

# Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes

## Second generation biofuels and biodiesel: A brief review of the Universidad de los Andes contribution

Recibido 11 de noviembre de 2008, aprobado 20 de noviembre de 2008, modificado 27 de noviembre de 2008.

### **Andrés Fernando González**

Ph.D. Profesor asistente, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

andgonza@uniandes.edu.co ✉

### **Isabel Cristina Jiménez**

M.Sc. Profesora instructora, Investigadora del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

is-jimen@uniandes.edu.co ✉

### **Manuel Rodríguez Susa**

Ph.D. Profesor asistente, Co-director del Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

manuel-r@uniandes.edu.co ✉

### **Silvia Restrepo**

Ph.D. Profesora asistente, Investigadora del Laboratorio de Micología y Fitopatología (LAMFU), Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

restrep@uniandes.edu.co ✉

### **Jorge Mario Gómez**

Ph.D. Profesor asistente, Director del Departamento de Ingeniería Química, Investigador del Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP), Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

jorgomez@uniandes.edu.co ✉

**PALABRAS CLAVES**

Biodiesel, etanol, hidrógeno, pirolisis, sacarificación.

**RESUMEN**

Los biocombustibles constituyen una alternativa importante para la demanda actual energética a nivel nacional y mundial. Este artículo trata de resumir los aportes en el desarrollo de tecnologías que ha hecho la Universidad de los Andes en los últimos años relacionados con su producción. Dichos esfuerzos se han dirigido en gran parte en el uso de subproductos como por ejemplo la tusa de la palma de aceite o residuos domiciliarios en la producción de etanol, obtención de hidrógeno y combustibles líquidos a partir de digestión anaerobia y pirolisis respectivamente; y la producción de biodiesel a partir de la esterificación de ácidos grasos. En general, las limitaciones para el desarrollo de cada una de estas tecnologías radican en la obtención de adecuados catalizadores, ya sea biológicos o químicos, la determinación de condiciones óptimas de reacción (temperatura, presión y sistemas reactivos) tomando en cuenta las eficiencias, la selectividad y la selección de materias primas que le den viabilidad económica a la tecnología.

**KEY WORDS**

Biodiesel, ethanol, hydrogen, pyrolysis, saccharification.

**ABSTRACT**

Biofuels constitute an important alternative for the current national and worldwide energy demand. The main goal of this paper is to summarize the recent contributions of Universidad de los Andes for the development of technologies related to its production. Such efforts have been conveyed to the use of sub products like oil palm empty-fruit-bunch or domestic solid waste for ethanol production, hydrogen production and liquid fuels through anaerobic digestion and waste pyrolysis respectively, and biodiesel by fatty acids esterification. Generally, the limitations of these technologies stand on discovering adequate catalysts either from biological or chemical origin, finding optimum reaction conditions (temperature, pressure and reactive systems) accounting yield and selectivity and, finally, feedstock selection from an economical perspective.

## INTRODUCCIÓN

No es algo para refutar el hecho de que la humanidad esté enfrentando dos tendencias que confluyen para demandar una respuesta de supervivencia; en primer lugar, se encuentra la disminución de fuentes de energía y, en segundo, su creciente demanda como consecuencia de un mejoramiento de la “calidad de vida” de las llamadas economías emergentes, incluidas las de India y China. Shellenbergger y Nordhaus, activistas ambientales cuyo trabajo fue reconocido en la edición de la revista *Times* de agosto de este año, publicaron el documento con el título inherentemente controversial “The death of Environmentalism” [1] con el que hicieron un llamado a los grupos ambientalistas para dejar de observar el problema del calentamiento global como un problema de regulación, como es el caso de la Ley 693 del 2001 en Colombia, y más como una actitud y propósito serio para una revolución tecnológica a nivel de obtención de energías alternativas.

La respuesta entonces se ha derivado en diferentes propuestas que abarcan el espectro de hidroeléctricas, nuclear, biomasa, eólica, geotérmica, solar y, en el caso de combustibles líquidos, los biocombustibles [2]. El problema en la demanda de combustibles líquidos es más crítico en países cuya economía se basa en el transporte vehicular, como Estados Unidos, que reportó un parque automotor aproximado para el 2006 de 250.851.833 [3]. Adicionalmente, el uso de combustibles fósiles ha traído como consecuencia una masiva emisión de gases contaminantes, dióxido y monóxido de carbono, los cuales han sido asociados al llamado efecto invernadero [4]. Los combustibles fósiles oxigenados con etanol han jugado un rol importante dentro de la política de tecnologías limpias para la obtención de energías renovables, ya que el uso de mezclas de etanol-combustible fósil permiten una oxidación más eficiente, por lo cual se disminuye la emisión de monóxido de carbono y aromáticos a la atmósfera. Sin embargo, el etanol ha pasado de ser una alternativa para oxigenar a una opción para reemplazar los combustibles fósiles, sumado al hecho de

que algunos autores han reportado efectos ambientales negativos del uso de esta sustancia como aditivo de gasolinas [5].

A nivel mundial, países como Estados Unidos y Brasil han tomado la bandera en la producción de etanol a partir de fuentes alimenticias, tales como maíz y caña de azúcar, con 6498.6 y 5019.2 millones de galones anuales respectivamente, seguido de la Unión Europea (570.3) y China (476 millones) en el 2007 [6]. Si se disminuyendo la escala a América Latina, se puede observar unos avances significativos que no logran superar la brecha haciendo la comparación con Brasil (Tabla 1).

| País      | Millones de galones |
|-----------|---------------------|
| Brasil    | 5019.2              |
| Colombia  | 74.9                |
| Argentina | 5.2                 |
| Paraguay  | 4.7                 |

Tabla 1. Producción de etanol carburante en América latina para el año 2007 [6].

El segundo puesto de Colombia a nivel latinoamericano en la producción de etanol ha partido de la contribución del trabajo pionero de los ingenios del Cauca (Tabla 2), para dar un uso alternativo a la caña de azúcar. Esto se enmarca dentro de una política del Consejo Nacional de Política Económica y social (Conpes), la cual busca expandir los cultivos de las materias primas tomando en cuenta la sostenibilidad de los recursos y la competencia nacional e internacional [7]. Sin embargo, el uso de materias primas pertenecientes a la cadena alimenticia ha generado controversias y aseveraciones tales como la del relator especial de la alimentación para la ONU y profesor de la Universidad de Ginebra Jean Ziegler, quien afirmó que el uso de plantaciones de alimentos en combustible constituía un “crimen contra la humanidad tomando en cuenta que mil millones de personas sufren hambre en el mundo”. La complicación radica en que algunos países como Estados Unidos obligan a competir los centros de suministro de alimentos con

las estaciones de combustible, debido a que ambos demandan el maíz ya sea como producto alimenticio o como materia prima para la producción de etanol. Donald Mitchell, en su trabajo para políticas del banco mundial “A note on rising food prices” [8], afirma que la gran producción de biocombustibles en Europa y Estados Unidos ha sido la principal razón para el aumento (75 %) del precio de los alimentos a nivel mundial, aunque resalta a Brasil por su programa sostenible a partir de la caña de azúcar y su bajo efecto en el precio.

| Ingenio     | Miles de litros día |
|-------------|---------------------|
| Incauca     | 300                 |
| Providencia | 250                 |
| Manuelita   | 250                 |
| Mayagüez    | 150                 |
| Risaralda   | 100                 |

Tabla 2. Producción de etanol en el 2007 de algunos Ingenios azucareros localizados en el Valle del Cauca para el 2007 [9].

Otro tipo de acercamientos para la producción de combustibles alternativos a partir de carbohidratos está asociado a la aplicación de procesos biológicos que permiten obtener biogás. El más clásico de estos procesos es la digestión anaerobia, en la cual un grupo diverso de organismos permite transformar materia orgánica (materia prima cultivada o residuos orgánicos) en metano. Este proceso ha sido utilizado hace muchos años por culturas como la china y la hindú. Los últimos avances en esta línea de trabajo han desviado la transformación de esta materia prima hacia la producción de hidrógeno, que cuando es utilizado en un proceso para obtener energía eléctrica vía térmica, produce como subproducto agua, mientras que el metano genera dióxido de carbono.

La digestión anaerobia no es la única vía biológica para la producción de hidrógeno; en los últimos años procesos que utilizan algas han sido reportados como exitosos. Sin embargo, la gran ventaja que presenta

la digestión anaerobia como alternativa de obtención de energías alternativas (metano e hidrógeno) radica en que en este proceso puede ser utilizada una gran variedad de materias orgánicas, incluyendo residuos sólidos municipales, agrícolas y pecuarios, lo que permite simultáneamente a la obtención de energía, dar una gestión adecuada a residuos sólidos y evitar la competencia entre energía y alimentos.

Dentro de esta misma tendencia de aprovechamiento de residuos orgánicos para obtención de energía, los procesos de pirolisis y gasificación también han sido reportados como potenciales alternativas. El concepto de estos procesos se basa en el rompimiento molecular a altas temperaturas y en ausencia de oxígeno de materia orgánica, permitiendo transformar carbohidratos de alto peso molecular (generalmente sólidos) en carbohidratos e hidrocarburos de bajo peso molecular (líquidos y gases), los cuales poseen un alto poder calorífico que permite su utilización como combustibles.

Por otro lado, los avances en el diesel de origen vegetal encuentran un papel protagónico debido a los problemas de contaminación ambiental y a la sostenibilidad y precios de los productos derivados del petróleo. Considerando las anteriores razones y teniendo en cuenta su tradición agrícola y la posibilidad de expandir las zonas de cultivo, Colombia está interesada en el desarrollo de la industria de los biocombustibles y tiene como reto lograr el cumplimiento de las expectativas económicas que representa la producción de biodiesel a nivel nacional. Como consecuencia, el gobierno se ha encargado de desarrollar e implementar leyes que permitan regular los biocombustibles, adjudicándoles la importancia que se merecen como actores del futuro de la nación. Éste es el caso de la Ley 939 del 2004, la cual establece que el combustible diesel debe ser inicialmente del tipo B05, es decir, que el contenido de biodiesel en el combustible diesel debe ser del 5%.

El propósito de este artículo es resumir el aporte de la Universidad de los Andes en el desarrollo de

tecnologías para la producción de biocombustibles. Los autores guardan la intención de dar un inventario completo, sin embargo, la omisión de algún trabajo o logro importante no es intencional.

#### **PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS: EL CASO DE LA PALMA DE ACEITE**

La palma de aceite con nombre científico *Elaeis guineensis* Jacq, recibe el nombre común de palma africana debido a que su origen se encuentra en el golfo de Guinea en el África Occidental. Es una planta tropical que crece en climas cálidos por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar. Se ha demostrado que el crecimiento de las palmas jóvenes se inhibe por completo a una temperatura de 15°C y que a 25°C es siete veces más rápido el crecimiento que a 20°C [10].

#### **RESIDUOS GENERADOS EN LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE PALMA**

En el proceso para producción de aceite de palma se generan muchos residuos; los más importantes son: la tusa (o raquis), la fibra y el cuesco. La tusa corresponde a los racimos de la palma que contienen el fruto; estos son sometidos a unos rastrillos que retiran dicho fruto y se desecha el racimo vacío o tusa. La fibra se produce después de prensar el fruto de palma y extraer el aceite. Y el cuesco es la almendra que contiene la semilla del fruto de palma.

Se calcula que tomando una alimentación al proceso de extracción de 10 000 kg de racimos de fruta fresca (RFF) se producen tan sólo 2 100 kg de aceite de palma, mientras que se generan aproximadamente unos 2 200 kg de tusa, 1 925 kg de fibra y 520 kg de cuesco; es decir, se desecha cerca del 47% de los RFF alimentados al proceso [10]. Estas cifras demuestran que la cantidad de estos tres residuos es muy importante; en especial, si se compara el aceite producido con la tusa desechada, se observa que se producen 100 kg más de tusa que de aceite.

Estos tres tipos de residuos y otros más que se producen en menores cantidades tienen en común que son partes de la planta y, por lo tanto, están constituidos por los mismos componentes característicos de todos los vegetales, en especial, el material lignocelulósico.

#### **EL PROCESO DE SACARIFICACIÓN**

El Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de los Andes ha llevado a cabo estudios con miras al aprovechamiento del contenido de celulosa y hemicelulosa presentes en los residuos generados de la extracción de aceite de palma y su potencial uso para producir azúcares simples.

El primero fue un trabajo exploratorio realizado por Loboguerrero [11] en el que se caracterizó el contenido lignocelulósico de los 3 residuos principales: tusa, fibra y cuesco. En este estudio se encontró que la tusa es el residuo con mayor porcentaje de hemicelulosa y menor porcentaje de lignina, el cuesco contiene el menor porcentaje de hemicelulosa y mayor porcentaje de lignina, y, por último, la fibra contiene valores intermedios entre los otros dos residuos como se muestra en la Tabla 3. En este mismo estudio se realizó una prehidrólisis con ácido sulfúrico concentrado para los tres residuos donde se variaban el tiempo y la temperatura de hidrólisis y la concentración de ácido. Las condiciones para esta etapa fueron de 70 % p/p de concentración de ácido, 50°C y una relación de sólidos: ácido de 5:100 (Figura 1). Se encontró que la tusa y la fibra producen mayor cantidad de azúcares reductores que el cuesco, debido a su alto contenido de hemicelulosa y celulosa, y bajo contenido de lignina. Por otro lado, también se han hecho estudios de una combinación de pretratamiento con ácido diluido seguido de una hidrólisis enzimática usando las enzimas comerciales. Los dos tipos de enzimas estudiadas son comerciales y se registran bajo el nombre de Celluclast® y Viscozyme® [12]. Se probaron cargas de 0,5 y 1 ml de cada enzima por cada 5 gramos de sólidos de tusa que eran alimentados al proceso, es decir, desde el inicio del pretratamiento (Figura 2). Se encontró que la enzima Celluclast® tuvo mayores rendimientos

que la Viscozyme® en ambos casos. Para la primera enzima, el rendimiento de la producción de azúcares fermentables se estabilizó alrededor de 27% cuando se usó 1 ml de enzima, mientras que se estabilizó en 23% con 0,5ml de enzima. Para la segunda enzima se estabilizó en 9% con 1 ml de enzima y en 6% con 0,5ml de enzima.

| Residuo | %Celulosa    | %Hemicelulosa | %Lignina     | Referencia |
|---------|--------------|---------------|--------------|------------|
| Tusa    | 44.97 ± 0.44 | 19.92 ± 0.40  | 10.23 ± 0.08 | [35]       |
|         | 46.77 ± 5.39 | 17.92 ± 4.89  | 4.15 ± 0.53  | [11]       |
|         | -            | 16.47 ± 1.31  | 23.47 ± 1.80 | [10]       |
| Fibra   | 33.21 ± 0.02 | 16.58 ± 0.06  | 21.79 ± 0.01 | [35]       |
|         | -            | 11.29 ± 1.17  | 43.56 ± 5.20 | [10]       |
| Cuesco  | 30.28 ± 0.14 | 12.72 ± 0.05  | 49.58 ± 0.15 | [35]       |
|         | -            | 6.85 ± 0.94   | 57.31 ± 1.28 | [10]       |

Tabla 3. Composición en porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina de la tusa de la palma de aceite.

Estudio bioprospectivo para obtención de azúcares reductores

El Laboratorio de Micología y Fitopatología (LA-MFU) y el Grupo de Diseño de Productos y Procesos (GDPP) iniciaron un trabajo de bioprospectiva en Colombia, en el páramo de Cruz Verde, para localizar endófitos con alta capacidad de degradación de celulosa. Los endófitos fueron aislados de *Espeletia* spp., plantas específicas de páramo. Algunos aislamientos (*Cladosporium tenuissimum*, *Chaetomium globosum* 2544 y 2507) fueron evaluados posteriormente y se construyeron perfiles de concentración de azúcares reductores en el tiempo, con el fin de determinar aquéllos que tuvieran la mejor capacidad de degradación (Figura 3). Principalment, se encontró que *C. tenuissimum* presenta la mayor concentración de azúcares reductores. Este resultado es importante ya que no se conoce el primer reporte en literatura del uso de este endófito para sacarificación de celulosa [13, 14, 15]. Una caracterización inicial de las celulasas que expresa este endófito indica la presencia de endoglucanasas, ya que presenta potencial actividad contra carboximetilcelulosa y exoglucanasas (resultados no mostrados).

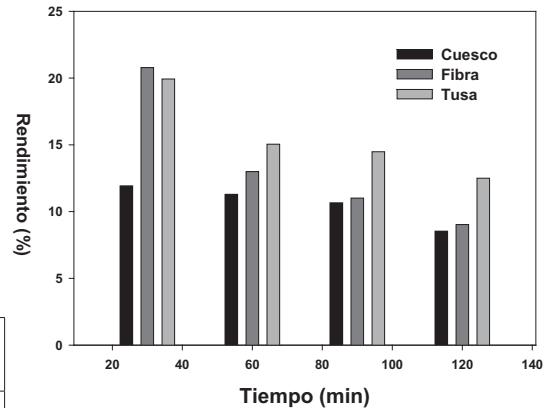


Figura 1. Rendimiento en producción de azúcares reductores para los tres tipos de residuo del proceso de producción de aceite de palma (cuesco, fibra, tusa), a partir de un proceso de hidrólisis ácido con ácido sulfúrico.

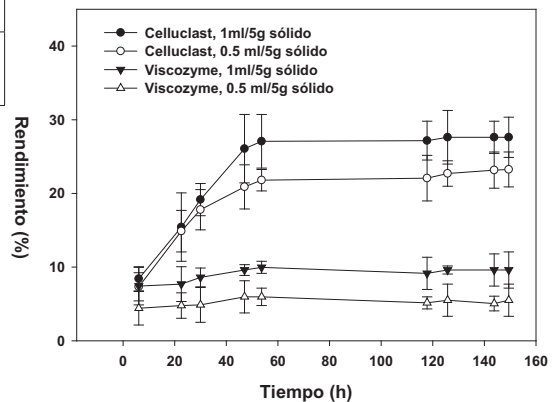


Figura 2. Rendimiento en producción de azúcares reductores para la hidrólisis enzimática de la tusa de la palma de aceite, usando dos enzimas comerciales (Celluclast® y Viscozyme®).

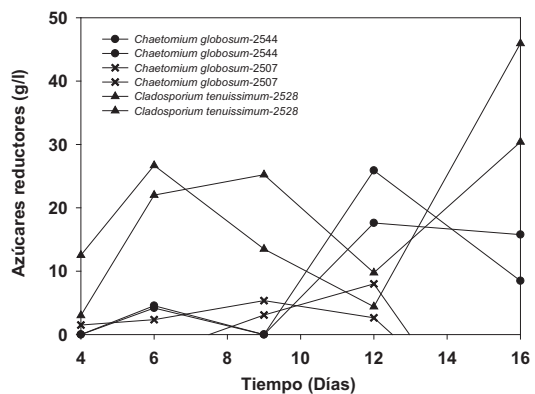


Figura 3. Perfil de azúcares reductores en el tiempo, a partir del crecimiento de *Chaetomium globosum* y *Cladosporium tenuissimum* en tusa de aceite de palma como fuente de sustrato.

Debido a la importancia de este resultado, se planea realizar en el futuro una caracterización más profunda de estas enzimas por medio de purificación, para cuantificación de peso molecular, y clonación, para caracterización cinética.

#### Sacarificación y fermentación

El proceso de sacarificación-fermentación desacoplado (SHF) y simultáneo (SSF) han sido las dos estrategias convencionales para el acoplamiento de los procesos de sacarificación y fermentación. No obstante, en ninguna de las dos se utilizan cultivos mixtos, hongo-levadura dentro del bioreactor. El uso de esta estrategia tendría varias ventajas potenciales, tales como el beneficio que implica el no tener que llevar a cabo una purificación de la enzima y también una reducción en el tiempo total de proceso. El GDPP ha iniciado algunos trabajos bajo dos condiciones: inoculación concomitante y desacoplada del hongo y la levadura [13]. Ambas condiciones muestran la presencia de etanol a concentraciones alrededor del 0.6 % (p/p), sin embargo, la concentración de etanol no se mantiene constante durante el proceso por razones que aún están siguiendo estudiadas (Figura 4).

#### OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE RESIDUOS DOMICILIARIOS

El CIIA del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental ha realizado estudios de investigación tendientes a la obtención de etanol a partir de residuos sólidos domésticos. Los tres proyectos realizados hasta la fecha han sido enfocados en el proceso de obtención de azúcares, utilizando una mezcla de pretratamiento ácido y microondas [16, 17, 18]. Los parámetros evaluados en estas investigaciones han involucrado dosis de ácido, temperatura de proceso, tamaño de la partícula, frecuencia (microondas) y tiempo de reacción. Los resultados obtenidos muestran un muy buen rendimiento del proceso cuando se utiliza esta combinación de procesos para la hidrólisis, en parte asociados al muy bajo contenido de lignina encontrado en este tipo de material orgánico. Se ha observado una relación directa entre el rendimiento del proceso y la

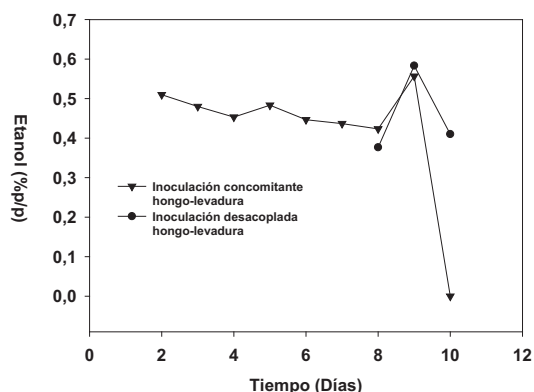


Figura 4. Perfil de etanol en el tiempo en un proceso sacarificación-fermentación acoplado, usando *Cladosporium tenuissimum* y *Sacharomices cerevisiae* en inoculación concomitante y desacoplada.

dosis de ácido, la temperatura del proceso y el tiempo en el microondas, lográndose reducciones significativas en el porcentaje de hemicelulosa del residuo y rendimientos comprobables con los reportados a nivel internacional para otro tipo de sustratos.

Se ha probado también el rendimiento de complejos enzimáticos (Cellubrix® y Vyscozime®) sobre muestras, al evaluar el efecto de la temperatura y la relación enzima:sustrato; se han encontrado valores de proceso diferentes reportados por el fabricante, debido a la naturaleza del material utilizado como sustrato. Los valores de rendimiento también estuvieron en el rango reportado en literatura.

Aun cuando los resultados preliminares de estas investigaciones son muy interesantes, evaluaciones económicas muestran costos relativamente importantes para estas aproximaciones tecnológicas. El desafío radica en lograr mejores rendimientos a los ya encontrados con valores competitivos asociados al proceso.

#### BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES

Es cierto que se puede usar aceites como combustible directo, sin embargo, estudios han demostrado que el uso de aceites vegetales o mezclas de diesel con este tipo de combustibles es aceptable sólo por

cortos períodos de operación del motor; inclusive, en estas ocasiones se presentan problemas debido a la alta viscosidad y baja volatilidad de los aceites vegetales. Estos factores pueden ser aliviados si los aceites vegetales son sometidos a un proceso químico denominado transesterificación [19]. La transesterificación (también llamada alcoholólisis) involucra la sustitución del grupo alquilo del éster por otro grupo a partir de la interacción entre el éster y el alcohol. Si el alcohol adicionado es metanol, la reacción puede ser denominada metanolólisis, en la que los aceites vegetales producen ácidos grasos de ésteres metílicos (denominado biodiesel) y glicerol, los primeros son excelentes sustituyentes del combustible diesel [20]. Para llevar a cabo la reacción de transesterificación tradicionalmente se ha usado catalizadores que pueden tener características químicas básicas o ácidas, y que pueden estar en fase homogénea o heterogénea (haciendo referencia a si el catalizador está en la misma fase de los reactantes); no obstante, recientes estudios han propuesto realizar esta reacción por medio de catalizadores enzimáticos o, incluso, sin el uso del catalizador, al trabajar en condiciones supercríticas [21]. Inicialmente el GDPP de la Universidad de los Andes adelantó varios proyectos realizados por estudiantes de Ingeniería Química en los que se probaron diferentes catalizadores con el fin de determinar las condiciones de operación y los rendimientos de cada uno de estos procesos. Estos trabajos se clasificaron dependiendo del tipo de catalizador usado y, en todos ellos, se usó como materia prima el aceite de palma proveniente de los frutos de la palmera africana *Elaeis guinnensis* o *Elaeis oleífera*.

#### CATALIZADORES HETEROGÉNEOS

Para evaluar el comportamiento de los catalizadores heterogéneos básicos se prepararon y realizaron pruebas con dos diferentes catalizadores: CaO y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [22]. En este mismo estudio también se varió la cantidad de catalizador y, mediante un experimento factorial para estas dos variables, se determinó su influencia en la velocidad de reacción, usando un reactor por lotes. Se concluyó que el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no presenta

actividad, caso contrario al CaO que reportó un rendimiento entre el 52 y el 55%, significativamente menor al reportado por los catalizadores homogéneos (mayores al 95%). El rendimiento se calculó mediante la siguiente relación:

$$Ren(ME) = \frac{(Peso_{ME-prod} / PM_{ME}) * \%Conc_{ME}}{\left(\frac{Peso_{Aceite}}{PM_{Aceite}}\right) * 3}$$

Donde: PM es peso molecular, Conc es concentración, y el subíndice ME significa metil éster.

Como ventajas se observó la fácil eliminación del catalizador después de la reacción y la no presencia de jabones en el producto, lo que facilita su purificación. Valencia [23] en el 2006 continuó el anterior trabajo, al usar el catalizador que mostró tener actividad: el CaO. Se concluyó que el rendimiento es deficiente y se recomendó incrementar el área de contacto interfacial para mejorar el rendimiento de la reacción. El proceso de producción usando catalizadores heterogéneos ácidos fue estudiado inicialmente por Riveros [24] en el 2005. Partiendo de la hipótesis que la catálisis ácida permite una mayor pureza y menos procesos de separación de los productos de la reacción, se intentó seleccionar un catalizador que cumpliera los anteriores requerimientos adecuadamente. Se prepararon y estudiaron entonces el ZnO y el Aluminato de Zinc (ZnAlO<sub>4</sub>). Las conclusiones del trabajo revelan que el aluminato no se comportó como se esperaba y que sólo el ZnO presentó actividad. La explicación para la diferencia de actividades se basó en la diferente distribución de poros de los dos catalizadores. El máximo rendimiento que se reportó fue de 38,75% para el catalizador ZnO. En otro trabajo, Ceballos [25] intentó trabajar el ZnO como catalizador, pero, debido a problemas en la sinterización del catalizador, la idea fue descartada y se terminó trabajando la catálisis básica homogénea.

#### CATALIZADORES HOMOGÉNEOS

Por los elevados rendimientos de la reacción de transesterificación reportados por la catálisis homogénea,



se decidió estudiar metil ésteres en varios proyectos. Martínez [26] evaluó el rendimiento de la reacción usando básicamente dos catalizadores: NaOH y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; el primero con característica química básica y el segundo, ácida. Se realizaron diferentes ensayos en un reactor por lotes en los que se variaron el tiempo de reacción, el tipo de catalizador y la velocidad de agitación. La conversión a productos que se logró con la catálisis básica fue mayor que la lograda con la catálisis ácida. Este mismo trabajo hizo unas recomendaciones sobre las condiciones de operación más propicias para la producción de biodiesel (temperatura de reacción de 90°C, usando catalizador básico) y, así mismo, recomendó estudiar el problema de la formación de emulsiones en los productos. Este último punto motivó un estudio [27] sobre las emulsiones que se presentan en el proceso de producción del biodiesel. Este trabajo permitió el entendimiento del fenómeno asociado a la inmiscibilidad de las fases. Clasificado dentro de este mismo tipo de catalizadores homogéneos, en el 2007, Ceballos [25] estableció una expresión cinética para la reacción de transesterificación usando como catalizador el KOH, un estudio básico importante que permitiría modelar el proceso completo para intentar la predicción teórica de las condiciones óptimas de operación de las plantas que usan la tecnología catalítica homogénea básica [28].

#### CATALIZADORES ENZIMÁTICOS

Considerando los problemas causados por los catalizadores homogéneos básicos —tales como: la dificultad de recuperar y purificar el glicerol, y la difícil remoción del catalizador del producto— se han dirigido investigaciones tendientes a buscar el desarrollo de los biocatalizadores. Con la experiencia adquirida por integrantes del grupo de investigación GDPP sobre la exploración de los procesos de producción de ácidos grasos a partir de crudos de aceites de palma africana por medio de la lipasa de *C. rugosa*, [29] se planteó la posibilidad de estudiar la producción de los biocombustibles por medio de este tipo de enzimas. Las lipasas son enzimas que tienen la capacidad de catalizar reacciones no sólo de hidrólisis sino también

de realizar la esterificación y la transesterificación en presencia de pequeñas cantidades de agua. El trabajo de Naranjo [29] consistió en el estudio del mejor soporte para la inmovilización de la enzima, sobre una tela de carbono y sobre carbón granulado, y su posterior evaluación en la producción del biodiesel. La reacción se dejó un tiempo de 24 horas en cajas de Petri agitadas y en condiciones de temperatura de 35°C y se verificó la ocurrencia de la transesterificación utilizando un análisis de infrarrojo. Cualitativamente se demostró la producción de biodiesel.

#### PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

El CIHA ha venido trabajando con procesos de digestión anaerobia de residuos desde su fundación en el año 1991. La digestión anaerobia de residuos sólidos (basuras, lodos, residuos agrícolas, residuos pecuarios, etc.) ha sido evaluada en un gran número de trabajos de investigación. En los últimos años, y en vista del altísimo potencial energético y bajo impacto ambiental del hidrógeno, se han venido adelantando estudios tendientes a dirigir el proceso anaerobio hacia la generación de hidrógeno gaseoso. Hernández [30], al trabajar con estiércol de granjas porcícolas, logró reducir a cero la producción de metano en la digestión anaerobia, alcanzando porcentajes de hidrógeno en el biogás ligeramente superiores a 25%. Estos buenos resultados fueron obtenidos sin necesidad de trabajar con un inóculo especial y sin adición de sustancias químicas inhibitorias de los organismos productores de metano, prácticas utilizadas casi que en la totalidad de los trabajos realizados a nivel internacional. Se pudieron establecer valores apropiados de pH del proceso y de tiempo de retención dentro del reactor.

Vale la pena resaltar que un biogás clásicamente está formado por 60% de metano y 40% de dióxido de carbono; obtener un 25% de hidrógeno en estudios preliminares, a partir de sustratos muy complejos, teniendo en cuenta que el hidrógeno tiene un potencial energético tres veces superior al del metano, se con-

vierte en un aspecto muy alentador en esta línea de investigación.

Los valores de producción de hidrógeno y rendimiento del proceso frente a los reportes internacionales aún siguen siendo bajos; sin embargo, la mayoría de trabajos internacionales trabaja con sustratos simples de fácil fermentación.

Actualmente se está trabajando sobre temperaturas más eficientes para el proceso (condiciones psicrófilas y termófilas), nuevos sistemas de reacción (continuo y secuencial por lotes), otros sustratos agropecuarios, la identificación de los microorganismos asociados a este proceso. En un futuro se espera avanzar en proceso de enriquecimiento del biogás obtenido y el acople directo con celdas de combustible.

#### PIRÓLISIS

Finalmente el CIIA también ha trabajado con procesos térmicos para la transformación de residuos orgánicos en combustibles [31, 32, 33]. En estos estudios, utilizando temperaturas entre 450 y 700°C a partir de residuos sólidos doméstico, se ha logrado obtener combustibles líquidos con un poder calorífico de 8 500 cal/g muy cercanos a los valores de un Diesel comercial (9 900 cal/g). La fracción sólida obtenida (coque) tuvo un poder calorífico (7 000 cal/g) superior a los valores reportados para los carbones extraídos en Colombia (5 100 - 7 000 cal/g). Estos valores son mucho más elevados para cuando los ensayos fueron realizados utilizando plásticos usados presentes en basuras de hogares: 8 400 - 11 300 cal/g fracción líquida obtenida y 8 200-8 300 cal/g fracción sólida.

Como inconvenientes del proceso se pueden resaltar tres. El primero es el alto contenido de azufre encontrado en algunos de estos combustibles obtenidos, debido a la presencia de esta sustancia en los

residuos utilizados, lo cual puede generar impacto ambiental negativo en el momento de ser utilizados directamente en procesos de combustión o la necesidad de implementar procesos de desulfuración para estos combustibles. Segundo, la alta emisión de sustancias volátiles orgánicas que deben ser condensadas u oxidadas para evitar impactos sobre la atmósfera. Y tercero, la alta necesidad energética demanda por el proceso. Actualmente se está trabajando sobre balances energéticos para determinar la autosostenibilidad del proceso.

#### CONCLUSIONES

Aunque se han establecido los objetivos y los resultados obtenidos para las diferentes alternativas son alentadores, éstos también indican que existe mucho trabajo por desarrollar para llegar a un punto de viabilidad de estas tecnologías. Estos problemas radican en 1) consecución de catalizadores de buen desempeño, ya sean enzimáticos para la hidrólisis de celulosa para obtener azúcares reductores, como también en la transesterificación en el proceso de obtención de metil ésteres; 2) obtención de condiciones óptimas de reacción, como por ejemplo en el pretratamiento de la celulosa (presión temperatura y medio), temperaturas y sistemas de reacción para producción de hidrógeno, y condiciones de reacción para el proceso de pirólisis; y 3) la obtención de materias primas que provean viabilidad económica al proceso.

Por último, el advenimiento de la era posgenómica permitirá en el futuro usar la tecnología del ADN recombinante para mejorar los rendimientos de proceso actuales a partir de Ingeniería de proteínas y análisis de flux metabólico, y también la obtención de alcoholes ramificados como alternativa al etanol.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **M. Schellenberger, T. Nordhaus**  
 “The death of Environmentalism”. The Breakthrough Institute. Fecha de consulta: Agosto del 2008. Disponible en: <http://www.thebreakthrough.org>
- [2] **Q. Schiermeier, J. Tollefson, T. Scully, A. Witze O. Morton.**  
 “Electricity without carbon”. *Nature*, Vol. 454, 14 August 2008, pp. 816-823.
- [3] “Bureau of Transportation Statistics”.  
 Research and Innovative Technology Administration 2006. Fecha de consulta: Agosto del 2008. Disponible en: [http://www.bts.gov/publications/national\\_transportation\\_statistics/html/table\\_01\\_11.html](http://www.bts.gov/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_11.html)
- [4] **J. H. Mercer.**  
 “West Antarctic ice sheet and CO2 greenhouse effect: a threat of disaster”. *Nature*, Vol. 271, 26 January 1978, pp. 321-325.
- [5] **P. Álvarez.**  
*Efecto del etanol en la degradación de BTEX: Implicaciones microscópicas y macroscópicas.* Curso Contaminantes emergentes. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.
- [6] “Ethanol industry Outlook 2007, Building New Horizons”. Renewable Fuels Association (RFA), 2008. Fecha de consulta: Agosto del 2008. Disponible en: [http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA\\_Outlook\\_2007.pdf](http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA_Outlook_2007.pdf)
- [7] “Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia”.  
 Consejo Nacional de Política Económica y Social, Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia. 2008. Fecha de consulta: Agosto del 2008. Disponible en: [http://www.dnp.gov.co/archivos/documentos/Subdireccion\\_Conpes/3344.pdf](http://www.dnp.gov.co/archivos/documentos/Subdireccion_Conpes/3344.pdf)
- [8] **Mitchell D. A.**  
 “A note on rising food prices”. The World Bank Development Prospects Group. 2008. Fecha de consulta: Agosto del 2008. Disponible en: [http://siteresources.worldbank.org/NEWS/Resources/risingfoodprices\\_backgroundnote\\_apr08.pdf](http://siteresources.worldbank.org/NEWS/Resources/risingfoodprices_backgroundnote_apr08.pdf)
- [9] **L.F. Londoño.**  
 “Producción de etanol en Colombia”. Sector Azucarero Colombiano. Asocaña. Septiembre de 2007. Fecha de consulta: Febrero de 2008. Disponible en: [http://www.minagricultura.gov.co/archivos/cartagena\\_-sep\\_07asocana\\_v2.pdf](http://www.minagricultura.gov.co/archivos/cartagena_-sep_07asocana_v2.pdf)
- [10] **Fedepalma y Cenipalma.**  
*El cultivo de la palma de aceite y su beneficio. Guía General para el nuevo palmicultor* [CD ROM interactivo]. Colombia. Fondo de Comunicaciones y Fondo de Fomento Palmero. (s.f).
- [11] **C. Loboguerrero.**  
*Exploración de la factibilidad del aprovechamiento de los residuos de la palma de aceite para convertirlos en azúcares fermentables.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.
- [12] **D. P. Díaz.**  
*Hidrólisis enzimática de la tusa de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) pretratada con ácido sulfúrico diluido para la producción de azúcares fermentables.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.
- [13] **J. Buraglia.**  
*Estudio preliminar de producción de bioetanol a partir de desechos lignocelulósicos de palma africana por medio de un proceso de sacarificación y fermentación simultánea (SSF).* Proyecto de grado en curso. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [14] **L. Piragua y J. Franco.**  
*Estudio inicial de la producción de etanol a partir de la tusa de aceite de palma africana por medio de un proceso de sacarificación y fermentación simultáneo (SFS) usando microorganismos aislados en la Universidad de los Andes.* Proyecto de grado en curso. Bogotá: Universidad de los Andes.

- [15] **M. P. González y S. Roldán.**  
*Estudio exploratorio de la producción de etanol a partir de los desechos de la extracción del aceite de palma, implementando los procesos de hidrólisis y fermentación desacoplados.* Proyecto de grado en curso. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [16] **A. Camelo.**  
*Estudio preliminar de la hidrólisis enzimática con pretratamiento ácido de residuos orgánicos municipales para la obtención de azúcares fermentables.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.
- [17] **A. Torrado.**  
*Mejoramiento de la hidrólisis enzimática con pretratamiento ácido de los residuos sólidos domésticos para la obtención de azúcares fermentables.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2008.
- [18] **D. Martínez.**  
*Optimización del proceso de hidrólisis ácida de residuos orgánicos municipales para la obtención de azúcares fermentables.* Proyecto de grado en curso. Bogotá: Universidad de los Andes.
- [19] **M. Al-Widyan and A. Al-Shyoukh.**  
“Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel”. *Bioresource Technology*, Biores. Techn. Vol. 85, No. 3, 2002.
- [20] **G. Vicente, M. Martínez, J. Aracil and A. Esteban.**  
“Kinetics of sunflower oil methanolysis”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Ind. Eng. Chem. Res, Vol. 44, No. 15, 2005, pp. 5447-5454.
- [21] **G. Knothe J. Gerpen and J. Krahl (Eds.).**  
*The biodiesel handbook.* AOCS press Champaign Illinois. ISBN: 1-893997-79-0, 2005.
- [22] **G. Charry.**  
*Trans-esterificación del crudo de palma con metanol por medio de catalisis heterogénea empleando un catalizador básico.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
- [23] **J. A. Valencia.**  
*Evaluación y caracterización heterogénea en la reacción de transesterificación de aceite de palma híbrido con metanol para la obtención de biodiesel.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.
- [24] **L. M. Riveros.**  
*Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catalisis heterogénea empleando in catalizador ácido.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
- [25] **J. A. Ceballos.**  
*Estudio de la velocidad de reacción de la transesterificación del aceite de palma RBD con metanol empleando KOH como catalizador.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.
- [26] **M. Martínez.**  
*Evaluación de la trans-esterificación en fase homogénea de aceite de palma con metanol empleando catalizadores ácidos y básicos.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
- [27] **L. C. Rojas.**  
*Tratamiento de las emulsiones en la transesterificación básica del aceite de palma.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.
- [28] **F. Velosa.**  
*Simulación y optimización del proceso utilizado en Colombia para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma.* Proyecto de grado 2007, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- [29] **J. C. Naranjo.**  
*Exploración y análisis de la síntesis de un biocatalizador para la obtención de biodiesel.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2008.

**[30] M. Hernández.**

*Producción de hidrógeno a partir de la digestión anaerobia de estiércol de cerdo.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.

**[31] N. Almeida**

*Estudios preliminares de pirólisis de residuos sólidos municipales para la obtención de biocombustibles.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.

**[32] I. Arellana.**

*Pirólisis de plásticos para la obtención de combustibles alternativos.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.

**[33] J. García.**

*Estudio preliminar de la pirólisis de la cascarilla de arroz para la obtención de combustibles.* Proyecto de grado. Bogotá: Universidad de los Andes, 2007.

**[34] J. A. García.**

*Determination of kinetic constants and thermal modeling of pyrolysis of palm oil mill solid wastes.* Tesis de Maestría. Athens, Georgia, Estados Unidos, 2005.