

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A  
PARTIR DE PLÁTANO**

**TESIS presentada por**

**VERÓNICA PATRICIA VILLEGAS RIVAS**

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como  
requisito parcial para obtener el grado de:**

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Asesor: Dr. Agustín Jaime Castro Montoya**

**Morelia, Mich.**

**2012**

# Índice

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Resumen.....                                                       | 1  |
| Capítulo 1. Introducción.....                                      | 3  |
| 1.1 Introducción .....                                             | 3  |
| 1.2 Generalidades.....                                             | 4  |
| 1.3 Cadena Productiva Plátano .....                                | 7  |
| 1.3.1 Descripción.....                                             | 7  |
| 1.3.2 Situación internacional.....                                 | 8  |
| 1.3.3 Situación nacional .....                                     | 9  |
| 1.4. Planteamiento del Problema .....                              | 10 |
| 1.5. Hipótesis.....                                                | 11 |
| 1.6. Objetivo General: .....                                       | 11 |
| Capítulo 2. Marco Teórico.....                                     | 12 |
| 2.1 Biomasa.....                                                   | 12 |
| 2.2 Carbohidratos.....                                             | 14 |
| 2.3. Almidón .....                                                 | 15 |
| 2.4. Etanol .....                                                  | 17 |
| 2.5. Hidrólisis.....                                               | 18 |
| 2.6 Hidrólisis Ácida Cuantitativa, por el método de Browning. .... | 19 |
| 2.7 Antecedentes .....                                             | 19 |
| Capítulo 3. Metodología.....                                       | 21 |
| 3.1 Determinación de humedad .....                                 | 21 |
| 3.2 Hidrólisis Ácida Cuantitativa .....                            | 22 |
| 3.3 Hidrólisis química .....                                       | 22 |
| 3.4 Métodos analíticos.....                                        | 23 |
| 3.4.1 Determinación de azúcares.....                               | 23 |
| 3.5 Diseño Experimental .....                                      | 24 |
| Capítulo 4. Resultados y Discusión.....                            | 27 |
| 4.1 Composición del sustrato.....                                  | 27 |
| 4.2 Hidrolisis química .....                                       | 27 |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 Plátano verde .....                       | 29 |
| 4.2.2 Plátano amarillo .....                    | 31 |
| 4.2.2 Plátano maduro.....                       | 33 |
| 4.3 Análisis estadístico de los resultados..... | 35 |
| 4.3.1 Plátano Verde.....                        | 35 |
| 4.3.2 Plátano Amarillo.....                     | 37 |
| 4.3.3 Plátano Maduro.....                       | 39 |
| Conclusiones .....                              | 41 |
| Referencias.....                                | 42 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 1 Evolución histórica de las reservas totales de petróleo crudo equivalente del país.....</i>                                                           | <i>5</i>  |
| <i>Figura 2 Diagrama de flujo generalizado para la obtención de diferentes productos a partir de recursos fósiles. (U.S. Departamento of Energy, 2004). .....</i> | <i>6</i>  |
| <i>Figura 3 Diagrama de flujo generalizado para la obtención de diferentes productos a partir de biomasa. (U.S. Departmen of Energy, 2004). .....</i>             | <i>7</i>  |
| <i>Figura 4 Evolución de las materias primas para la industria química .....</i>                                                                                  | <i>15</i> |
| <i>Figura 5 Fórmula estructural de la amilosa .....</i>                                                                                                           | <i>16</i> |
| <i>Figura 6 Fórmula estructural de la amilopectina .....</i>                                                                                                      | <i>16</i> |
| <i>Figura 7 Enlace glucosídico .....</i>                                                                                                                          | <i>18</i> |
| <i>Figura 8 Hidrólisis de un polisacárido ejemplificada por la hidrólisis de un disacárido.....</i>                                                               | <i>18</i> |
| <i>Figura 9 Cromatograma de las muestras patrón .....</i>                                                                                                         | <i>24</i> |
| <i>Figura 10 Hidrólisis de plátano verde a 90 °C.....</i>                                                                                                         | <i>30</i> |
| <i>Figura 11 Hidrólisis de plátano verde a 120 °C.....</i>                                                                                                        | <i>31</i> |
| <i>Figura 12 Hidrólisis de plátano amarillo a 90 °C .....</i>                                                                                                     | <i>32</i> |
| <i>Figura 13 Hidrólisis de amarillo a 120 °C.....</i>                                                                                                             | <i>32</i> |
| <i>Figura 14 Hidrólisis de plátano maduro a 90 °C .....</i>                                                                                                       | <i>33</i> |
| <i>Figura 15 Hidrólisis de plátano maduro a 120 °C .....</i>                                                                                                      | <i>34</i> |
| <i>Figura 16 Hidrólisis de plátano maduro a 120 °C y baja.....</i>                                                                                                | <i>35</i> |
| <i>Figura 17 Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano verde a 120 °C.....</i>                                                                        | <i>36</i> |
| <i>Figura 18 Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano verde a 120 °C.....</i>                                                                        | <i>37</i> |
| <i>Figura 19 Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano amarillo a 120 °C .....</i>                                                                    | <i>38</i> |
| <i>Figura 20 Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano amarillo a 120 °C .....</i>                                                                    | <i>38</i> |
| <i>Figura 21 Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano maduro a 120 °C .....</i>                                                                      | <i>39</i> |
| <i>Figura 22 Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano maduro a 120 °C .....</i>                                                                      | <i>40</i> |

## Índice de Tablas

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 1</i> Producción de Plátano 2011.....                                | 10 |
| <i>Tabla 2</i> Diseño experimental .....                                      | 25 |
| <i>Tabla 3</i> Malla de corridas experimentales .....                         | 26 |
| <i>Tabla 4</i> Composición del sustrato.....                                  | 27 |
| <i>Tabla 5</i> Malla de resultados experimentales para plátano verde.....     | 28 |
| <i>Tabla 6</i> Malla de resultados experimentales para plátano amarillo ..... | 28 |
| <i>Tabla 7</i> Malla de resultados experimentales para plátano maduro .....   | 29 |

## Resumen

### PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE PLÁTANO

Por:

Verónica Patricia Villegas Rivas

Agosto 2012

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Agustín Jaime Castro Montoya y Dr. Jaime Saucedo Luna

Las crisis energéticas de los años setenta despertaron la preocupación acerca de la duración de los recursos energéticos que abastecen al mundo, poniendo interrogantes sobre cuál podría ser el futuro de la sociedad humana, las fuentes energéticas que la sostendrían y las perspectivas de crecimiento económico. La respuesta ante esta preocupación ha sido la búsqueda de tecnologías viables para la industria y el sector transporte, basadas en combustibles y materias primas renovables cuya disponibilidad estuviera asegurada.

El plátano (*musa paradisiaca*), fruta rica en almidón, puede ser aprovechado para la obtención de glucosa por hidrólisis ácida, con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), la cual puede ser transformada en productos de interés en procesos fermentativos. En este trabajo se evalúa la hidrólisis ácida de plátano a distintas condiciones para la producción de un jarabe azucarado que servirá como materia prima para la obtención de etanol.

Utilizando un diseño de experimentos factorial multinivel, se estudió el efecto de la concentración de ácido sulfúrico, el tiempo y la temperatura, en la producción de glucosa.

Se concluye que la temperatura tiene un impacto importante y positivo sobre la hidrólisis ácida de la pulpa de plátano. Con respecto a la concentración del ácido sulfúrico se puede concluir que se requiere un cierto nivel de acidez para que se lleve a cabo la reacción de hidrólisis, pero que tiene un efecto más grande sobre la reacción de descomposición a tal grado que a niveles altos es más rápida la descomposición de los azúcares con respecto a su formación.

A 120° C, 0.5% de concentración de ácido sulfúrico y para un tiempo de 5 minutos se obtiene un hidrolizado con una concentración de 60 g/L de azúcares, la cual es muy buena para procesos fermentativos de producción de productos químicos como el etanol.

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Introducción

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el intento de mejorar las condiciones económico-sociales de la gente que vive en zonas rurales, la declinación de la producción de petróleo son temas de interés mundial en la actualidad y una de las alternativas que incide en estas problemáticas es el desarrollo de fuentes de energía limpias y renovables como son los biocombustibles. En la última década se ha incrementado considerablemente la producción de biocombustibles, siendo el bioetanol a partir de caña de azúcar y de maíz así como el biodiesel a partir de canola los que más han progresado. En este trabajo se aborda el proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa, la cual se clasifica según su composición química en dos categorías:

- i. ***Materias primas de primera generación:*** Contienen azúcares y/o almidones que pueden ser convertidos a bioetanol por tecnología convencional. Ejemplos de ellos son: jugo de caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce, almidones de maíz, etc.
- ii. ***Materias primas de segunda generación:*** Contienen fibras lignocelulósicas que pueden ser convertidas a bioetanol por tecnologías avanzadas. Ejemplos de estos son: bagazo de caña de azúcar, esquilmos agrícolas, residuos sólidos municipales, etc.

El proceso de producción es similar para las dos generaciones de materias primas, salvo que para la segunda generación se requiere una etapa inicial de rompimiento de los polímeros celulósicos hacia azúcares fermentables (hidrólisis).

Cabe mencionar que debido al auge que ha tenido la producción de bioetanol a partir de materias primas de primera generación, las cuales son parte importante de la alimentación del ser humano, se ha generado una discusión mundial acerca de la seguridad alimentaria contra la producción de biocombustibles: Por un lado están los opositores a los biocombustibles que consideran que la competición por el uso de suelo provocará una severa hambruna a nivel mundial y por otro lado están los defensores que consideran que los biocombustibles representan la mejor oportunidad para propiciar el desarrollo

económico sustentable sobre todo de las zonas rurales. Lo cierto es que esta posible competición es tan compleja que dependiendo del contexto puede ser contradictoria, pero ha propiciado la búsqueda de otras materias primas alternativas como son las de segunda generación y la posible utilización del desperdicio de productos naturales como las frutas que estarían en el primer grupo. Entre estas frutas puede considerarse el plátano, del cual se presenta a continuación su situación actual.

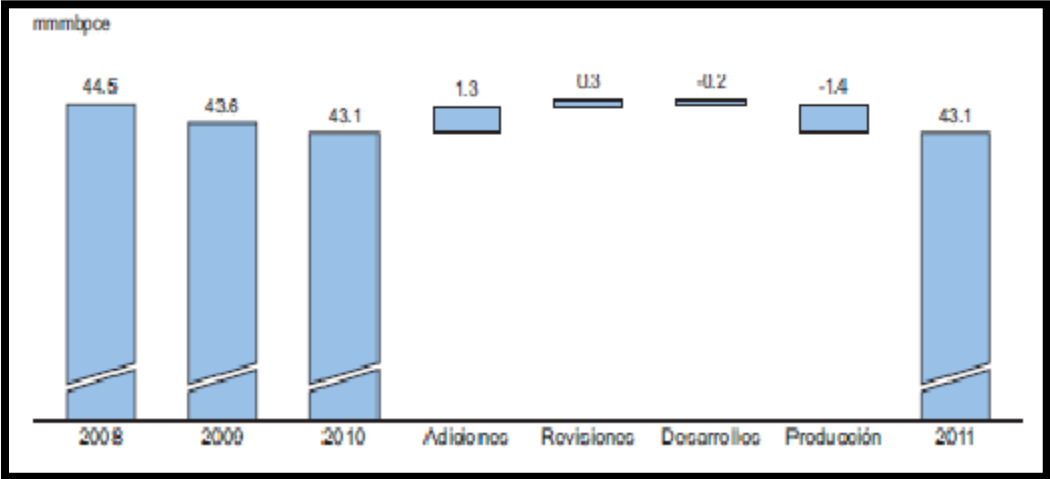
El calentamiento global atribuido en parte al consumo de combustibles no renovables, los altos costos, el agotamiento de ellos, la alta contaminación urbana y su alta participación en el sector del transporte, están siendo las fuerzas motivadoras para que el mundo se estén realizando investigaciones sobre el uso de fuentes alternativas de energía, especialmente aquellas que se derivan del uso de la biomasa como fuente de energía.

## **1.2 Generalidades**

La crisis energética que comenzó en 1973 disminuyó la oferta de petróleo e incrementó su precio en forma exorbitante, por lo cual, se impuso la racionalización del uso de la energía, hacer un uso más eficiente de ella, y de la diversificación de las fuentes y suministros de estas (Acostas A. 2004). Se planteó la urgente necesidad de encontrar y desarrollar fuentes alternativas de energía, como otros combustibles fósiles (carbón, gas), energía nuclear o recursos energéticos renovables.

La demanda mundial de recursos fósiles tanto para la producción de energéticos, como para la producción de la mayoría de los iniciadores de las cadenas productivas ha llevado a un decremento en las reservas probadas mundiales. En México se estima que, en un periodo no mayor de dos décadas se tendrá problemas por la escasez del petróleo, ya que se tienen reservas probadas para diez años, equivalentes a 2,6 millones de barriles diarios, informó Petróleos Mexicanos (Pemex) y las reservas totales son de 43,074 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (MMbpce), con una tasa de reposición de reservas que pasó de 77% a 85.3% para este año tal como se muestra en la *Figural*. La meta es alcanzar el 100% para 2012, es decir, que por cada barril extraído haya ya otro en las reservas probadas.

Anteriormente México cifraba sus esperanzas en el yacimiento más grande del país y, según los científicos, el más grande en el mundo, donde se estimaba una reserva de 139 mil millones de barriles de petróleo. Dicho yacimiento se encuentra entre los estados de Puebla y Veracruz en la zona de Chicontepec, pero desafortunadamente no se logró la producción inicialmente estimada. Cabe destacar que el principal ingreso de México proviene de la producción de petróleo, por esta razón, es necesaria la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan la conversión de materias primas renovables en productos de consumo que sostenga el nivel de vida de la sociedad.

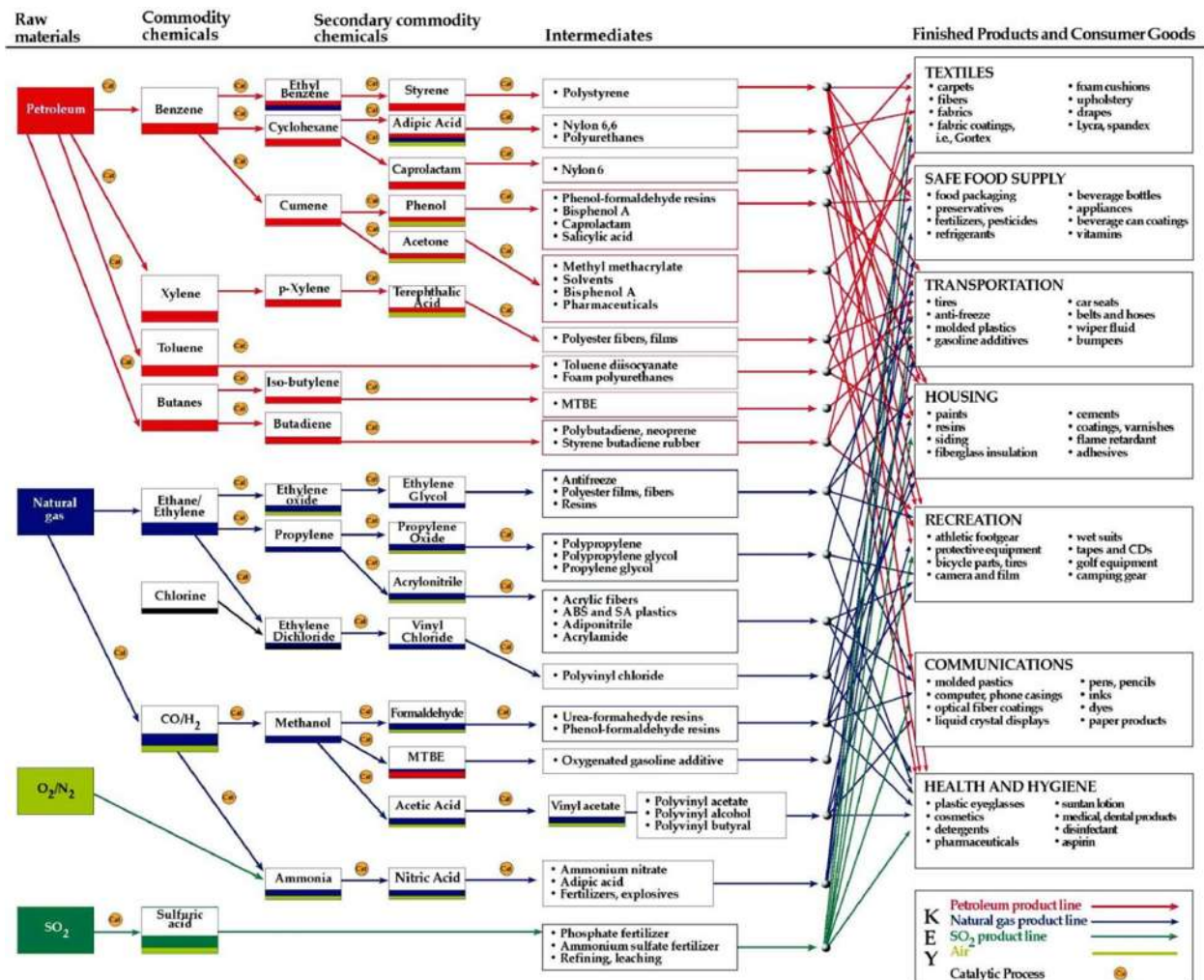


**Figura 1** Evolución histórica de las reservas totales de petróleo crudo equivalente del país.

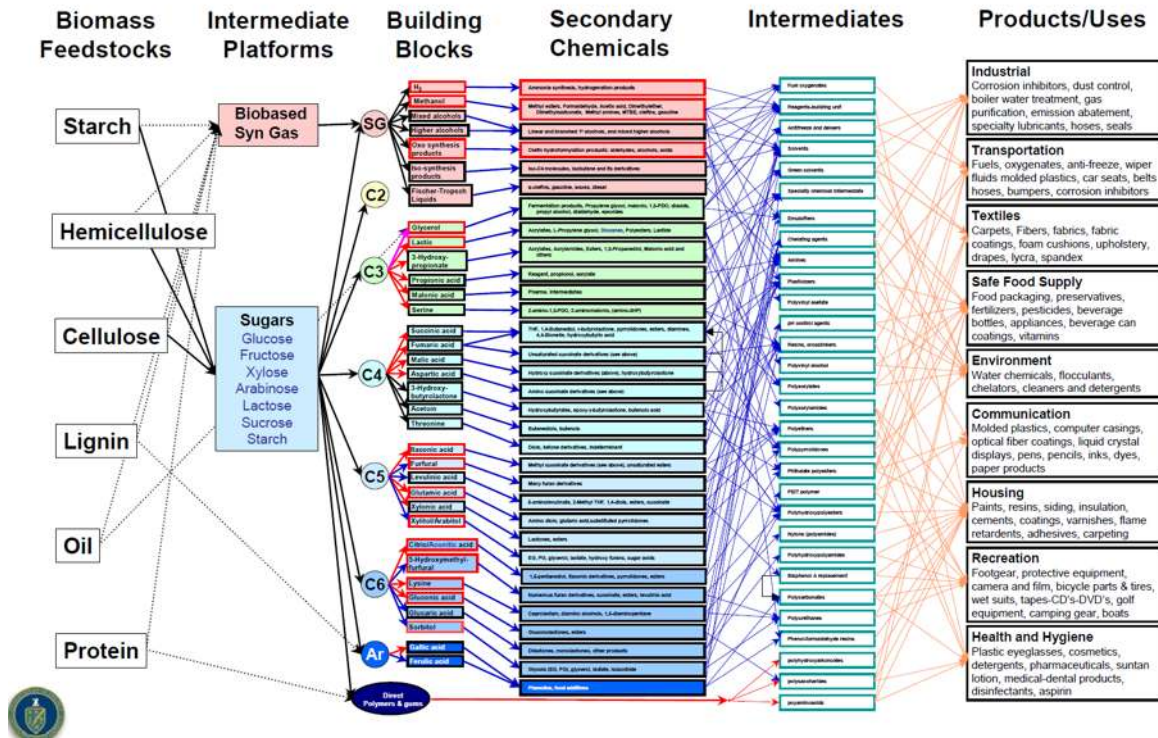
Una alternativa viable al uso del petróleo, el carbón y los reactores nucleares, es la utilización directa e indirecta de la energía a partir de residuos vegetales; es una fuente renovable, abundante, con fuentes diversas y limpia.

En respuesta a la demanda de soluciones a esta problemática, en el año 2004 el Departamento de Energía de los Estados Unidos, publicó un estudio en el cual coloca a los azúcares como compuestos potencialmente útiles para ser transformados biológicamente en materias primas para la mayoría de las cadenas productivas existentes; así como para la producción de combustibles, como el etanol. Producto de este estudio se hizo una analogía entre los bloques elementales que dan sustento a los productos de uso común partiendo de materiales fósiles y los que se pueden obtener de la biomasa o materiales lignocelulósicos y

a la cual se le dio el nombre de biorefinería por semejanza con la petroquímica y se reporta en la *Figura 2*. Partiendo de biomasa, un recurso natural renovable que se encuentra distribuido en plantas y en residuos agrícolas, pecuarios, forestales municipales e industriales, es posible obtener un conjunto de azúcares fermentables para su posterior conversión tal como se observa en la *Figura 3*. En ésta figura pueden apreciarse las diferentes rutas que puede seguir la conversión de la biomasa hacia toda una gama de productos de interés que actualmente se obtiene de recursos fósiles y principalmente del petróleo.



*Figura 2* Diagrama de flujo generalizado para la obtención de diferentes productos a partir de recursos fósiles. (U.S. Departamento of Energy, 2004).



**Figure 3** Diagrama de flujo generalizado para la obtención de diferentes productos a partir de biomasa. (U.S. Department of Energy, 2004).

## 1.3 Cadena Productiva Plátano

### 1.3.1 Descripción

El banano y plátano, es un frutal cuyo origen se considera del Sureste Asiático, incluyendo el Norte de la India, Burma, Camboya y parte de la China sur, así como las Islas mayores de Sumatra, Java, Borneo, las Filipinas y Taiwán. En el continente americano, este frutal se encuentra distribuido en la parte Norte, Centro y Sur de América, en donde las condiciones ecológicas propician su desarrollo, siendo Brasil el máximo productor. En México con término “*Plátano*” se le denomina tanto a los bananos como a los plátanos; en otros países esta separación de nomenclatura se basa en la forma de consumirse, los bananos son los que se consumen como fruta cruda o fresco y los plátanos los que se consumen cocinados por la razón de que tienen más harina.

La planta es una herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3.5 a 7.5 m de altura, terminado en una corona de hojas. La cosecha se lleva a cabo cuando la fruta ha alcanzado su completo

desarrollo y empiezan a amarillear, con frecuencia, se anticipa la recolección y se dejan madurar los frutos suspendiéndolos en un local cerrado, seco y cálido, conservado en la oscuridad. Apenas recogido el fruto, se corta la planta por el pie, dejando los vástagos en la base. Éstos, convenientemente aclarados, fructifican pasados cuatro meses, de modo que en un año se pueden hacer tres recolecciones.

### **1.3.2 Situación internacional**

El plátano (en todas sus variedades) es el cuarto cultivo más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz con una producción de aproximadamente 100 millones toneladas anuales para el año 2000 que fueron cultivadas en una superficie de 9 millones de hectáreas (Arias, et. al. 2003). Además de ser considerado un producto básico y de exportación, constituyendo una importante fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo. Los países latinoamericanos y del Caribe producen el grueso de los plátanos que entran en el comercio internacional, unos 10,041,367 toneladas, del total mundial de 12,234,489 toneladas. Se produce y consume principalmente en los países en vía de desarrollo. Se comercializa en fresco y, en menor escala, deshidratado y en harina. En el comercio internacional sólo se generan transacciones por el 1% de la producción mundial, siendo los Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea los principales importadores de plátano fresco, producto que se destina para satisfacer la demanda de sus comunidades latinas y, en menor proporción, africanas. Es considerado el principal cultivo de las regiones húmedas y cálidas del sudoeste asiático. Aunque es uno de los cultivos más importantes de todo el mundo, los consumidores del norte lo aprecian sólo como un postre, pero constituye una parte esencial de la dieta diaria para los habitantes de más de cien países tropicales y subtropicales. México exporta 81, 044 toneladas y pertenece a la región de América latina y el Caribe, y participa en su grupo con el 0.81% y con la exportación mundial con el 0.66%.

### **1.3.3 Situación nacional**

En el cultivo de plátano en nuestro país participan diversos estados, por ejemplo para el año 1997 la producción de plátano abarcó a 18 entidades. Sin embargo, a pesar del gran número de entidades que se dedican a dicha actividad, solo cinco (Chiapas, Veracruz, Tabasco, **Michoacán** y Colima) han concentrado en lo que va de la década, entre el 76 a 78% de la superficie sembrada y cosechada, en lo referente a otros estados productores aglutina a 13 entidades. Durante el período 1995-2001, se cultivaron en promedio 72,709 hectáreas con bananos y plátanos, de las cuales el 32.1% se cultivan con riego y el 67.8% bajo condiciones de temporal, las áreas irrigadas con un rendimiento medio de 35 toneladas/hectárea/año aportan el 43% de la producción nacional, en tanto que las superficies de temporal aportan el otro 57% con rendimientos medios de 22.8 toneladas/hectárea/año. De acuerdo a datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), entre 2003 y 2007, México ocupó el octavo lugar de los principales productores de plátano con una producción promedio anual de 2,167,567 toneladas anuales y el lugar 20 como exportador con un registro promedio anual de 55,429 toneladas en ese periodo. Los precios de venta (de parte de los productores) de plátano son relativamente bajos y estacionales alcanzando un máximo histórico de 1.80 pesos/kg en marzo del 2003 y un mínimo histórico de 0.18 pesos/kg en septiembre del 2000.

Para la zafra 2011, la producción anual se reporta en la Tabla 1, en donde se puede apreciar que el cultivo de plátano se encuentra en las regiones costeras del Golfo de México y Océano Pacífico abarcando 15 estados de la República Mexicana de los cuales destacan por su volumen de producción Chiapas, Tabasco, Veracruz, Colima, Jalisco y Michoacán que en conjunto producen en promedio 1.9 millones de toneladas anuales que representan alrededor del 86% de la producción total nacional. Otros estados de gran importancia son Nayarit, Guerrero y Oaxaca.

**Tabla 1** Producción de Plátano 2011

| Ubicación    | Superficie Sembrada (Ha) | Superficie Cosechada (Ha) | Producción (Ton) | Rendimiento (Ton/Ha) | PMR (S/Ton)     | Valor Producción (Miles de Pesos) |
|--------------|--------------------------|---------------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Campeche     | 75                       | 75                        | 879.3            | 11.72                | 4559.45         | 4009.12                           |
| Chiapas      | 24426.57                 | 24394.57                  | 743292.88        | 30.47                | 2293.03         | 1704394.78                        |
| Colima       | 4980.56                  | 4980.56                   | 146958.52        | 29.51                | 1376.53         | 202293.11                         |
| Guerrero     | 3143                     | 3116.5                    | 74237.26         | 23.82                | 3643.86         | 270509.88                         |
| Hidalgo      | 2                        | 2                         | 22               | 11                   | 2800            | 61.6                              |
| Jalisco      | 2869.5                   | 2815.5                    | 124146.5         | 44.09                | 2013.98         | 250028.35                         |
| México       | 27                       | 27                        | 340.5            | 12.61                | 4929.52         | 1678.5                            |
| Michoacán    | 4073                     | 4065                      | 148781.6         | 36.6                 | 1914.91         | 284903.16                         |
| Morelos      | 18                       | 14                        | 428.39           | 30.6                 | 3086.69         | 1322.31                           |
| Nayarit      | 6700.5                   | 6665.25                   | 65240.29         | 9.79                 | 1869.39         | 121959.45                         |
| Oaxaca       | 3369.3                   | 3306.3                    | 53618.59         | 16.22                | 2481.46         | 133052.64                         |
| Puebla       | 2052.02                  | 2051.99                   | 33530.44         | 16.34                | 2544.68         | 85324.24                          |
| Quintana Roo | 479                      | 278                       | 4177.12          | 15.03                | 4015.92         | 16775                             |
| Tabasco      | 10654.04                 | 10636.04                  | 467576.47        | 43.96                | 2660.02         | 1243765.02                        |
| Tamaulipas   | 1                        | 0                         | 0                | 0                    | 0               | 0                                 |
| Veracruz     | 14866.57                 | 14112.57                  | 238566.63        | 16.9                 | 1942.79         | 463484.16                         |
| Yucatán      | 393                      | 387                       | 1565.4           | 4.04                 | 2815.42         | 4407.26                           |
|              | <b>78130.06</b>          | <b>76927.28</b>           | <b>210361.89</b> | <b>27.38</b>         | <b>44947.65</b> | <b>4787968.58</b>                 |

#### 1.4. Planteamiento del Problema

La cadena productiva de plátano es importante por la superficie sembrada, niveles de producción y empleos generados en nuestro país, pero tiene una gran problemática: Al igual que otras cadenas productivas no se ha diversificado y básicamente el único producto que ofrece es la fruta fresca, la cual tiene una vida de anaquel corta, es de trato delicado y su precio de venta (de los productores) es estacional y relativamente bajo. Todo esto conlleva a altos índices de rechazo y de fruta no cosechada reduciendo los márgenes de utilidad de los productores. Para el caso particular del plátano de exportación (variedad *Cavendish valery*) se desató un problema ambiental, dadas las exigencias en el control de calidad que acarrearón rechazos de fruta entre 20% y 25% v/v. Estos rechazos han sido objeto de

manipulación incontrolada, como: disponerlos a cielo abierto y en botaderos no autorizados, contribuyendo al daño del ecosistema; ya que, su degradación natural genera gases tóxicos y de efecto invernadero, atracción de vectores y producción de lixiviados que arremeten contra la calidad hídrica superficial y subterránea y la calidad de los suelos.

Con objeto de ofrecer una alternativa a esta problemática y con ello contribuir en la mejora del nivel de vida de la población rural se propone estudiar el proceso de reutilización de los residuos de fruta por su transformación a productos químicos con un valor agregado como puede ser el etanol.

### **1.5. Hipótesis.**

Por medio de hidrólisis ácida, de la pulpa de plátano es posible generar un jarabe azucarado adecuado para la producción de bioetanol vía fermentación.

### **1.6. Objetivo General:**

Plantear una alternativa de reutilización del plátano rechazado así como en avanzado estado de maduración para generar un jarabe azucarado factible a ser utilizado en el proceso de producción bioetanol.

#### **Objetivos Específicos:**

- Caracterizar químicamente los plátanos rechazados y no cosechados, así como los de estado de maduración avanzada.
- Determinar las condiciones de operación para la etapa de hidrólisis del proceso de producción de etanol a partir de fruta de plátano.

# Capítulo 2. Marco Teórico

---

## 2.1 Biomasa

La biomasa es materia orgánica originada en el proceso biológico denominado fotosíntesis, el cual se inicia con la captura de la energía luminosa y termina con la formación de carbohidratos. Es de hecho la única fuente renovable de energía que almacena de manera efectiva la energía solar y ha sido utilizada desde hace miles de años para satisfacer una gran variedad de necesidades de energía, incluida la generación de electricidad, calefacción, calefacción de hogares, combustibles para coches y suministro de calor para instalaciones industriales. Es de notarse que la leña sigue siendo la mayor fuente de energía a nivel mundial.

Las fuentes de biomasa son abundantes y variados en todo el globo terráqueo e incluyen a la madera, a los cultivos agrícolas y a sus respectivos residuos, a las plantas acuáticas y algas; así como, a residuos urbanos, desechos de animales, y algunos desechos industriales. Más específicamente las principales fuentes de biomasa pueden ser enlistadas como: cultivos agrícolas y sus respectivos residuos, residuos de la industria de la caña de azúcar, plantaciones forestales y sus residuos, licor negro de la industria de pulpa y papel, residuos de animales, aguas residuales, residuos sólidos municipales, etc.

Su uso como fuente de energía se da fundamentalmente de dos maneras:

- i) Directamente: Quemado de leña para usos domésticos de calefacción y cocción de alimentos.
- ii) Indirectamente: A través de la conversión a biocombustibles líquidos, gaseosos y sólidos tales como; bioetanol a partir de caña de azúcar y de maíz, biodiesel de aceites vegetales, biogás de residuos pecuarios y de rellenos sanitarios, briquetas y pellets de residuos agrícolas y forestales.

Al uso directo se le ha denominado con el término “tradicional” y al indirecto como “moderno” o “avanzado” ya que implica la aplicación de tecnologías de conversión hacia los biocombustibles mencionados. Las tecnologías de conversión para la utilización de

biomasa pueden ser separadas en 4 categorías: procesos de combustión directa, procesos termoquímicos, procesos bioquímicos y procesos agroquímicos.

Los niveles de energía de las diferentes presentaciones en las que se puede utilizar la biomasa o los biocombustibles están en el orden de 8 MJ/kg para la leña verde, 20 MJ/kg para la leña seca, de 23 a 40 MJ/kg para el carbón vegetal, de 29 MJ/kg para el bioetanol, alrededor de 40 MJ/Kg para el biodiesel y de 55 MJ/kg para el biogás.

El uso de biomasa como energético ha generado discusiones nivel mundial, con grupos a favor y en contra que han resaltado las siguientes bondades y limitaciones:

Bondades:

- i) Es una fuente renovable y su uso no contribuye al calentamiento global.
- ii) Tiene cantidades despreciables de azufre por lo que no contribuye a las emisiones de bióxido de azufre que causan la lluvia ácida.
- iii) La combustión de biomasa generalmente genera una menor cantidad de ceniza con respecto a la combustión de carbón.
- iv) Su conversión de en biocombustibles es una manera efectiva de reducir la problemática disposición de residuos municipales e industriales.
- v) Reduce la dependencia energética de fuentes fósiles.
- vi) Incentiva el desarrollo rural y agrícola.

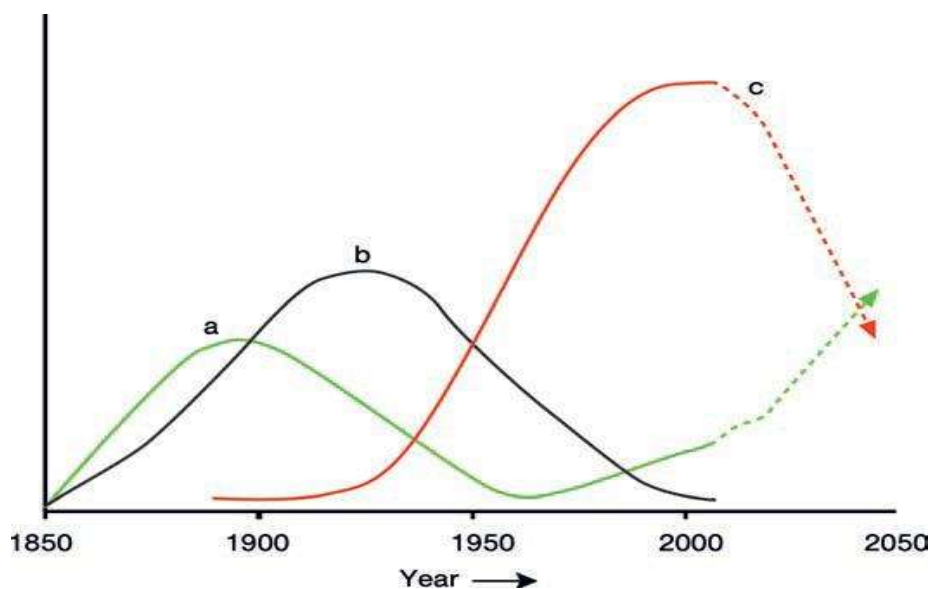
Limitaciones:

- i) Tiene una baja densidad lo que implica grandes volúmenes comparada con combustibles fósiles, lo que incrementa gastos de transporte o limita la posible localización de plantas químicas.
- ii) En el uso tradicional, su combustión incompleta genera emisiones de monóxido de carbono y de partículas orgánicas.
- iii) Su combustión a altas temperaturas puede generar óxidos de nitrógeno.
- iv) A falta de políticas de estado puede provocar deforestación con los consecuentes problemas ambientales y ecológicos.

- v) Puede generar conflictos por cambios de uso de suelo y poner en riesgo la seguridad alimentaria.

## **2.2 Carbohidratos.**

Los carbohidratos son compuestos orgánicos constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno, normalmente con una relación atómica hidrógeno/oxígeno de 2 a 1, por lo que su fórmula empírica, con algunas excepciones, es  $C_n(H_2O)_m$ . Se encuentran de manera natural en células vegetales como animales y son los compuestos orgánicos más abundantes sobre la tierra. Se ha estimado que la mitad del carbono orgánico terráqueo está en forma de carbohidratos, presente hasta en un 75 % del peso seco de las plantas. Tradicionalmente se han utilizado como el insumo principal en la dieta del ser humano, pero en los últimos años ha venido creciendo su uso comercial en áreas tan diversas como la industria de: adhesivos, fermentación, farmacéutica, textil y más recientemente como sustituto de las cadenas petroquímicas como se puede apreciar en la *Figura 4* de donde se puede concluir que se está regresando al paradigma del siglo XIX, ya que inicialmente las materias industriales estaban basadas en la biomasa (fuentes renovables), que posteriormente fue sustituida por el carbón y a partir del siglo XX por el petróleo y gas natural. Ante el abatimiento de las fuentes fósiles en el futuro cercano la biomasa nuevamente tomará su lugar que tenía históricamente.



**Figura 4** Evolución de las materias primas para la industria química

a) Fuentes renovables, b) Carbón y c) Fuentes fósiles

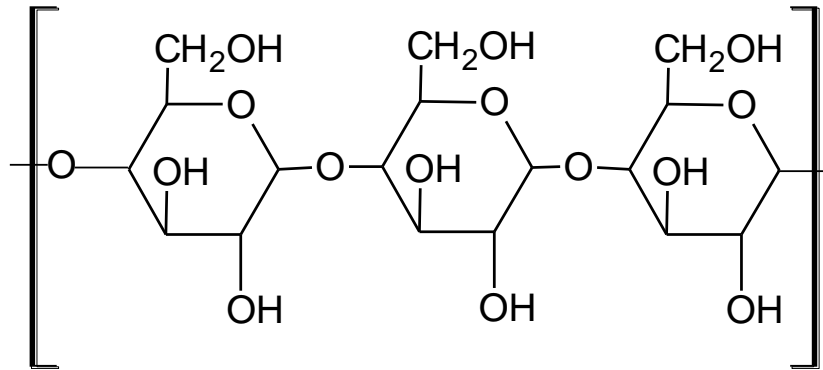
Lichtenthaler, F.W., (2012), Carbohydrates as Organic Raw Materials, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, USA.

Aun cuando se reporta que más de un 90% de los carbohidratos están en forma de polisacáridos, se pueden clasificar en: i) Monosacáridos representados por la glucosa, ii) Oligosacáridos con la sacarosa como su mayor manifestación y iii) Polisacáridos tales como la celulosa, hemicelulosa y almidón.

### 2.3. Almidón

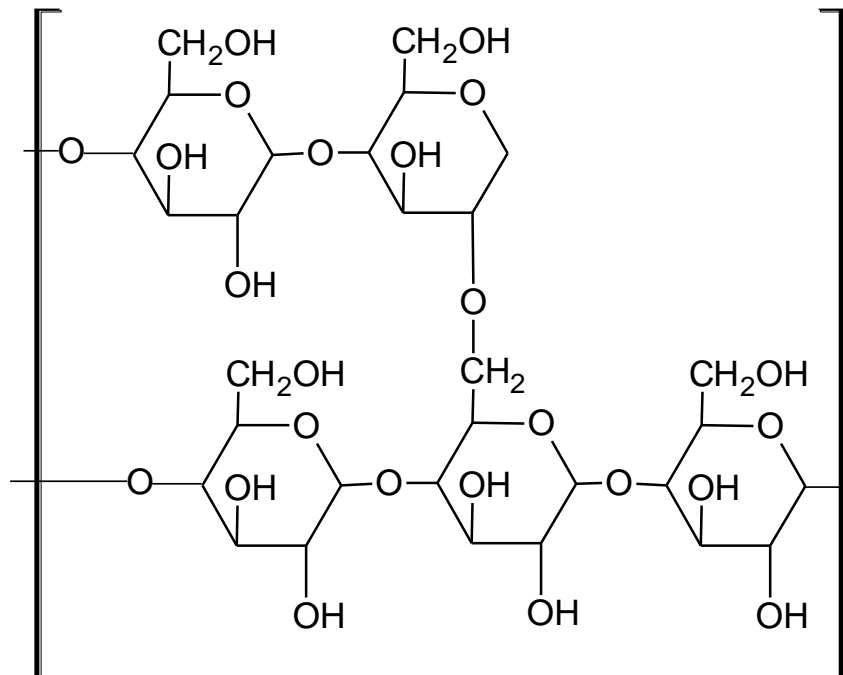
Es el componente principal de semillas de cereales (maíz, trigo, arroz, avena, cebada, sorgo, etc.) y de tubérculos comestibles (papa, mandioca, camote, etc.) por lo que es la principal fuente de carbohidratos de la dieta del ser humano. Normalmente está compuesto por un 28 % de amilosa (polisacárido lineal) y el resto de amilopectina (polisacárido ramificado), pero existen semillas que han sido modificadas genéticamente y que contienen un contenido mayoritario de amilosa. Estos almidones con un alto contenido de amilosa se caracterizan por tener una significativa asociación molecular por lo que se les ha denominado como almidones resistentes y también se presentan en algunas variedades de frijol, papas y plátanos verdes.

La amilasa es un polisacárido lineal formado por monómeros de glucosa en enlaces glucosídicos  $\alpha$  (1-4), mostrado en la *Figura 5*.



**Figura 5** Fórmula estructural de la amilosa

La amilopectina contiene ramificaciones que le dan una estructura molecular semejante a la de un árbol, cuyas ramificaciones están unidas al tronco central (semejante a la amilasa) por enlaces  $\alpha$ -D-(1,6), localizadas cada 15 o 25 unidades de glucosa y se reporta en la *Figura 6*.



**Figura 6** Fórmula estructural de la amilopectina

Puede apreciarse que ambos componentes son polímeros de glucosa que al ser sometidos a procesos de hidrólisis (ácida y/o enzimática) generan precisamente ésta última molécula.

## **2.4. Etanol**

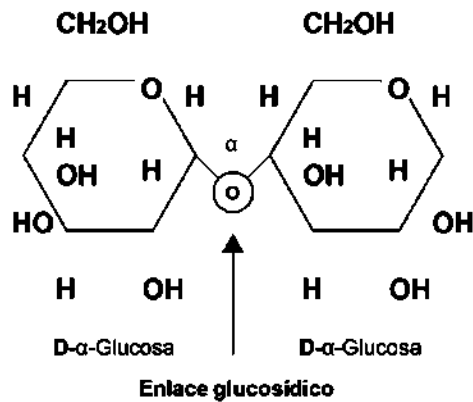
Con una producción mundial cercana a los 9E10 litros en el 2011 obtenidos en un 95 % vía fermentación (Litch, 2011), el bioetanol es el bioproducto de mayor utilización actualmente. El microorganismo básico para la fermentación ha sido la *Saccharomyces cerevisiae*, el cual utiliza los azúcares de diferentes materias primas de origen vegetal como la caña de azúcar, la remolacha, sorgo, melazas, etc., almidones (después su hidrólisis) de maíz, papa, cereales y de materiales celulósicos (después de su hidrólisis). Tradicionalmente se ha utilizado en bebidas alcohólicas, como solvente en la industria química y como combustible. Debido a sus ventajas técnicas, económicas, ambientales y estratégicas, ya que posibilita la disminución del consumo de gasolina y por lo tanto de la dependencia energética, en los últimos años su uso como combustible se ha incrementado hasta un 80% de su producción.

El etanol, de origen biomásico se considera un producto biodegradable, libre de azufre, como el carbono en su cadena es de origen vegetal, al ser liberado durante la combustión no contribuye en el balance neto de producción de dióxido de carbono, disminuyendo el efecto en el calentamiento global. Como es miscible en la gasolina puede ser usado mezclado o puro sin mayores dificultades y países como Brasil han desarrollado la tecnología necesaria en los motores, donde los cambios en el comportamiento mecánico del motor, son bien conocidos.

## 2.5. Hidrólisis

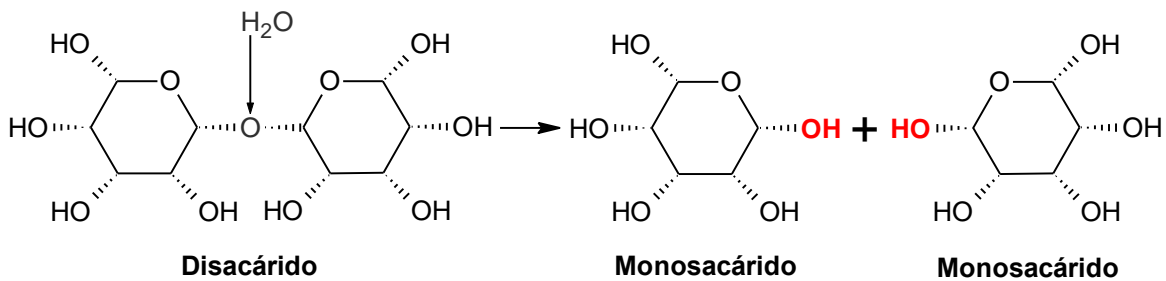
La hidrólisis es la reacción del agua con otro compuesto. Los polisacáridos, son compuestos que pueden ser transformados en sus respectivos monómeros por reacción de hidrólisis.

En el almidón, los monómeros de glucosa se encuentran unidos mediante un enlace carbono-oxígeno, denominado enlace glucosídico y que se muestra en la *Figura 7*.



*Figura 7* Enlace glucosídico

La hidrólisis se lleva a cabo cuando se rompe el enlace glucosídico mediante la adición de una molécula de agua, tal como se muestra en la *Figura 8*.



*Figura 8* Hidrólisis de un polisacárido ejemplificada por la hidrólisis de un disacárido

Generalmente, en las reacciones de hidrólisis es necesaria la intervención de catalizadores. Cuando una hidrólisis se lleva a cabo mediante la acción catalítica de ácido, se le llama

hidrólisis ácida. Por otro lado, si el catalizador es una enzima, se le llama hidrólisis enzimática.

## **2.6 Hidrólisis Ácida Cuantitativa, por el método de Browning.**

La hidrólisis ácida cuantitativa es una reacción en la que todos los polímeros son transformados a sus respectivos monómeros. Los monómeros son detectados mediante algún método analítico y se determina la cantidad total de cada polímero en el material. Los polímeros son expresados por lo general como glucanos, que son aquellos polímeros conformados por azúcares de seis carbonos; los xilanos y los arabanos, los cuales se conforman por azúcares de cinco carbonos.

## **2.7 Antecedentes**

El cultivo de plátano es quizás el más alto generador de residuos orgánicos, los cuales se pueden clasificar en dos tipos:

- i. Residuos agrícolas: Cada hectárea de cultivo de plátano genera alrededor de 220 toneladas de residuos compuestos principalmente de materiales lignocelulósicos (segunda generación) que pueden ser convertidos a composta, biogás, bioetanol, etc (Reddy et. Al. 2003).
- ii. Rechazo de producto: Debido a daños mecánicos y patológicos y a la calidad que el consumidor demanda aproximadamente un 30 % de la producción de plátanos es rechazada (Mazzeo, et. al. 2010; Clarke, et. al. 2008). Estos residuos por su composición química (básicamente almidones y azúcares) son considerados como materia prima de primera generación.

La composición química del plátano de rechazo está constituida mayoritariamente por carbohidratos y pequeñas cantidades de fibra celulósica. Su contenido de almidón y azúcares varía de acuerdo al tiempo de maduración: Para plátanos verdes (cascara verde) se reporta una composición de 61.7% de almidón, 0.2 % de azúcares reductores y 1.2 % de

sacarosa, en contraparte para plátanos maduros (cascara amarilla con muchos puntos cafés) el almidón se ha transformado hacia azúcares a tal grado que su composición es de 2.6 % de almidón, 33.6 % de azúcares reductores con un 53.2 % de sacarosa (Lii et. al. 1982).

En cuanto al proceso de producción de bioetanol a partir de plátano no se ha encontrado mucha información, lo cual pudiera considerarse como un área de oportunidad: En el trabajo inicial al cual se hace referencia realizaron estudios comparativos de sacarificación de cascara de plátano por medios ácido, enzimático y con vapor (Tewari, et. al. 1986). La máxima sacarificación se logró a una concentración de 2.5 % de ácido sulfúrico, 15 psia para tratamientos de 10 minutos. A mayores concentraciones y tiempos se obtuvieron efectos adversos. Con la sacarificación enzimática, con *Trichoderma reesei*, se logró un rendimiento de 61.1 % de etanol (mg etanol/g de azúcares reductores). Una década después aparece un trabajo para la producción de etanol a partir de plátanos (Hammond, et. al. 1996). En este trabajo se analiza el potencial de producción de etanol en función del grado de madurez del plátano llegando a la conclusión de que el mayor rendimiento se obtiene con los plátanos verdes debido a que en el periodo de maduración (10 días) se pierde alrededor del 15 % del peso de la materia prima fresca. Nuevamente casi una década después aparece otro trabajo (Afanador, 2005) en el cual se presenta el estado del arte del proceso de producción de alcohol anhidro a partir de plátano verde. Ya que el plátano verde (pulpa y cascara) contiene un alto contenido de almidón y celulosa las etapas reportadas son las habitualmente conocidas para este proceso: i) Hidrólisis (química o biológica), fermentación y finalmente separación y purificación (destilación extractiva, destilación con membranas, extracción supercrítica, adsorción y pervaporación). A partir de este se observa un ligero repunte en esta área coincidentemente en un país altamente productor de plátano como lo es Colombia: Monsalve y col. (2006) presentan un estudio de producción de etanol a partir de cascara de plátano. Por medio de hidrólisis ácida se obtuvieron 20 g/L de azúcares reductores pero no se aprecia una conversión considerable hacia etanol (menor de 0.1 g/L) por ninguno de los dos medios de fermentación utilizados (*Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis*). Finalmente se presenta un trabajo donde se realiza el análisis energético del proceso de producción de etanol a partir de plátano y sus residuos: los mejores resultados fueron a partir de fruta con un rendimiento de 360 L/ton con un

balance de energía de 1.9 MJ/MJ. A partir de materiales lignocelulosicos estos valores son relativamente mas bajos: 100 L/ton y 1.4 MJ/MJ (Velázquez-Arredondo y col. 2010).

## Capítulo 3. Metodología

---

### 3.1 Determinación de humedad

El porcentaje de humedad del plátano se determinó de la siguiente manera:

- 1 Se introdujeron tres crisoles a la estufa a 100 °C durante 24 h aproximadamente.
- 2 Se extrajeron, se colocaron en un desecador con sílica-gel durante 5 min.
- 3 Se determinó su peso individual ( $w_{c(i-1)}$ ) en una balanza analítica.
- 4 Se introdujeron a la estufa de nuevo.
- 5 Después de tiempo, se repitió el paso 2 y se obtuvieron sus pesos de nuevo ( $w_{c(i)}$ ).
- 6 Se comparó el peso uno,  $w_{c(i-1)}$  con  $w_{c(i)}$ . Si eran iguales, el peso de cada vidrio de reloj quedaba determinado; de lo contrario, se repetían los pasos 4,5 y 6 hasta alcanzar un peso constante ( $w_c$ ).
- 7 Se pesaron pequeñas cantidades conocidas (5 gramos) de plátano ( $W_{mh}$ ) dentro de los crisoles.
- 8 Se volvieron a introducir a la estufa durante aproximadamente 24 h hasta alcanzar un peso seco constante del crisol con la muestra seca ( $w_{cms}$ ).
- 9 Por diferencia entre  $w_{cms}$  y  $w_c$  se calculó el peso de la muestra seca ( $w_{ms}$ ).
- 10 Se calculó el porcentaje en peso de humedad para cada una de las 3 pruebas con la siguiente ecuación:

$$H = \frac{w_{mh} - w_{ms}}{w_{mh}} * 100$$

### **3.2 Hidrólisis Ácida Cuantitativa**

Se aplicó una hidrólisis cuantitativa para la determinación de la composición del sustrato.

El procedimiento consiste en una hidrólisis ácida, utilizando ácido sulfúrico, en diferentes tiempos y concentraciones, a una temperatura de 120°C tal como se describe a continuación:

- 1 Se pesó una cantidad conocida de sustrato (alrededor de 0.5 g de materia seca con 0.0001 g de precisión en la balanza analítica) en un tubo de ensaye.
- 2 Para una concentración de ácido al 1% se añadieron 8.8 g de agua y 0.1 g de ácido sulfúrico (al 72%, con una  $\rho=1.6338$ ). Para 2%, 8.7 g de agua y 0.3 g de ácido sulfúrico y por último para un 3%, 8.5 g de agua y 0.4 g de ácido sulfúrico.
- 3 Se introdujeron las diferentes muestras a una autoclave (modelo 25X-1), por 1, 2 y 3 h.
- 4 Al sacarlos, se enfriaron, después se filtraron a vacío, en un papel filtro de .45 $\mu$ . El filtrado que quedó en el papel filtro se introdujo a la estufa para determinar la cantidad de sustrato que se hidrolizó. El papel filtro se puso previamente a peso constante.
- 5 Ya filtradas las muestras se neutralizaron con óxido de calcio (cal apagada). Una vez neutralizadas, se volvieron a filtrar, obteniendo un jarabe con contenido de azúcares.

### **3.3 Hidrólisis química**

El procedimiento consiste en una hidrólisis ácida, utilizando ácido sulfúrico, en diferentes tiempos y concentraciones, así como temperatura tal como se describe a continuación:

- 1 Se pesó una cantidad conocida de sustrato (alrededor de 0.5 g de materia seca con 0.0001 g de precisión en la balanza analítica) en un tubo de ensaye.
- 2 Para una concentración de ácido al 1% se añadieron 8.8 g de agua y 0.1 g de ácido sulfúrico (al 72%). Para 2%, 8.7 g de agua y 0.3 g de ácido sulfúrico y por último para un 3%, 8.5 g de agua y 0.4 g de ácido sulfúrico.

- 3 Se introdujeron las diferentes muestras a una autoclave (modelo 25X-1), por 1, 2 y 3 h.
- 4 Al sacarlos, se enfriaron, después se filtraron a vacío, en un papel filtro de  $.45\mu$ . El filtrado que quedó en el papel filtro se introdujo a la estufa para determinar la cantidad de sustrato que se hidrolizó. El papel filtro se puso previamente a peso constante.
- 5 Ya filtradas las muestras se neutralizaron con óxido de calcio (cal apagada). Una vez neutralizadas, se volvieron a filtrar, obteniendo un jarabe con contenido de azúcares.

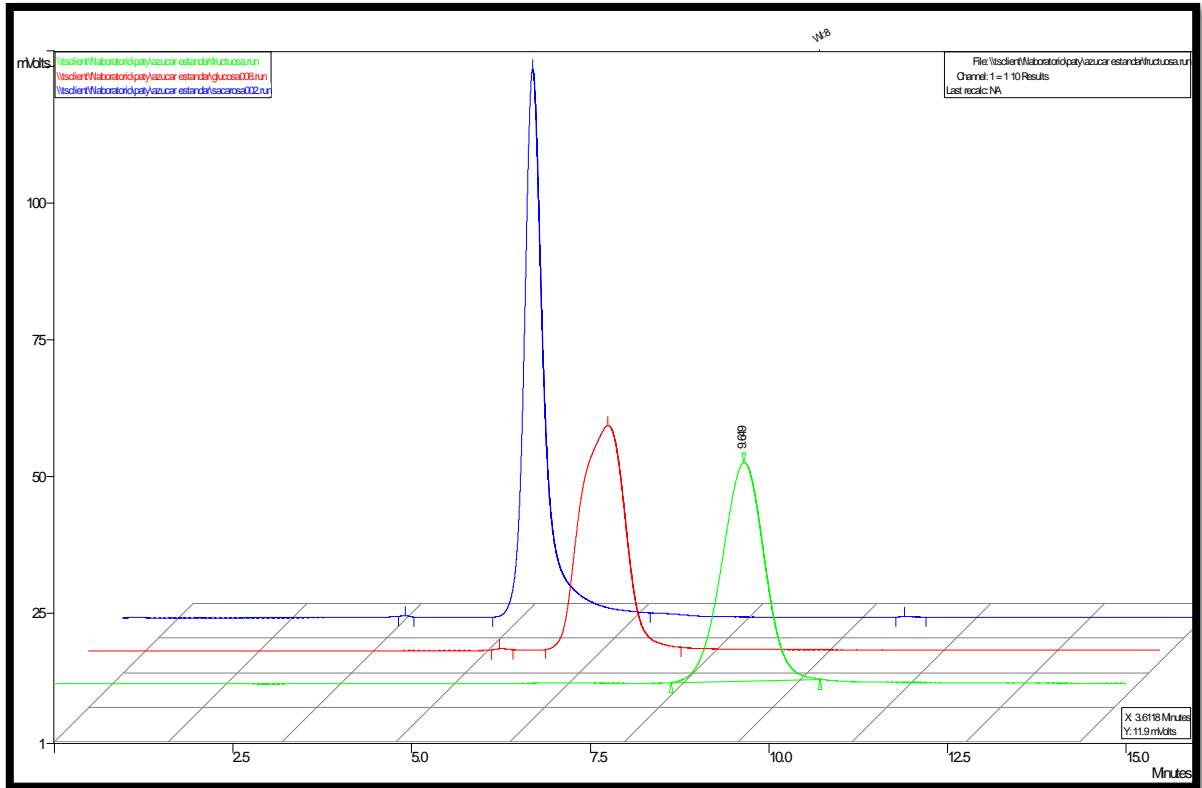
### **3.4 Métodos analíticos.**

#### **3.4.1 Determinación de azúcares**

La glucosa liberada en la hidrólisis fue medida por Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (CLAE) o HPLC (High Performance Liquid Chromatography) en sus siglas en Inglés. Se utilizó un cromatógrafo marca Varian Pro Star, modelo 350, con un detector IR.

Esto se llevó a cabo usando una columna analítica, 300 x 7.8 mm, MetaCarb 87C, marca Varian, A5200, para azúcares. Tomando alícuotas de 10  $\mu$ , usando como fase móvil agua grado HPLC.

- 1 Se tomaron 0.9 mL de filtrado y se aplicó una dilución 1:10, añadiendo 10 mL de agua destilada.
- 2 Se utilizó una jeringa de 10 mL y un filtro de  $0.22\mu$ , se llenó un vial para HPLC con una dilución 1:10.
- 3 Se analizó por HPLC hasta un tiempo de 30 min.
- 4 Se obtuvieron cromatogramas para cada muestra y se determinó la concentración (g/L) de glucosa por comparación con el cromatograma de una solución patrón, (se hizo una curva de calibración) tal como la *Figura 9*.



**Figura 9** Cromatograma de las muestras patrón

El pico de la glucosa se sitúa en un tiempo de retención de 7 min aproximadamente, con un área bajo la curva de 175.9 mvols\*sec que corresponde a una concentración de 0.993 g/L.

### 3.5 Diseño Experimental

La experimentación se llevó a cabo de acuerdo a un diseño factorial multinivel tal como se muestra en la [Tabla 2](#), en dónde se reporta lo siguiente: La cantidad e sustrato se mantuvo constante en cada una de las pruebas e igual a 1 g. Se manejan 3 variables independientes (factores): concentración de ácido sulfúrico, temperatura y tiempo de hidrólisis. Puede observarse que para la concentración de ácido sulfúrico se consideran 3 niveles, para la temperatura 2 y para el tiempo de hidrólisis 3. La variable de respuesta (dependiente) es la concentración de azúcares (glucosa+fructuosa) reportada en g/L.

**Tabla 2** Diseño experimental

| <b>Variables Fijadas</b>            | <b>Nomenclatura</b> | <b>Unidades</b> | <b>Niveles</b> |
|-------------------------------------|---------------------|-----------------|----------------|
| Cantidad de Sustrato                |                     | g               | 1              |
| Variables independientes (factores) |                     |                 |                |
| Concentración de Ácido              | $C_A$               | %(p/p)          | (1,2,3)        |
| Temperatura                         | T                   | °C              | (90, 120)      |
| Tiempo                              | t                   | h               | (1, 2, 3)      |
| Variable dependiente (respuesta)    |                     |                 |                |
| Concentración de Azúcares           | $C_{AR}$            | g/L             |                |

Por medio del software, Statgraphics X64, se determinan las corridas experimentales a realizar y la secuencia de la experimentación tal como se reporta en la Tabla 3. Además se realizaron 3 réplicas para cada una de las corridas experimentales.

Además se resalta que la experimentación se ejecutó para 3 niveles de maduración del plátano, los cuales se definen de la siguiente manera:

- i. Verde: Plátano con la cáscara completamente verde que equivaldría a la fruta recién cortada para su comercialización.
- ii. Amarillo: Plátano con la cáscara amarilla, aproximadamente entre 4 a 6 días después de su corte y almacenado al aire libre en el laboratorio.
- iii. Maduro: Plátano con la cáscara cubierta de manchas cafés, aproximadamente 12 días después de su corte y almacenado al aire libre en el laboratorio.

**Tabla 3** Malla de corridas experimentales

| <b>No. De corrida</b> | <b>Tiempo (h)</b> | <b>Concentración de Ácido Sulfúrico (%)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| 1                     | 1                 | 1                                           | 90                      |
| 2                     | 3                 | 2                                           | 120                     |
| 3                     | 2                 | 3                                           | 120                     |
| 4                     | 2                 | 3                                           | 90                      |
| 5                     | 2                 | 1                                           | 120                     |
| 6                     | 3                 | 1                                           | 120                     |
| 7                     | 3                 | 2                                           | 90                      |
| 8                     | 3                 | 3                                           | 120                     |
| 9                     | 2                 | 1                                           | 90                      |
| 10                    | 1                 | 2                                           | 120                     |
| 11                    | 1                 | 3                                           | 120                     |
| 12                    | 1                 | 1                                           | 120                     |
| 13                    | 2                 | 2                                           | 90                      |
| 14                    | 3                 | 3                                           | 90                      |
| 15                    | 1                 | 2                                           | 90                      |
| 16                    | 3                 | 1                                           | 90                      |
| 17                    | 2                 | 2                                           | 120                     |
| 18                    | 1                 | 3                                           | 90                      |

# Capítulo 4. Resultados y Discusión

---

## 4.1 Composición del sustrato.

El contenido de humedad en el sustrato obtenido fue de 73% a 78%, aumentando ésta conforme va madurando el plátano. De igual manera se incrementa el contenido de azúcar conforme se va madurando el plátano, esto debido a la transformación natural del almidón hacia azúcares tal como se reporta en la [Tabla 4](#).

*Tabla 4* Composición del sustrato

| Grado de maduración | Humedad (%w) | azúcar (g/L) |
|---------------------|--------------|--------------|
| Verde               | 73           | 1.272306965  |
| Amarillo            | 76           | 5.143705008  |
| Maduro              | 78           | 13.92371076  |

## 4.2 Hidrolisis química

En las [Tablas 5, 6 y 7](#) se muestran respectivamente para verde, amarillo y maduro, los concentrados globales de los resultados experimentales de acuerdo al diseño experimental anteriormente mencionado, dónde la variable de respuesta está reportada como el promedio de las 3 réplicas realizadas para cada una de las corridas. Para una mejor discusión de los resultados, según el grado de madurez del plátano, a continuación se reportan en forma gráfica y por etapa.

**Tabla 5** Malla de resultados experimentales para plátano verde

| No. De corrida | Tiempo (h) | Concentración de Ácido Sulfúrico (%) | Temperatura (°C) | Concentración de Azúcares (g/L) |
|----------------|------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1              | 1          | 1                                    | 90               | 1.352372651                     |
| 2              | 3          | 2                                    | 120              | 7.81361                         |
| 3              | 2          | 3                                    | 120              | 8.07277                         |
| 4              | 2          | 3                                    | 90               | 11.9326082                      |
| 5              | 2          | 1                                    | 120              | 7.68538                         |
| 6              | 3          | 1                                    | 120              | 9.11043                         |
| 7              | 3          | 2                                    | 90               | 9.248193456                     |
| 8              | 3          | 3                                    | 120              | 9.33102                         |
| 9              | 2          | 1                                    | 90               | 2.441991959                     |
| 10             | 1          | 2                                    | 120              | 9.77871                         |
| 11             | 1          | 3                                    | 120              | 12.00414                        |
| 12             | 1          | 1                                    | 120              | 2.4912                          |
| 13             | 2          | 2                                    | 90               | 9.78269759                      |
| 14             | 3          | 3                                    | 90               | 8.129619102                     |
| 15             | 1          | 2                                    | 90               | 4.950635972                     |
| 16             | 3          | 1                                    | 90               | 7.715501003                     |
| 17             | 2          | 2                                    | 120              | 9.17967                         |
| 18             | 1          | 3                                    | 90               | 6.113516031                     |

**Tabla 6** Malla de resultados experimentales para plátano amarillo

| No. de corrida | Tiempo (h) | Concentración de Ácido Sulfúrico (%) | Temperatura (°C) | Concentración de Azúcares (g/L) |
|----------------|------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1              | 1          | 1                                    | 90               | 5.701347973                     |
| 2              | 3          | 2                                    | 120              | 8.710264594                     |
| 3              | 2          | 3                                    | 120              | 10.28176606                     |
| 4              | 2          | 3                                    | 90               | 11.26823496                     |
| 5              | 2          | 1                                    | 120              | 11.26971787                     |
| 6              | 3          | 1                                    | 120              | 12.37624403                     |
| 7              | 3          | 2                                    | 90               | 10.2177716                      |
| 8              | 3          | 3                                    | 120              | 8.286670274                     |
| 9              | 2          | 1                                    | 90               | 9.242655671                     |
| 10             | 1          | 2                                    | 120              | 14.23693295                     |
| 11             | 1          | 3                                    | 120              | 11.62816702                     |
| 12             | 1          | 1                                    | 120              | 9.054788797                     |

|    |   |   |     |             |
|----|---|---|-----|-------------|
| 13 | 2 | 2 | 90  | 14.02381898 |
| 14 | 3 | 3 | 90  | 10.38266197 |
| 15 | 1 | 2 | 90  | 10.63119448 |
| 16 | 3 | 1 | 90  | 11.44       |
| 17 | 2 | 2 | 120 | 10.48095509 |
| 18 | 1 | 3 | 90  | 9.441813873 |

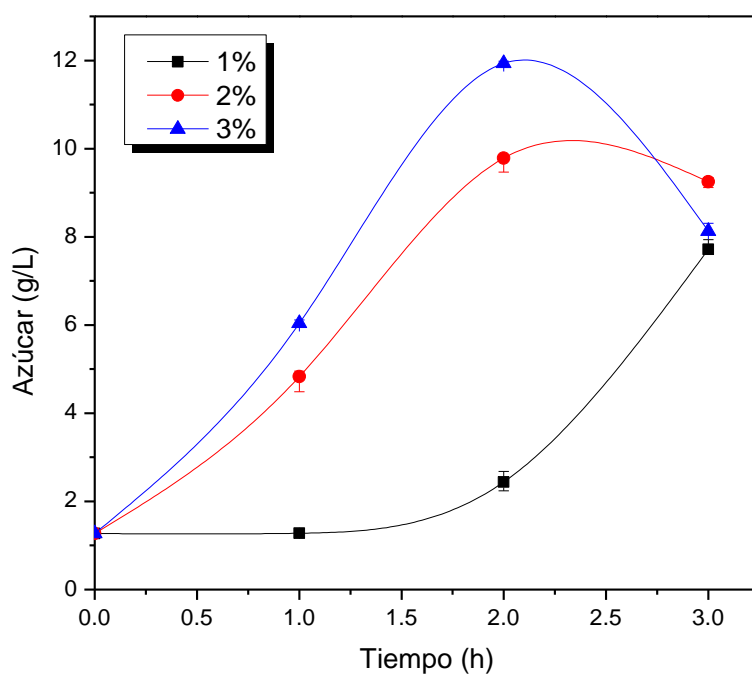
**Tabla 7** Malla de resultados experimentales para plátano maduro

| No. de corrida | Tiempo (h) | Concentración de Ácido Sulfúrico (%) | Temperatura (°C) | Concentración de Azúcares (g/L) |
|----------------|------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1              | 1          | 1                                    | 90               | 15.50196237                     |
| 2              | 3          | 2                                    | 120              | 7.562720467                     |
| 3              | 2          | 3                                    | 120              | 8.284981883                     |
| 4              | 2          | 3                                    | 90               | 8.541076186                     |
| 5              | 2          | 1                                    | 120              | 10.32206484                     |
| 6              | 3          | 1                                    | 120              | 10.39844654                     |
| 7              | 3          | 2                                    | 90               | 7.064494476                     |
| 8              | 3          | 3                                    | 120              | 5.755207299                     |
| 9              | 2          | 1                                    | 90               | 20.2127441                      |
| 10             | 1          | 2                                    | 120              | 8.02730878                      |
| 11             | 1          | 3                                    | 120              | 8.635088392                     |
| 12             | 1          | 1                                    | 120              | 20.43911519                     |
| 13             | 2          | 2                                    | 90               | 8.195644431                     |
| 14             | 3          | 3                                    | 90               | 8.018044891                     |
| 15             | 1          | 2                                    | 90               | 3.920868237                     |
| 16             | 3          | 1                                    | 90               | 10.16246567                     |
| 17             | 2          | 2                                    | 120              | 7.269392522                     |
| 18             | 1          | 3                                    | 90               | 3.91145366                      |

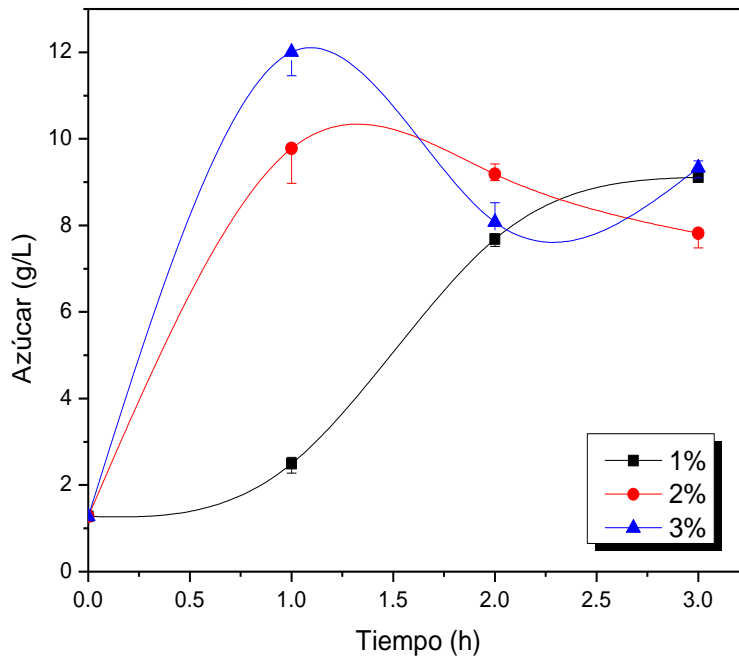
#### 4.2.1 Plátano verde

De los resultados experimentales de la hidrólisis ácida de plátano verde que se reportan en las *Figuras 10 y 11* se observa lo siguiente: Para los niveles inferiores de temperatura y concentración de ácido sulfúrico la velocidad de hidrólisis es relativamente baja a tal grado que para el máximo de tiempo ensayado la concentración de azúcares está por debajo de los 12 g/L. Al incrementar la temperatura se incrementa la velocidad de hidrólisis, pero no de

manera significativa. La concentración de ácido sulfúrico también tiene un efecto positivo sobre la velocidad de hidrólisis obteniéndose un máximo en la concentración de azúcares y una posterior declinación de la misma. Aun cuando no se analizaron productos de degradación, la explicación de esto último es que a ciertos niveles de la concentración de ácido sulfúrico se presentan reacciones de degradación de los azúcares lo cual no es provechoso de acuerdo al fin de esta investigación. Pudiera ser útil si el objetivo fuera la producción de productos de degradación de azúcares tales como furfurales.



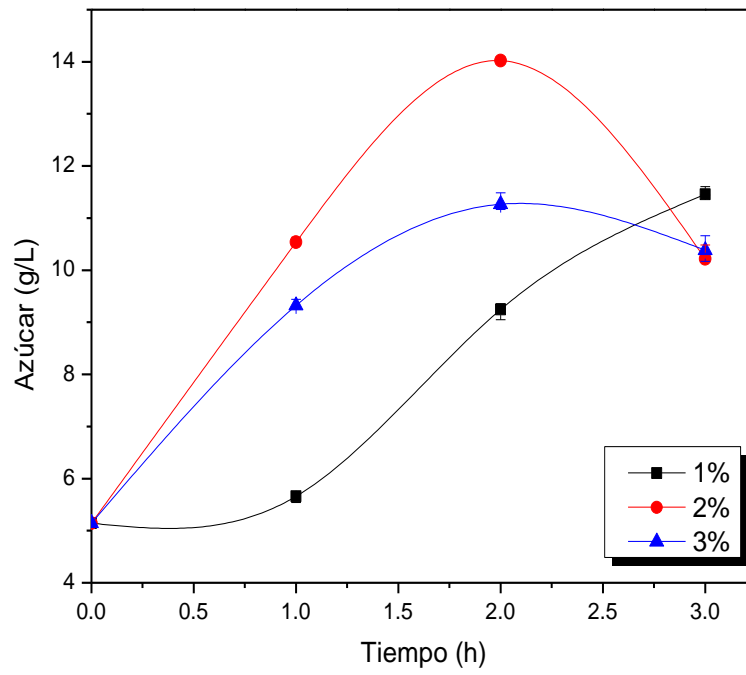
**Figura 10** Hidrólisis de plátano verde a 90 °C



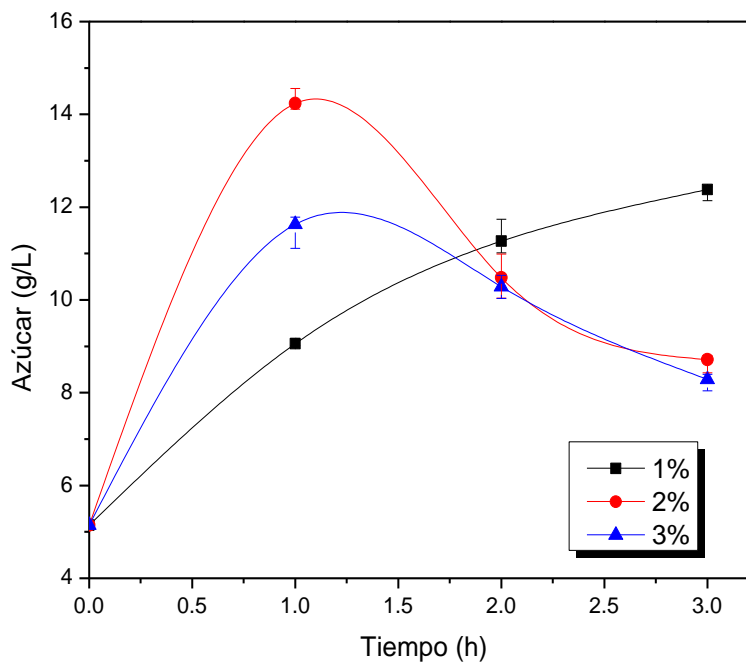
**Figura 11** Hidrólisis de plátano verde a 120 °C

#### 4.2.2 Plátano amarillo

Tal como se reporta en las *Figuras 12 y 13* se observa un comportamiento similar que el obtenido para los plátanos verdes. Aun cuando la velocidad de hidrólisis se ha incrementado con respecto a los plátanos verdes esto no se ve reflejado de manera significativa ya que el máximo logrado para la concentración de azúcares es ligeramente mayor, con un valor de 14 g/L. La velocidad de degradación se incrementa lo cual hace pensar que dicha reacción es dependiente de la cantidad de azúcares presentes en el sistema reaccionante.



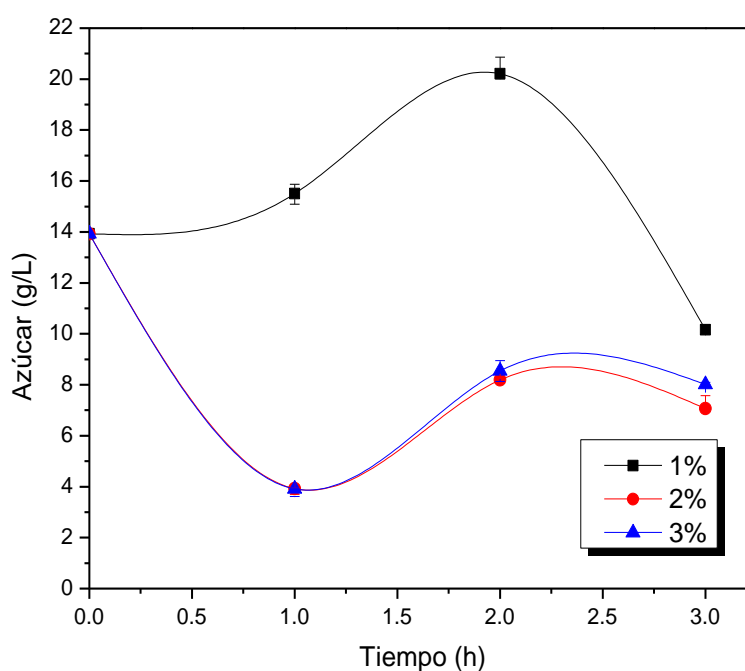
**Figura 12** Hidrólisis de plátano amarillo a 90 °C



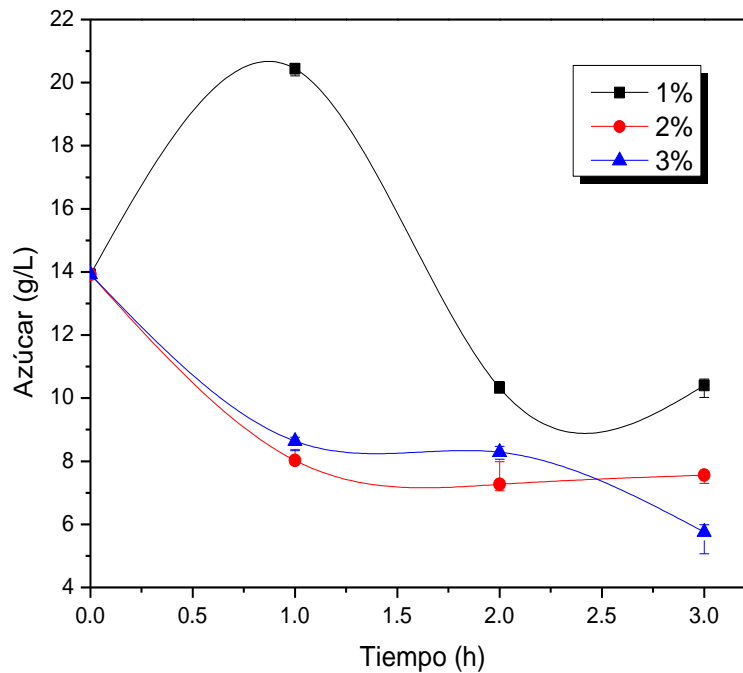
**Figura 13** Hidrólisis de amarillo a 120 °C

#### 4.2.2 Plátano maduro

Para el sustrato en este nivel de maduración se obtuvieron perfiles diferentes que para los niveles menos maduros tal como se muestran en las *Figuras 14 y 15*. Para baja concentración de catalizador se observa que inicialmente hay formación de azúcares, llegando a un máximo de alrededor de los 21 g/L. A partir de esta concentración la velocidad de degradación se incrementa a tal grado de consumirse casi totalmente los azúcares que estaban presentes.



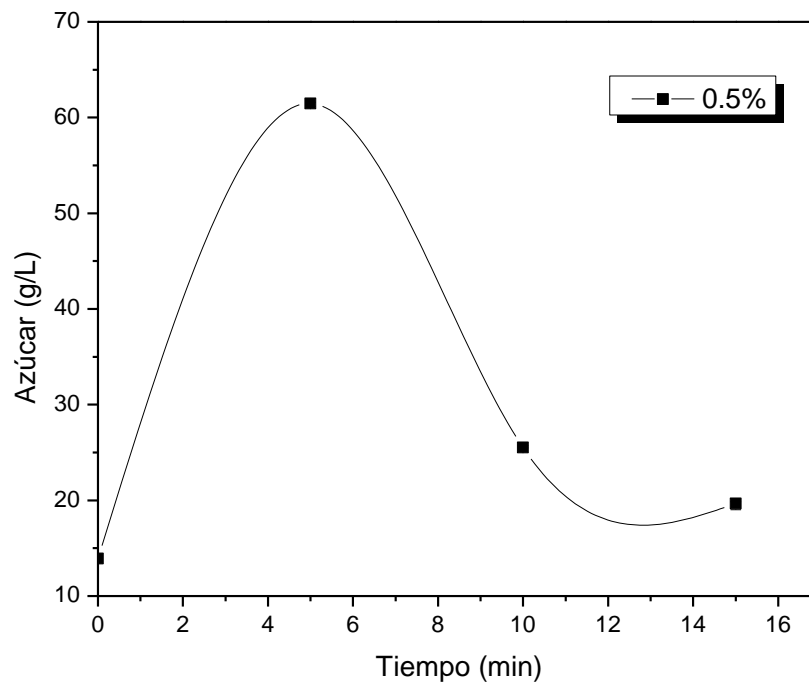
*Figura 14* Hidrólisis de plátano maduro a 90 °C



**Figura 15** Hidrólisis de plátano maduro a 120 °C

Por lo anterior se puede concluir que la temperatura tiene un impacto importante y positivo sobre la hidrólisis ácida de la pulpa de plátano. Con respecto a la concentración del ácido sulfúrico se puede concluir que se requiere un cierto nivel de acidez para que se lleve a cabo la reacción de hidrólisis, pero que tiene un efecto más grande sobre la reacción de descomposición a tal grado que a niveles altos es más rápida la descomposición de los azúcares con respecto a su formación.

Con el objetivo de probar estas aseveraciones, se realizó una corrida experimental adicional utilizando plátano maduro, un nivel alto de temperatura (120 °C) y un valor bajo de la concentración de ácido sulfúrico (0.5 %). La *Figura 16* muestra los resultados de esta prueba: Puede notarse que se ejecutó para tiempos más cortos y que por la concentración de azúcares obtenida, mayor a 60 g/L, a estas condiciones se ha favorecida inicialmente la reacción de hidrólisis hacia azúcares para finalmente llevarse a cabo su degradación.



**Figura 16** Hidrólisis de plátano maduro a 120 °C y baja concentración de ácido sulfúrico

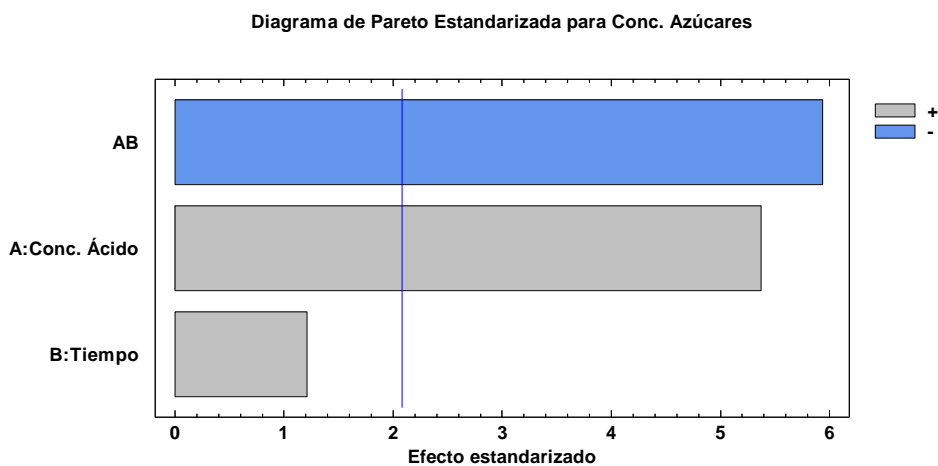
### 4.3 Análisis estadístico de los resultados

Con el objetivo de probar estadísticamente lo anteriormente concluido y para determinar efectos sinérgicos de las variables, los resultados experimentales fueron manipulados por medio del software Statgraphics X64 para realizar estudios de análisis de varianza, construir diagramas de Pareto y superficies de respuesta. En este análisis estadístico se fijó la temperatura en el nivel alto (120 °C) ya que a este valor la velocidad de hidrólisis es alta y se deja como variables la concentración del ácido sulfúrico y el tiempo de reacción para cada una de las etapas de maduración de la materia prima.

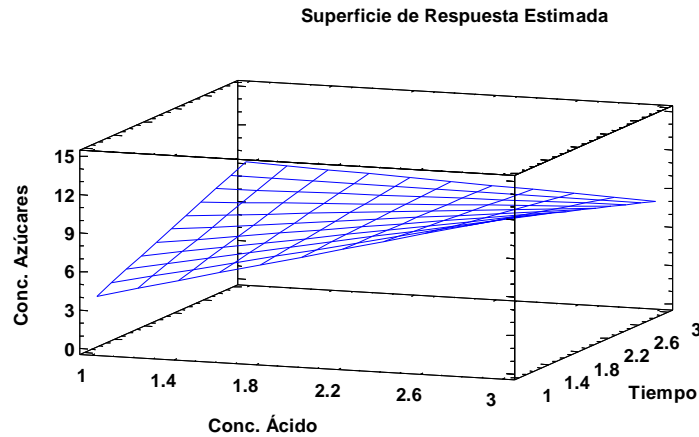
#### 4.3.1 Plátano Verde

En la *Figura 17* se reporta el efecto de la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de la hidrólisis para plátano verde: Se observa que la concentración de ácido sulfúrico tiene un efecto positivo sobre la velocidad de generación de azúcares y que además hay un efecto combinado negativo de la interacción de la ésta variable con el tiempo, lo cual muestra que aunque baja se presenta la reacción de descomposición de azúcares. La *Figura 18* muestra

la superficie de respuesta para este mismo nivel de maduración del plátano: se aprecia que para niveles bajos de las variables básicamente no hay reacción de hidrólisis y que conforme se incrementa la concentración de ácido sulfúrico se obtiene una mayor cantidad de azúcares para finalmente tener el efecto combinado negativo de las variables a estudio. La concentración máxima es de 12.02 y se logra a una concentración de 3% de ácido sulfúrico para un tiempo de reacción de 1 horas.



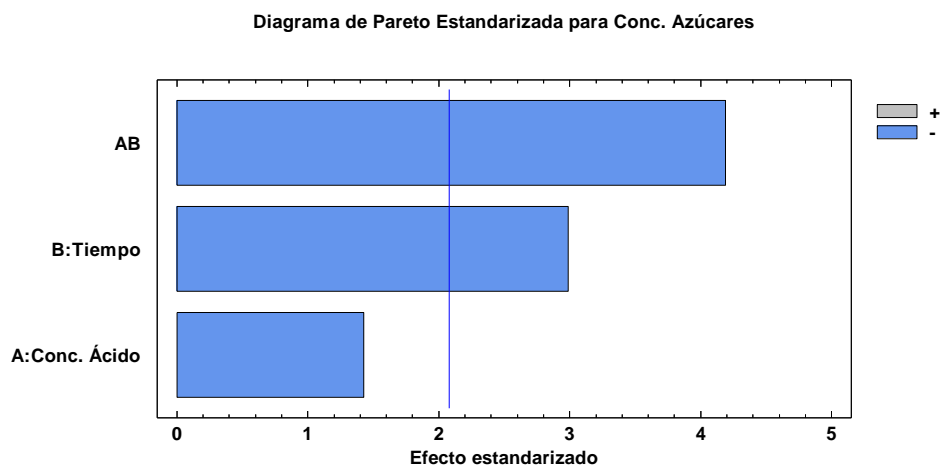
**Figura 17** Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano verde a 120 °C



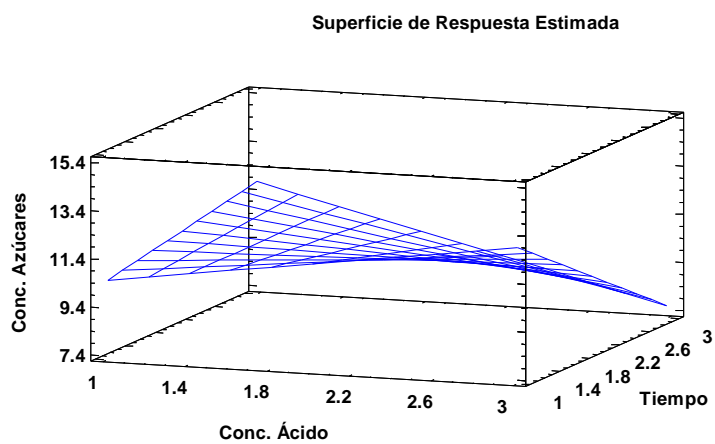
**Figura 18** Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano verde a 120 °C

#### 4.3.2 Plátano Amarillo

Tal como se observa en la *Figura 19* para este nivel de maduración los efectos significativos pero de una manera negativa son la interacción de la concentración de ácido sulfúrico con el tiempo de reacción y ésta última variable de manera individual. La concentración de ácido sulfúrico de manera individual tiene un efecto negativo pero no estadísticamente significativo. La curva de respuesta de la *Figura 20* muestra claramente que a niveles altos de éstas variables la concentración de azúcares disminuye considerablemente debido a la reacción de degradación. La concentración máxima es de 14.55 y se logra a una concentración de 2% de ácido sulfúrico para un tiempo de reacción de 1 horas.



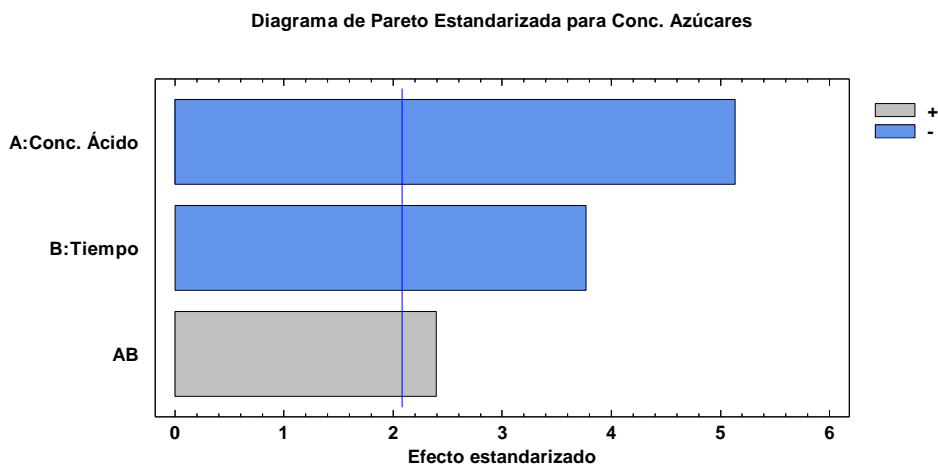
**Figura 19** Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano amarillo a 120 °C



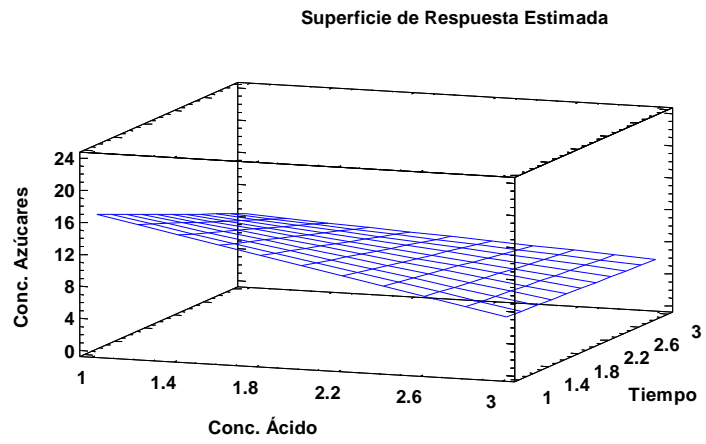
**Figura 20** Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano amarillo a 120 °C

### 4.3.3 Plátano Maduro

Como ya se había comentado y tal como se ve en la *Figura 21*, para plátano maduro las dos variables tienen un efecto significativo pero de manera negativa lo que significa que para niveles altos la velocidad de degradación de los azúcares producidos es mayor que la velocidad de formación de ellos. Al analizar la superficie de respuesta de la *Figura 22* como una sábana plana pudiera inferirse que no hay un impacto significativo de estas variables, pero lo que sucede es que la velocidad de degradación es tan alta que no permite la acumulación de azúcares en el sistema reaccionante. La concentración máxima es de 20.58 y se logra a una concentración de 2% de ácido sulfúrico para un tiempo de reacción de 1 horas.



**Figura 21** Efecto de las variables para la hidrólisis de plátano maduro a 120 °C



**Figura 22** Superficie de respuesta para la hidrólisis de plátano maduro a 120 °C

# Conclusiones

---

1. El plátano es una fuente de biomasa adecuada para la producción jarabes azucarados que por medio de fermentación pueden ser llevados a productos químicos y/o biocombustibles como el bioetanol.
2. La cantidad de azúcares en la pulpa del plátano es función de su grado de madurez, de niveles bajos para plátano verde a niveles alto para plátano maduro.
3. La temperatura tiene un efecto positivo sobre la velocidad de producción de azúcares por medio de hidrólisis ácida.
4. La concentración de ácido sulfúrico también tiene un efecto positivo sobre la velocidad de producción de azúcares por medio de hidrólisis ácida, pero a niveles altos cataliza una reacción secundaria de degradación de los azúcares.
5. Las mejores condiciones de operación de la hidrólisis ácida son a un nivel alto de la temperatura, 120 °C, y un nivel bajo de la concentración de ácido sulfúrico, 0.5%. Para un tiempo de 5 minutos se obtiene un jarabe con una concentración de 60 g/L de azúcares.
6. Por medio de hidrólisis ácida es posible producir jarabes azucarados a partir de la biomasa del plátano con una concentración adecuada para llevarlos a otros productos como el bioetanol por medio de fermentación.

# Referencias

---

- Afanador, A.M., (2005), “El banana verde de rechazo en la producción de alcohol carburante”, Revista EIA 3, 51-68.
- Arias, P., Danker, C., Liu, Pascal and Pilkauskas, P. (2003), “The World Banana Economy” 1985-2002, FAO, Rome Italy.
- Clarke, W.P, Radnidge, P., Lai, T.E., Jensen, P.D. and Hardin, M.T. (2008), “Digestion of waste bananas to generate energy in Australia”, Waste Management 28, 527–533
- F.O. Litch: “Global Ethanol Production to Reach 88.7 Billion Litres in 2011”, Renewable Fuels Association. <http://www.ethanolrfa> (accedido 01 de agosto del 2012).
- Hammond, J.B., Egg, R., Diggins, D. and Coble, C.G., (1996), “Alcohol from bananas”, Bioresource Technology 56, 125-130.
- Lii, C.Y., Chang, S.M. and Young, Y.L., (1981), “Investigation of physical and chemical properties of banana starches”, Journal of Food Science, 47, 1493-1497.
- Mazzeo, M., León, L. y Mejía, L.F, (2010), “Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y postcosecha del plátano en el Departamento de Caldas”, Revista Educación en Ingeniería 9, 128-139.
- Reddy, G.V., Ravindra Babu, P., Komaraiah, P., Roy, K.R.R.M. and I.L. Kothari, I.L., (2003), “Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two *Pleurotus* species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*)”, Process Biochemistry 38, 1457-1462.

Tewari, H.K., Marwaha, S.S. and Rupal, K., (1986), "Ethanol from banana peels", *Agricultural wastes*, 16, 135-146.

Velázquez-Arredondo, H.I., Ruiz Colorado, A.A. and De Oliveira Junior, S., (2010), "Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis", *Energy* 35, 3081-3087.