de molinos en estado seco para generar co-productos derivados de lignina. Asimismo se prevé que hacia 2020 se tenga la capacidad científico-tecnológica para instalar biorrefinerías integradas (de tercera generación) a nivel industrial (Kamm, 2008).

Otra problemática de las biorrefinerías forestal y la basada en cosechas es el consumo de agua fresca. Del total del agua utilizada por la industria de manufactura en el mundo, el 50% es usada en la industria química y petroquímica, y la otra mitad por la industria de procesamiento de papel y alimentos (Karbowski, 2009). Esto representa una gran área de oportunidad en I+D+I para optimizar el uso de agua de riego y de procesamiento en biorrefinerías. Áreas de oportunidad claves son: disminución del uso de agua en plantas de energía, tratamiento de agua de proceso e implementación de conceptos de Ecología Industrial (e.g. la interacción entre las biorrefinerías de Cargill y Nedalco en el Reino Unido (Karbowski, 2009)).

También se debe explorar más otras opciones de materias primas para biorrefinerías. La diversificación en los recursos de energía renovable es la única opción viable para asegurar la disponibilidad de energía, pues un sólo tipo de recurso no disminuiría considerablemente la utilización de combustibles fósiles. Más aún, cada región del país debe producir bioenergéticos según su vocación agrícola, medio ambiente y situación social. De acuerdo al clima y zona geográfica de México, los cultivos que se pueden aprovechar en nuestro país para producción de biocombustibles de segunda generación, y por ende como punto de partida para biorrefinerías, son (México SAGARPA, 2009):

- a) Zona norte de México: Sorgo dulce, remolacha, jatrofa.
- b) Zona centro de México: Caña de azúcar, sorgo dulce.
- c) Zona tropical de México: Palma africana.
- d) Zona sur de México: Yuca, higuera, caña, sorgo dulce.

Irrespectivamente de la zona, deben explorarse las tecnologías de biorrefinerías a partir de

residuos municipales y de actividades ganaderas y agrícolas.

Con respecto a las materias primas, debe recordarse que existe un debate intenso respecto a la incidencia negativa que pudiera tener el uso de cultivos que sirvan para alimentación humana, directa o indirectamente, como materia prima para la producción de biocombustibles. Entre éstos se encuentran el maíz, sorgo y la colza, es decir, los cultivos más recurridos para la producción de bioetanol y biodiesel. Se suele destacar como ejemplo la reciente crisis del precio de la tortilla mexicana, atribuible según algunos analistas al incremento de la demanda de grano de maíz en Estados Unidos para producir bioetanol (Blanco-Rosete y Webb, 2008). Por el otro lado, instancias internacionales aseguran que el impacto de la producción de biocombustibles de cultivos agrícolas sobre el precio de los alimentos y la disponibilidad de tierra de siembra es sumamente limitado (Asociación de Productores de Energías Renovables, 2007).

Cualquiera que sea el caso, la realidad es que las tecnologías más dominadas para la producción de biocombustibles son a partir de cosechas alimentarias y por consecuencia el primer *boom* de desarrollo de biorrefinerías se dio sobre estos procesos. Sin embargo cada vez más frecuentemente se presentan diseños de procesos para aprovechar residuos y fracciones lignocelulósicas para producción de biocombustibles y químicos renovables (Cherubini y Jungmeier, 2010; Hamelinck *y col.*, 2005; Venus y Richter, 2007; Goh y Lee, 2010; Baier y Grass, 2001), atendiendo a esta preocupación.

Es también importante considerar las tecnologías de tercera generación. Mucho se habla actualmente de los biocombustibles a partir de algas; sin embargo, es posible obtener también productos químicos de plataforma a partir del glicerol o a partir de los desperdicios de la producción. Adicionalmente, la biomasa microalgal contiene cantidades significativas de proteínas, carbohidratos y otros nutrientes. Aún no se ha propuesto un esquema de biorrefinería de microalgas que genere una amplia variedad de componentes bio-activos que pueden utilizarse como compuesto farmacéuticos, nutrimentos alimenticios y como pigmentos naturales (Chisti, 2007).

Otras necesidades prioritarias en materia tecnológica han sido identificados por diversos

autores (Kamm y col., 2006a, FEDIT, 2007, Werpy y Petersen, 2004, SusChem, 2005):

- a) Aumentar la producción de sustancias con valor agregado (como celulosa, almidón, azúcares, aceites) a partir de biomasa.
- b) Promover la construcción de biorrefinerías en escala piloto.
- c) Elaborar procedimientos sistemáticos para el desarrollo de nuevas síntesis químicas y tecnologías que cumplan con los principios de sostenibilidad (química verde).

4.3.2 En gestión, evaluación y sostenibilidad

La producción local de biocombustibles mediante recursos vegetales no comestibles puede contribuir en la disponibilidad de energías renovables. Sin embargo, la producción extensiva e intensiva en gran escala que requieren los mercados internacionales puede destruir completamente las bases de producción sustentable en el campo, donde se requiere mejorar la calidad de vida y combatir los efectos del cambio climático mediante la captura de carbono y la conservación de los ecosistemas. Sin embargo, las consecuencias de producir biocombustibles extensivamente para exportación pueden generar condiciones severas y agravar los problemas de: seguridad alimentaria, inequidad social, pobreza, cambio climático y degradación de los ecosistemas, originando o agravando fenómenos sociales negativos (Seixas, 2007).

Por esto es claro que se necesitan herramientas que permitan evaluar los procesos de bioenergéticos y bioproductos de manera holística y participativa. Una de las herramientas más utilizadas para evaluar la sostenibilidad de procesos y sistemas es el Análisis de Ciclo de Vida ("ACV"). En el ACV se toman en cuenta los flujos energéticos, de materiales y emisiones del proceso o producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la obtención de las materias primas hasta la disposición de los residuos generados o su reciclaje (Allen y Shonnard, 2002). Sin embargo, los resultados del ACV dependen de la elección de las fronteras del sistema, la cual puede ser subjetiva y depende del criterio y la experiencia del evaluador. Más aún, las dimensiones social y económica de la sostenibilidad no son tomados en cuenta. La metodología del SEEBalance

(Pérez, 2005) intenta hacer esto, aunque padece de las limitaciones de uso extensivo de agregación de indicadores. Existen estudios de aplicación de ACV a la evaluación de biorrefinerías y en su gran mayoría consisten en comparaciones del desempeño ambiental contra instalaciones equivalentes trabajando con petróleo (Cherubini y Jungmeier, 2010).

Los marcos de referencia existentes para la evaluación de sostenibilidad de procesos son incapaces de contemplar todos los aspectos de sostenibilidad requeridos para el caso de las BR. Sólo diseñando estrategias de evaluación particulares para las BR se puede garantizar que su construcción se apegue al desarrollo sostenible de las comunidades locales en donde se ubiquen y por ende, cumplan con su objetivo particular a largo plazo de contribuir al desplazamiento global del petróleo. Una revisión de los distintos marcos de referencia disponibles y una propuesta esquemática de dicho marco de referencia se encuentra en (Sacramento Rivero y col., 2009).

5 Análisis FODA del desarrollo de biorrefinerías en México

Para responder a la pregunta inicial de que si México se encuentra a la altura para implementar biorrefinerías como bloques básicos de la industria, se realizó un análisis Fortalezas-Oportunidades-Debilidades-Amenazas ("FODA"), basándose en la información previamente recabada durante la búsqueda bibliográfica y discutida en las secciones anteriores. El análisis se resume en la Tabla 3 y se extiende enseguida.

Fortalezas

- 1) En México, el 32.4% del Gasto Nacional para Investigación y Desarrollo es ejercido por Instituciones de Educación Superior ("IES"). En relación con los demás países de la OCDE, sólo Canadá tiene una cifra superior (35.5%), mientras que el promedio es de 19% (CONACYT, 2008). Esta cifra denota una mayor inversión en la formación en I+D+I de los profesionales en el seno de las IES. Esto es conveniente para el desarrollo de las biorrefinerías pues mucho del trabajo por hacer es investigación básica y aplicada a escala de laboratorio.

Tabla 3. Análisis FODA para el desarrollo de biorrefinerías en México.

Debilidades	Fortalezas
No se cuenta con una estrategia nacional que contemple el desarrollo de BR, y las existentes para biocombustibles no son del todo útiles para dicho desarrollo.	Un alto porcentaje del gasto nacional de I+D es ejercido por IES, en relación con los países de la OCDE.
La inversión federal en ciencia y tecnología ha ido disminuyendo en los últimos 10 años y es menor que lo establecido en la correspondiente Ley.	Buen nivel de producción individual de investigadores mexicanos y de buena calidad.
Pobre vinculación academia-industria, principalmente por barreras culturales y jurídicas en ambas partes.	Experiencia en planeación y estudios de factibilidad que incorporan criterios de sostenibilidad
Pocas industrias nacionales con tamaño crítico para liderar el desarrollo de grandes infraestructuras productivas.	Se han iniciado proyectos masivos de producción de biocombustibles de segunda y tercera generación (base para BR) con inversión pública y privada.
Altos índices de corrupción.	Disponibilidad de un marco regulatorio para el uso y explotación de biocombustibles.
El gasto nacional en CyT ha ido disminuyendo en los últimos 10 años.	Gran biodiversidad y disponibilidad de biomasa distribuida a lo largo del país.
	Importante capacidad instalada para generación de electricidad a partir de biomasa en relación a las metas a 2012.
Amenazas	Oportunidades
Atrasarse en el desarrollo de BR e iniciar una dependencia en Estados Unidos similar a la que existe en materia de refinación de petróleo.	Se tienen las experiencias de otros países para aprender de sus errores y éxitos al incursionar en la industria de los biocombustibles y químicos renovables.
Volubilidad de las directivas, estrategias y fondos de apoyo con los cambios en las administraciones federal y estatal.	Capacidad instalada con excesos en ingenios azucareros que pueden utilizarse como instalaciones de prueba de las primeras BR.
Posible opinión pública negativa ante las BR por falta de información y campañas de desprestigio.	Se tiene la infraestructura para realizar la investigación aplicada que requiere el desarrollo de BR.
La sobreutilización de subsidios nacionales e internacionales para posicionar a las BR.	El procesamiento de biomasa se hará más rentable, debido al avance de la tecnología y el aumento en el precio del petróleo.

2) El número de investigadores en el país en 2006 era de 0.8 por cada 1000 habitantes, muy por debajo de la media de 5.48 en naciones de la OCDE (Academia Mexicana de Ciencias, 2009). A pesar de esto, el número de artículos científicos publicados anualmente a 2007 es de 6,991, considerablemente mayor a todos los países

latinoamericanos, exceptuando a Brasil (17,627). La misma tendencia se observa en el promedio de número de citas a cinco años (2003-2007). Finalmente, comparando el factor de impacto de dichas publicaciones en el mismo período se observa que el de México supera ligeramente al de Brasil (3.16 contra 3.12) (Academia Mexicana de Ciencias,

- 2009). Esto denota que a pesar de contar con menos investigadores, la producción individual en México es mucho mayor que en el resto de los países latinoamericanos y de buena calidad.
- 3) Se tiene experiencia en la realización de proyectos de factibilidad económica que incorporen criterios de sostenibilidad (Red Mexicana de Bioenergía, 2010), de manera que existe la base científica para planear adecuadamente la aplicación de proyectos de biorrefinería.
 - 4) La industria de biocombustibles será la que detone la implementación de biorrefinerías. México ya ha comenzado con proyectos de implementación de biocombustibles de segunda y tercera generación, con la instalación de plantas piloto únicas en su tipo de bioetanol microalgal (BioFields, 2009) y la siembra de cultivos no alimentarios para la producción de biodiesel (jatrofa, higuera, caña y sorgo) (México SAGARPA, 2009). Estos proyectos cuentan con fuertes inversiones del sector privado.
 - 5) En este mismo sentido, se puede aprovechar el marco legal sobre biocombustibles y los consecuentes apoyos financieros para proponer esquemas de producción en donde se tengan co-productos de alto valor agregado que hagan rentable dichas aplicaciones. De esta manera se comienza a desarrollar el concepto de biorrefinería integrada de una manera indirecta.
 - 6) En 2006 el 8% del consumo de energía primaria en México provenía de biomasa, principalmente del bagazo de caña (necesidades energéticas de la industria cañera) y de leña (coccción de alimentos). En ese mismo año, el potencial técnico de la bioenergía en México se estimó alrededor de 3,200 PJ/año, es decir, 10 veces mayor. Este estimado se compone de 40% de madera, 26% de agro-combustibles y 0.6% de subproductos municipales. El resto provendría de residuos agrícolas, forestales y los residuos sólidos municipales de las 10 principales ciudades del país (México SENER, 2006).
 - 7) La diversidad biológica de México representa alrededor de 10% de las plantas y animales del planeta. Es el país más rico en especies de reptiles, el segundo en mamíferos y el cuarto en anfibios y plantas. Esta diversidad se debe a la topografía, los diferentes climas y una compleja historia geológica, biológica y cultural. Sólo 12 países en el mundo son considerados ricos por su riqueza biológica, los cuales albergan entre el 60 y 70% de la riqueza natural de todo el mundo (Herrera Estrella, 2007). Esto sugiere que México puede desarrollar una importante industria de agroenergía y biocombustibles, y contribuir a disminuir la pobreza en zonas donde los costos de los combustibles fósiles los hacen inalcanzables (Seixas, 2007).
 - 8) La meta propuesta en la LAFRE de lograr una participación de 8% de las ER en la generación de electricidad, es viable (las metas internacionales están sobre el 10%, con 12% para la Unión Europea, y casos particulares como el de Brasil y Canadá, tienen ya una participación mayor al 25%) dado que los recursos energéticos renovables son muy abundantes. No obstante se deberán impulsar más acciones para su promoción, y se deberán consolidar las metodologías para valorar las ventajas económicas, ambientales y sociales de las energías renovables que las hagan competitivas frente a las fuentes convencionales, con miras a disminuir paulatinamente la dependencia de su fomento al uso de incentivos económicos.

Debilidades

- 1) Tanto Estados Unidos como la Unión Europea, así como Canadá y Japón, llevan ventaja en el desarrollo de biorrefinerías. Aunque tecnológicamente la biorrefinería integrada está en sus inicios en todo el mundo, la ventaja de estos países radica en que consideran, en menor o mayor medida, el desarrollo de biorrefinerías como una estrategia nacional a 20 años. Esto los lleva a coordinar mejor los esfuerzos de I+D+I, aprovechando mejor los recursos e incrementando las probabilidades de cubrir las prioridades nacionales. En México esto aún no está en planes de ser contemplado.

- 2) La inversión en ciencia y tecnología en México ha ido disminuyendo históricamente desde 1998 (0.46% del PIB). En 2007 se registró una inversión del 0.36% (CONACYT, 2008), siendo que la Ley de Ciencia y Tecnología establece el deber del Estado de destinar el 1% del PIB para este rubro (Academia Mexicana de Ciencias, 2009).
- 3) La vinculación academia-industria es una necesidad real que cobra mucha importancia en el desarrollo de biorrefinerías, especialmente durante las etapas de instalaciones de demostración piloto. Tradicionalmente existen muchas barreras en ambas partes, tanto jurídicas como de actitud, que dificultan las vinculaciones exitosas.
- 4) Las IES difícilmente generan productos tecnológicos finales. Globalmente éstos se concentran como productos de empresas con base tecnológica, las cuales a su vez son en su mayoría generadas de las IES (*spin-offs*). Este mecanismo es en México, al igual que en la gran mayoría de países en desarrollo, prácticamente inexistente.
- 5) Pocas industrias nacionales con tamaño crítico para liderar el desarrollo de grandes infraestructuras productivas.
- 6) Ciertamente en México existen altos índices de corrupción que pudieran interferir en el aprovechamiento óptimo de los recursos nacionales e internacionales que se captan para el desarrollo de biorrefinerías a nivel comercial, y también perjudicar en realizar el beneficio social local que estas instalaciones deben lograr.

Oportunidades

- 1) Una gran ventaja que tiene México con respecto a otros países en que ya se ha incursionado en la producción de biocombustibles y bioprocesos, es que puede aprender de las experiencias, tanto positivas como negativas, y no cometer los mismos errores. Además, la producción de biocombustibles puede ayudar a arraigar a la gente al campo, evitando su migración hacia las grandes ciudades y a Estados

Unidos. Por ejemplo, México podría tomar las experiencias de Brasil para desarrollar biocombustibles, pues dispone de la mayoría de las ventajas competitivas que ahí se han sabido explotar (Blanco-Rosete y Webb, 2008), a saber: clima, biodiversidad y disponibilidad de tierra y de mano de obra.

- 2) Las biorrefinerías se construyen en instalaciones ya existentes. De esta manera, la curva de aprendizaje en el desarrollo de estos procesos es menos costosa (Karbowski, 2009). Esto ya se ha contemplado por las iniciativas gubernamentales, específicamente para implementar en los ingenios azucareros (México SAGARPA, 2010b). México produce excedentes de caña de azúcar, lo que es causa de frecuentes desajustes en el precio, que afecta a los más de 3 millones de habitantes que dependen directamente de esta industria (Aroche Herrera, 2004). De las pocas tecnologías que actualmente se han probado en escala comercial relacionadas con biorrefinerías se tiene la producción de químicos de alto valor agregado (como ácido poliláctico) a partir de bagazo de caña (AllBusiness, 2010). Brasil es el ejemplo mundial de explotación de caña de azúcar para producción de etanol. México está ante la oportunidad de aprovechar sus excedentes de caña de azúcar utilizando las tecnologías existentes como un punto de partida para el desarrollo de biorrefinerías.
- 3) Las tecnologías de producción de bioetanol y biodiesel son muy conocidas. La mayor necesidad en su desarrollo industrial es su optimización. Para este tipo de investigación no se requiere necesariamente altas tecnologías, sino pruebas de concepto y ensayos a nivel piloto, estudiando el desempeño a diferentes condiciones de operación. Esto es propicio para un ámbito de investigación como el mayoritario en México, en el que el acceso a altas tecnologías es limitado.
- 4) El precio del petróleo en los años por venir seguirá incrementándose gradualmente, y la investigación aplicada en las tecnologías de procesamiento de biomasa seguirán evolucionando, lo que hará que estas últimas

sean cada vez más rentables.

Amenazas

- 1) Si el atraso en México para regular el ámbito de los químicos renovables se da en un nivel equivalente al que se tiene en materia de refinación de petróleo, nos llevará a un estado similar de dependencia tecnológica y sus conocidas implicaciones socio-económicas.
- 2) En México como en la mayoría de los países latinoamericanos, las políticas de Estado están sujetas a cambios drásticos con cada administración presidencial. Aunque la visión estratégica que necesita la biorrefinería para despuntar pudiera presentarse en el cambio de administración de 2012, también es posible que éstas se vean ignoradas y las medidas tomadas durante el último sexenio no se continúen.
- 3) Existe una controversia acerca de la conveniencia de usar biocombustibles y supuestas incidencias negativas de su producción masiva, que pudieran poner en contra la opinión pública ante empresas de este tipo. Estas alegaciones son parcialmente ciertas dependiendo de las tecnologías y las materias primas utilizadas, pero en gran parte son mitos propiciados por campañas de desprestigio (Asociación de Productores de Energías Renovables, 2007, Abengoa Bioenergía, 2010).
- 4) Los químicos renovables producidos en las biorrefinerías pudieran no encontrar mercados suficientemente grandes para colocarse en el corto plazo, debido a su naturaleza novedosa y distinta de sus contrapartes provenientes del petróleo.
- 5) El desarrollo de biorrefinerías podría apoyarse demasiado en mecanismos de subsidio nacionales e internacionales (incluyendo el MDL). Esto puede ser negativo pues los resultantes precios bajos pueden detonar una demanda ficticia o causar dificultad en el posicionamiento del producto por percibirse éste como de mala calidad (Karbowski, 2009).

5.1 Mitigación de riesgos

Haciendo un análisis de la matriz FODA (Tabla 3) se pueden trazar estrategias preliminares respondiendo a las debilidades y amenazas con las fortalezas y oportunidades identificadas. Este ejercicio se resume a continuación:

- a) La ausencia de una estrategia nacional que establezca las BR como un área prioritaria es clave para que se organicen e incrementen los esfuerzos de I+D+I en esa dirección. Dicha estrategia inevitablemente será elaborada en un futuro. En el transcurso se necesita apoyarse en el marco regulatorio de biocombustibles para proponer BR basadas en la producción de biocombustibles de segunda y tercera generación. Para esto se necesita el compromiso de los investigadores y científicos nacionales para desarrollar la biotecnología industrial (o “biotecnología blanca”) y procesos de transformación termoquímica a la par (Herrera Estrella, 2007). Este compromiso también debe trascender a los cambios de administración y los posibles cambios de dirección originados por situaciones partidistas.

También, aunque México no cuente con una estrategia nacional, el CONACyT abre una convocatoria anual de apoyo a las entidades federativas para la realización de “Proyectos estratégicos” (CONACYT, 2010a) en Ciencia, tecnología y desarrollo tecnológico. Esta es una oportunidad para los estados de tomar control y desarrollar por su cuenta y en colaboración entre ellos la industria local de químicos renovables.

- b) La pobre inversión federal en ciencia y tecnología debe ser respaldada ofreciendo beneficios fiscales a las empresas interesadas en incursionar en las BR y con la apertura de mecanismos de inversión privada. Dichos incentivos deben extenderse a los mercados que consuman los productos producidos en BR (Herrera Estrella, 2007). Mientras tanto existen subsidios internacionales que pudieran ser aprovechados correctamente como apoyo financiero para la implementación de plantas, apoyo a ferias de demostración, etc.

Asimismo, la LAFRE tiene como uno de sus instrumentos más poderosos, la creación de un Fideicomiso que otorgaría incentivos temporales a proyectos que generen, mediante fuentes renovables, electricidad para el servicio público. Igualmente es necesario establecer incentivos económicos así como mecanismos financieros que permitan a las energías renovables ser competitivas frente a las fuentes convencionales, dado que la planeación energética está basada en la evaluación tecnológica de generación de menor costo económico al corto plazo.

- c) La vinculación universidad-industria ha sido recientemente incentivada a través de fondos públicos de apoyo (CONACYT, 2008). Estas acciones deben continuarse y extenderse al campo de las BR. Los países desarrollados han atendido a esta necesidad a través de la creación de fideicomisos con base universitaria que se hacen cargo de la implementación de proyectos de investigación y adaptando sus marcos jurídicos para ofrecer servicios de consultoría especializada como un mecanismo de captación de recursos. Esto habilitará a las IES que hacen investigación para la prestación de servicios y consultoría a industrias, de manera que puedan elaborarse convenios de forma inmediata y que se posibilite la planeación de investigación hecha a la medida. Esto último con el fin de que las IES puedan responder en los tiempos que la industria requiere.

Finalmente, se deben promover cambios en el marco jurídico (Ley Federal de Trabajo y de responsabilidades de funcionarios públicos), que permitan y promuevan la participación de investigadores de instituciones públicas en la creación de empresas (Herrera Estrella, 2007).

- d) De proponerse los mencionados beneficios fiscales las pocas empresas con el capital suficiente para invertir en proyectos piloto podrían interesarse e incorporar la poderosa base científica que se ha identificado en México. Aún cuando Estados Unidos y Europa están avanzados en el desarrollo de procesos de

fermentación y de transformación físico-química respectivamente, ambos frentes han señalado que su principal reto está en incrementar la inversión en el desarrollo de tecnologías que componen las biorrefinerías (Blanco-Rosete y Webb, 2008). El pronto establecimiento de políticas fiscales que motiven la inversión diferenciada en México podría acortar la brecha tecnológica que nos separa de estas potencias.

- e) Las mayores probabilidades de atraso en el desarrollo de BR residen en la falta de participación científico-tecnológica. La base de investigación descrita en el análisis FODA, junto con la gran cantidad de recursos naturales del país, la disponibilidad de capacidad instalada en ingenios azucareros e instalaciones de generación de electricidad a partir de biomasa presentan una buena infraestructura para desarrollar la tecnología necesaria para construir BR en el mediano plazo.

De igual importancia es crear zonas con infraestructura y recursos humanos suficientes para poder ser competitivos a nivel internacional, capaces de atraer el establecimiento de empresas biotecnológicas establecidas y participar en la creación de nuevas empresas (Herrera Estrella, 2007). Un primer intento en esta dirección se ha dado en el estado de Yucatán con la formación del Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico que se materializa en el Parque Científico y Tecnológico de Yucatán donde se instalarán IES, centros de investigación y empresas para formar un polo de inversión en la materia (CONACYT, 2010b).

- f) El trabajo en instalaciones piloto ya existentes y subsecuentes demostraciones, así como la comunicación de los resultados de la investigación aplicada al público y legisladores ayudarán a mitigar los miedos y preocupaciones originados por controversias relativas a las nuevas tecnologías. Estos resultados deben incluir las conclusiones de los análisis de sostenibilidad de las BR, de los que ya se cuentan algunos para biodiesel y bioetanol (Red Mexicana de Bioenergía, 2010).

Conclusiones

El desarrollo de una industria nacional de biocombustibles ha dejado de ser opcional y se ha convertido en una necesidad. En México ya se cuenta con la legislación para regular las acciones dirigidas hacia ese objetivo. Sin embargo estas leyes son de reciente creación y se centran casi exclusivamente en los biocombustibles de segunda generación. Es generalmente aceptado que la producción de biocombustibles en sí mismos no es redituable y en muchos casos, no es sostenible. Para lograr su factibilidad económica es necesario acoplar los procesos de producción de biocombustibles con otros de bioproductos de alto valor agregado, en el marco de la biorrefinería. Las opciones de proceso son tan amplias, que es necesario tener una estrategia nacional que establezca las prioridades en la cartera de químicos de plataforma que deben producirse en dichas biorrefinerías, de manera que se facilite la creación de mercados locales. Estrategias de este tipo ya han sido aplicadas en Estados Unidos, la Unión Europea, Canadá y Japón y se han planteado con horizontes de al menos 10 años.

En este trabajo se identificaron como barreras principales para el desarrollo de las biorrefinerías industriales y sobre las que se debe enfocar los esfuerzos de I+D+I las siguientes:

- a) Aumentar la eficiencia de las tecnologías de fraccionamiento de residuos lignocelulósicos mediante procesos biotecnológicos y termoquímicos.
- b) Optimizar los procesos de transformación de residuos municipales, agrícolas y ganaderos en energía, electricidad y productos químicos.
- c) Reducir el consumo de agua de riego y de proceso mediante innovaciones en la cosecha, en el procesamiento de materias primas forestales y cosechas integrales, en el consumo en plantas de energía así como en el tratamiento de agua residual y la integración de procesos.
- d) Explorar el potencial de biomasa en las diferentes localidades de México para producir no sólo biocombustibles sino químicos de plataforma.
- e) Desarrollar procesos de biorrefinería que se soporten en la producción comercial de biocombustibles de segunda generación, es decir, aquellos que no provienen de cultivos relacionados directa o indirectamente con la alimentación humana, como por ejemplo bioetanol lignocelulósico o biodiesel de *jatropha curcas*.
- f) Desarrollar la producción comercial de biocombustibles y bioquímicos de tercera generación, es decir, los que provienen de organismos mejorados genéticamente para aumentar la producción de metabolitos de interés, como por ejemplo la biorrefinería de microalgas.
- g) Aumentar la producción de sustancias con valor agregado (como celulosa, almidón, azúcares, aceites) a partir de biomasa.
- h) Promover la construcción de biorrefinerías en escala piloto y de zonas con infraestructura y recursos humanos de competitividad internacional para atraer el establecimiento de empresas biotecnológicas establecidas y participar en la creación de otras nuevas.
- i) Elaborar procedimientos sistemáticos para el desarrollo de nuevas síntesis químicas y tecnologías que cumplan con los principios de sostenibilidad (química verde).
- j) Proponer y validar metodologías para el diseño sostenible de biorrefinerías y procesos de producción de biocombustibles.
- k) Crear estímulos fiscales para la introducción del uso combinado de transformaciones químicas y biotecnológicas con un enfoque en la sostenibilidad de los procesos.
- l) Comprometer a los profesionales de la química, biotecnología e ingeniería con el concepto de bio-productos y biorrefinerías.
- m) Estructurar un marco jurídico que permita y promueva la participación de investigadores de instituciones públicas en la creación de empresas.

En México se ha iniciado el trabajo en algunos de estos aspectos, incluso siendo pioneros en el establecimiento comercial de instalaciones de

producción de bioetanol de tercera generación. En el análisis FODA se determinó que se posee la capacidad y calidad científica para superar estos retos, aunque los principales problemas son la falta de metas y una estrategia nacional que le dé prioridad al desarrollo de biorrefinerías y la disminución anual de presupuesto para I+D en ciencia y tecnología.

Sin embargo se identificó la posibilidad de que las entidades federativas tomen la iniciativa de plantear estas prioridades a través del apoyo económico parcial de los Proyectos Estratégicos de los Fondos Mixtos de CONACyT y sus propios Planes Estratégicos que se alineen con las iniciativas de producción de biocombustibles. Dichos planes estratégicos deberán buscar la integración de IES, centros de investigación y empresas, permitir la inversión privada y otorgar estímulos fiscales para fomentar el trabajo en el desarrollo de biorrefinerías. Esto aunado con el compromiso de la comunidad científica podría jugar un papel muy importante para que México se posicione como potencia en el desarrollo de biorrefinerías.

Referencias

- Abengoa Bioenergía (2010). *Proyectos actuales*. Disponible en: <http://www.abengoabioenergy.com>. Accesado: 24 marzo 2010.
- Academia Mexicana de Ciencias (2009). *México no puede regatear más recursos para la ciencia*. Disponible en: <http://www.amc.unam.mx>. Accesado: 12 febrero 2009.
- Ajila, V.H. y Chilibingua, B. (2007). *Análisis de Legislación sobre Biocombustibles en América Latina*. Olade.
- AllBusiness (2010). *Cargill Dow PLA plant starts up. (In Brief)*. Disponible en: <http://www.allbusiness.com/manufacturing/plastics-rubber-products-manufacturing/171507-1.html>. Accesado: 09 abril 2010.
- Allen, D.T. y Shonnard, D.R. (2002). *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*. Prentice Hall PTR, Nueva Jersey.
- Annevelink, B. (2008). *BIOPOL*. 12 febrero. Bruselas: BioreFuture 2008.
- Aroche Herrera, D. (2004). *Problemática y Crisis de la Industria Azucarera Mexicana en el Marco del Tratado de Libre Comercio de América del Norte*. Tesis de Licenciatura en relaciones Internacionales, Universidad de las Américas Puebla, Puebla.
- Asociación de Productores de Energías Renovables (2007). *Biocarburantes y Desarrollo Sostenible: Mitos y Realidades*. Disponible en: http://www.appa.es/descargas/Doc_BIOCARBURANTES_1309.pdf. Accesado: 01 marzo 2009.
- Baier, U. y Grass, S. (2001). *Bioraffination of grass*. Antwerpen: Anaerobic Digestion 2001 - 9th World Congress for Anaerobic Conversion for Sustainability.
- BFS (2010). *Energía del futuro*. Disponible en: www.biopetroleo.com. Accesado: 13 marzo 2010.
- BioFields (2009). *Energía renovable y Sustentable*. Disponible en: <http://www.biofields.com/>. Accesado: 13 enero 2009.
- Biorefinery Euroview (2009). *Biorefinery Euroview website*. Disponible en: <http://www.biorefinery-euroview.eu/biorefinery/public/index.html>. Accesado: 19 noviembre 2009.
- Blanco-Rosete, S. y Webb, C. (2008). Emerging biorefinery markets: global context and prospects for Latin America. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2, 331-342.
- Canadian Biomass Innovation Network (2010). *Canadian Biomass Innovation Network*. Disponible en: <http://www.cbin-rcib.gc.ca>. Accesado: 10 abril 2010.
- Cherubini, F. y Jungmeier, G. (2010). LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *International Journal of Life Cycle Assessment* 15, 53-66.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25, 294-306.

- Comisión Europea (2006). *European Conference on biorefinery Research*. Disponible en: http://ec.europa.eu/research/energy/gp/gp_events/biorefinery/article_3764_en.htm. Accesado: 27 noviembre 2009.
- CONACYT (2008). *Indicadores científicos y tecnológicos*. Disponible en: <http://www.siiicyt.gob.mx/siiicyt/cms/paginas/IndCientifTec.jsp>. Accesado: 12 febrero 2009.
- CONACYT (2010a). *Fondos Mixtos constituidos*. Disponible en: http://www.conacyt.mx/Fondos/Mixtos/Convocatoria_FondosMixtos.html. Accesado: 13 abril 2010.
- CONACYT (2010b). *Instalan en Yucatán el Sistema de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico (SIIDETEX)*. Disponible en: <http://www.conacyt.mx/comunicacion/comunicados/14-08.html>. Accesado: 13 abril 2010.
- Congreso Latinoamericano de Bio-refinerías (2009). *II Congreso Latinoamericano de Bio-refinerías, materiales y energía*. Disponible en: <http://www.biorefinerias.cl/introduccion.html>. Accesado: 26 febrero 2010.
- Davenport, R. (2008). Chemicals & polymers from biomass. *Industrial Biotechnology* 4, 59-63.
- Diario de León (2008). *Inversión de 10,5 millones en un proyecto de biomasa en Soria que creará 50 empleos directos*. Disponible en: http://www.portalforestal.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1889&Itemid=34. Accesado: 05 marzo 2010.
- EUA NREL (2008). *What is a Bio-refinery?* Disponible en: <http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>. Accesado: 02 diciembre 2008.
- FEDIT (2007). *Industria química basada en biomasa: Implicaciones tecnológicas*. Fundación LEIA.
- Frost, Sullivan (2010). *Cargill-Cerestar*. Disponible en: <http://www.frost.com/prod/servlet/meawards-hall-of-fame-feature.pag?mode=open&sid=56104055>. Accesado: 09 abril 2010.
- GCE Bioenergy (2010). *La biorrefinería multifuncional*. Disponible en: <http://www.gcebioenergy.com/>. Accesado: 05 marzo 2010.
- Gil Horán, R.H. (2007). *Diseño de proceso de separación y purificación de ácido láctico producido por fermentación de residuos de cáscara de naranja*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida.
- Gobierno del Estado de Nuevo León (2010). *Bioenergía de Nuevo León, S. A. de C. V.* Disponible en: http://www.nl.gob.mx/pics/pages/simepro_de_bioenergia_base/Benlesa.pdf. Accesado: 04 marzo 2010.
- Goh, C.S. y Lee, K.T. (2010). A visionary and conceptual macroalgae-based third-generation bioethanol (TGB) biorefinery in Sabah, Malaysia as an underlay for renewable and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2), 842-848.
- Gutierrez Alcalá, R.A. (2008, septiembre). *Mejoran producción de biocombustibles*. El Universal.
- Hale, W.J. (1934). *The Farm Chemurgic: Farmward the Star of Destiny Lights Our Way*. The Stratford company, California, USA.
- Hamelinck, G.V. y Faaij, A.P. (2005). Ethanol from lignocellulosic biomass: technological performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy* 28(4), 384-410.
- Herrera Estrella, L. (2007). *La transferencia de tecnología y la competitividad*. Disponible en: <http://segob.guanajuato.gob.mx/sil/docs/eventos/2doSem/La%20Transferencia%20de%20Tecnologia%20y%20su%20Impacto%20en%20la%20Competitividad.pdf>. Accesado: 28 noviembre 2008.

- Jenkins, T. (2008). Toward a biobased economy: examples from the UK. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2, 133-143.
- Jiménez, R. (2008). *Lanzan proyecto de bio-refinería*. Disponible en: <http://www.remexen.org/index.php/Biocombustibles/Lanzan-proyecto-de-bio-refineria.html>. Accesado: 05 marzo 2010.
- Kamm, B. (2008). *Definition and technical status of biorefineries*. 14/02/2008. Bruselas: BioreFuture 2008.
- Kamm, B., Gruber, P.R. y Kamm, M. (eds.) (2006a). *Biorefineries - Industrial Processes and Products*. Wiley-VCH.
- Kamm, B., Kamm, M., Gruber, P.R. y Kromus, S. (2006b). Biorefinery Systems - An Overview. En: *Biorefineries - Industrial Processes and Products*, (B. Kamm, P.R. Gruber y M. Kamm, eds.), Pp. 3-40. Wiley-VCH.
- Karbowski, A. (2009). *Impacts of Biorefineries on rural & regional development, employment and environment*. BioreFuture 2009. Polonia.
- KCL (2009). *2nd Nordic Wood Biorefinery Conference NWBC*. Disponible en: http://ec.europa.eu/research/energy/gp/gp-events/biorefinery/article_3764_en.htm. Accesado: 27 noviembre 2009.
- King, J.W. (2008). Oleochemical Biorefinery within the Context of Sustainable Biorefining. I *Seminario de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán*, Facultad de Ingeniería Química.
- México (2009). *Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos*. En SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT y SHCP (eds.).
- México INIFAP (2008). *Conferencia y convenio de investigación en biocombustibles*. Disponible en: http://www.inifap.gob.mx/quienes_somos/noticias/Nota%20Convenio_INIFAP_E-MISION_BIOCOMBUSTIBLES_final.pdf. Accesado: 05 marzo 2010.
- México SAGARPA (2009). *Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico*. En G. Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, (ed.).
- México SAGARPA (2010a). *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar*. Disponible en: <http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/agroindustriaazucarera/content/eventos/seminario/docs/presentacion6.pdf>. Accesado: 04 marzo 2010.
- México SAGARPA (2010b). *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar*. Disponible en: <http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/agroindustriaazucarera/content/eventos/seminario/docs/presentacion6.pdf>. Accesado: 04/03 2010.
- México SENER (2006). *Energías Renovables Para el Desarrollo Sustentable en México*. En Secretaría de Energía (ed.).
- Moreira, J.R. y Goldemberg, J. (1999). The alcohol program. *Energy Policy* 27, 229.
- National Biodiesel Production & Use Program (2004). *Biodiesel the New Fuel from Brazil*. Disponible en: http://www.biodiesel.gov.br/docs/cartilha_ingles.pdf. Accesado: 26 febrero 2010.
- ONU (1987). *Our Common Future. En World Commission on Environment and Development* (ed.), UN Documents Cooperation Circles.
- ONU (2009a). *COP-15 Copenhagen*. Disponible en: <http://en.cop15.dk/>. Accesado: 24 noviembre 2009.
- ONU (2009b). *Kyoto protocol*. Disponible en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Accesado: 24 noviembre 2009.
- Pérez, A.A. (2005). *Eco-eficiencia y SEEBalance: El método BASF*. 14-15 Abril. III Jornadas Benchmarking en Responsabilidad Corporativa.

- Reca, A. (2007). *¿Debe apostar México a la bioeconomía?* Disponible en: http://www.foroglobalagroalimentario.org.mx/ponencias/2007/panel_6/Alejandro_Reca.esp.pdf.
- Red Mexicana de Bioenergía (2010). *Proyectos Rembio*. Disponible en: <http://www.rembio.org.mx/ProyectosRembio>. Accesado: 10 abril 2010.
- Roig-Franzia, M. (2007). *A Culinary and Cultural Staple in Crisis*. Washington Post. Washington.
- RRB (2009). *International Conference on Renewable Resources and Biorefineries*. Disponible en: http://ec.europa.eu/research/energy/gp/gp_events/biorefinery/article_3764_en.htm. Accesado: 27 noviembre 2009.
- Sacramento Rivero, J.C., Romero Baquedano, G. y Blanco Rosete, S.R. (2009). Criterios de selección de indicadores de sostenibilidad: el caso de las biorrefinerías. 19-22 Mayo. Mazatlán: *XXX Encuentro Nacional AMIDIQ 2009*.
- Seixas, M.A. (2007). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: i. etanol. Redesma*. San José, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- SusChem (2005). *Innovating for a Better Future: Sustainable Chemistry Strategic Research Agenda 2005*. Londres, European Technology Platform for Sustainable Chemistry.
- Sustainable Chemistry 07 (2007). *Sustainable Chemistry 07, Questions and Discussions*. Disponible en: http://www.sustainablechemistry2007.de/konf_06/dokumente.htm. Accesado: 11 febrero 2009.
- Universidad Arturo Prat (2005). *Optimización y desarrollo tecnológico de un sistema productivo para el cultivo masivo de microalgas, orientado a la obtención de productos de alto valor comercial, en el norte de Chile*. Universidad Arturo Prat.
- Venus, J. y Richter, K. (2007) Development of a pilot plant facility for the conversion of renewables in biotechnological processes. *Engineering in Life Sciences* 7(4), 395-402.
- Wellisch, M. (2008). Taking a Strategic Approach to Sustainable Biorefinery Design Rotterdam, *The Netherlands: 4th International Conference on Renewable Resources & Biorefineries*.
- Werpy, T. y Petersen, G. (2004). Top Value Added Chemicals From Biomass Volume I: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. US Department of Energy, Office of Biomass Program.