



Instituto Tecnológico de Toluca

**“OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS RESIDUOS DE  
COCO MEDIANTE UN PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO Y ÁCIDO”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA  
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:  
DIANA BRACAMONTES ALCÁNTARA  
No. CONTROL:  
M23280229**

**DIRECTORA DE TESIS:  
DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN**

**CODIRECTOR DE TESIS:  
DR. FREDY CUELLAR ROBLES**



Metepec, Edo. de México, **21/Enero/2026**  
DEPI-3200-041/2026

**DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**P R E S E N T E**

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la Tesis denominada **"OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS RESIDUOS DE COCO MEDIANTE UN PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO Y ÁCIDO"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de **MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL** presenta el **C. DIANA BRACAMONTES ALCANTARA** con número de control **MM23280229** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

**A T E N T A M E N T E**

  
**DRA. MARIA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN**  
**DIRECTORA DE TESIS**

  
**DR. FREDY CUELLAR ROBLES**  
**CODIRECTOR DE TESIS**

  
**DRA. MARIA DEL CONSUELO HERNANDEZ**  
**BERRIEL**  
**REVISORA DE TESIS**

  
**DR. NICOLAS FLORES ALAMO**  
**REVISOR DE TESIS**

ccp. Archivo  
JSJ/mccl



**2026**  
año de  
**Margarita**  
**Maza**





**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO



**Instituto Tecnológico de Toluca**  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 21/Enero/2026  
DEPI-3200-042/2026

**DIANA BRACAMONTES ALCANTARA**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA**  
**EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTE**

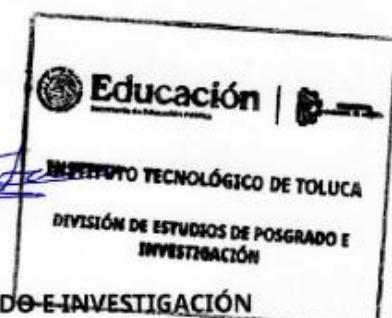
De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES DE LOS RESIDUOS DE COCO MEDIANTE UN PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO Y ÁCIDO"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
"Educación, integridad y ciencia"

  
**JORGE SÁNCHEZ JAIME**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN**  
**DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo  
JSJ/mccl



**2026**  
año de  
**Margarita Maza**



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México, C.P. 52149,  
Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200, e-mail: info@toluca.tecnm.mx  
toluca.tecnm.mx

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Dios porque sin ÉL nada podría ocurrir.

A la Dra. María del Carmen Carreño de León por su paciencia, dedicación y atención para la ejecución del proyecto.

A los Doctores Fredy Cuellar Robles y Nicolás Flores Álamo por sus conocimientos, retroalimentación y apoyo.

A mi esposo y a mi hija porque han sido parte de este proceso.

A CONAHCYT por la beca otorgada.

Al Instituto Tecnológico de Toluca por la disposición para desarrollo del proyecto de investigación.

## RESUMEN

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Una alternativa de las energías limpias se encuentra disponible en la generación de combustibles utilizando materiales orgánicos residuales ya que contiene biomasa lignocelulósica, que después de diferentes tratamientos, se obtienen azúcares los cuales se fermentarán para obtener combustible orgánico.

Para este proyecto se produjeron azúcares fermentables utilizando residuos de coco debido a que están compuestos de hemicelulosa, celulosa y lignina; se trataron dos grupos de muestras, el primero se sometió a un pretratamiento hidrotérmico con agua a 70° C durante 30 minutos, posteriormente se realizó hidrólisis ácida con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 M. El siguiente grupo de muestras únicamente se sometieron a hidrólisis ácida usando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 M. Para ambos grupos, el tiempo de reacción con el ácido fue de: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 min.

A las muestras de residuo de coco se les realizó la caracterización antes y después de los tratamientos; a través de la espectroscopia de infrarrojo se identificaron enlaces OH, CH y C-O que demostraron presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Para la muestra de coco que no se le aplicó ningún tratamiento se observó una composición de celulosa de 38.40 % y 61.65 de hemicelulosa. Para la muestra a la que se aplicó pretratamiento hidrotérmico, presentó 40.65% de celulosa y 58.9% de hemicelulosa, para esta última se encontró que incluye 42.65% de celulosa y 56.95% de hemicelulosa, por lo que los tratamientos que se apliquen al residuo influyen en la producción de componentes generadores de azúcares.

Se generó mayor cantidad de azúcares fermentables en las muestras a las que se realizó pretratamiento hidrotérmico; en un tiempo de 120 y 300 min con 1.59 y 1.78 g/L respectivamente, por otro lado, para las muestras a las que se aplicó hidrólisis la mayor generación de azúcares fue en un tiempo de 150 min con una generación de 0.81 g/L. Por lo que el pretratamiento hidrotérmico influye en la generación de azúcares, ya que permite preparar el residuo para acceder a los componentes del mismo y obtener mayor cantidad de compuestos que generan azúcares.

## ABSTRACT

Renewable energies represent clean, inexhaustible, and increasingly competitive sources of power.

Among the alternatives within clean energy, the production of fuels from residual organic materials stands out, as these contain lignocellulosic biomass. Through various treatments, sugars can be obtained and subsequently fermented to generate biofuels.

In this project, fermentable sugars were produced using coconut residues, which are composed of hemicellulose, cellulose, and lignin. Two sets of samples were analyzed: the first underwent hydrothermal pretreatment with water at 70 °C for 30 minutes, followed by acid hydrolysis with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 M; the second set was subjected exclusively to acid hydrolysis with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 M. For both groups, reaction times with the acid were established at 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, and 300 minutes.

Characterization of the coconut residues was performed before and after treatment. Infrared spectroscopy revealed OH, CH, and C–O bonds, confirming the presence of cellulose, hemicellulose, and lignin.

The untreated coconut sample exhibited a composition of 38.40% cellulose and 61.65% hemicellulose. The hydrothermally pretreated sample showed 40.65% cellulose and 58.9% hemicellulose, while the sample subjected only to acid hydrolysis contained 42.65% cellulose and 56.95% hemicellulose. These results demonstrate that the applied treatments influence the production of sugar-generating components.

A higher yield of fermentable sugars was obtained in the hydrothermally pretreated samples: 1.59 g/L at 120 minutes and 1.78 g/L at 300 minutes. In contrast, the samples subjected solely to acid hydrolysis reached their maximum sugar yield at 150 minutes, with 0.81 g/L. These findings highlight the importance of hydrothermal pretreatment, as it facilitates access to the structural components of the residue, thereby enhancing the production of sugar-generating compounds.

# CONTENIDO

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS                                                     | IV   |
| RESUMEN                                                             | V    |
| ABSTRACT                                                            | VI   |
| CONTENIDO                                                           | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                                   | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS                                                    | IX   |
| INTRODUCCIÓN                                                        | 1    |
| 1. Fundamentos                                                      | 3    |
| 1.1 Impacto ambiental                                               | 3    |
| 1.2 Residuos agrícolas                                              | 3    |
| 1.3 Residuos lignocelulósicos agroindustriales                      | 4    |
| 1.4 Residuos de coco                                                | 5    |
| 1.5 Composición y estructura de la biomasa lignocelulósica          | 8    |
| 1.5.1 Polisacáridos                                                 | 8    |
| 1.5.2 Lignina                                                       | 9    |
| 1.6 Pretratamientos de biomasa lignocelulósica                      | 11   |
| 1.6.1 Pretratamiento químico                                        | 11   |
| 1.6.2 Biológicos                                                    | 12   |
| 1.6.3 Pretratamiento físico                                         | 12   |
| 1.6.4 Pretratamiento combinado                                      | 12   |
| 1.6.5 Hidrólisis                                                    | 13   |
| 1.7 Temperatura                                                     | 14   |
| 1.8 Inhibidores en la hidrólisis ácida                              | 15   |
| 2. Método                                                           | 16   |
| 2.1 Obtención del residuo                                           | 16   |
| 2.2 Acondicionamiento del residuo                                   | 16   |
| 2.3 Pretratamiento hidrotérmico a diferentes tiempos                | 17   |
| 2.4 Hidrólisis ácida                                                | 17   |
| 2.5 Caracterización del residuo de coco                             | 18   |
| 2.6 Cuantificación de los azúcares obtenidos de la hidrólisis ácida | 18   |
| 2.6.2 Método DNS                                                    | 19   |
| 2.6.2 Curva de calibración                                          | 19   |
| 2.6.3 Determinación de inhibidores                                  | 19   |
| 3. Resultados                                                       | 21   |
| 3.1 Caracterización del residuo                                     | 21   |
| 3.1.1 Espectroscopia infrarrojo                                     | 21   |
| 3.1.2 Análisis termogravimétrico                                    | 23   |
| 3.1.3 Calorimetría diferencial de barrido                           | 24   |
| 3.1.4 Análisis por MEB                                              | 26   |
| 3.1.5 Determinación de celulosa y hemicelulosa                      | 29   |
| 3.2 Cuantificación de azúcares e inhibidores                        | 29   |
| 3.2.1 Cuantificación de azúcares                                    | 29   |
| 3.2.2 Cuantificación de furfural                                    | 32   |
| 3.2.3 Cuantificación de HMF                                         | 35   |
| Conclusiones                                                        | 36   |
| Referencias                                                         | 37   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                    |                                                                                         |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.1</b>  | Partes del coco                                                                         | 7  |
| <b>Figura 1.2</b>  | Estructura primaria de la celulosa                                                      | 8  |
| <b>Figura 1.3</b>  | Estructura de la lignina                                                                | 10 |
| <b>Figura 1.4</b>  | Distribución del material lignocelulósico en plantas                                    | 10 |
| <b>Figura 2.1</b>  | Diagrama de flujo del proyecto                                                          | 16 |
| <b>Figura 3.1</b>  | Espectro del residuo de coco sin lavar y lavado                                         | 21 |
| <b>Figura 3.2</b>  | Espectro del residuo de coco y grupos funcionales                                       | 22 |
| <b>Figura 3.3</b>  | Espectro de IR de la fibra de coco de la región de Guerrero, México                     | 22 |
| <b>Figura 3.4</b>  | Termogramas del residuo sin tratamiento y con hidrólisis                                | 23 |
| <b>Figura 3.5</b>  | Termograma del residuo de coco sin tratamiento y con hidrólisis                         | 24 |
| <b>Figura 3.6</b>  | Termograma Calorimetría diferencial de barrido de la celulosa y sus derivados.          | 25 |
| <b>Figura 3.7</b>  | Micrografía del residuo de coco antes del tratamiento                                   | 26 |
| <b>Figura 3.8</b>  | Análisis EDS del residuo de coco                                                        | 26 |
| <b>Figura 3.9</b>  | Micrografía del residuo de coco después de la hidrólisis                                | 27 |
| <b>Figura 3.10</b> | Análisis EDS del residuo de coco después de la hidrólisis                               | 28 |
| <b>Figura 3.11</b> | Micrografía del residuo de coco después de un tratamiento químico                       | 28 |
| <b>Figura 3.12</b> | Generación de azúcares de muestras con pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis ácida | 30 |
| <b>Figura 3.13</b> | Generación de azúcares de muestras con hidrólisis ácida                                 | 31 |
| <b>Figura 3.14</b> | Generación de azúcares en muestras con ambos tratamientos                               | 32 |
| <b>Figura 3.15</b> | Generación de furfural en muestras de coco con Pretratamiento hidrotérmico + hidrólisis | 33 |
| <b>Figura 3.16</b> | Generación de furfural muestras de hidrólisis                                           | 34 |
| <b>Figura 3.17</b> | Generación de furfural para ambos grupos de muestras                                    | 34 |
| <b>Figura 3.18</b> | Generación de HMF muestras de hidrólisis                                                | 35 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 Resultados de determinaciones        | 29 |
| Tabla 3.2 Diferencia de generación de azúcares | 32 |

## INTRODUCCIÓN

La carestía de los combustibles fósiles, la preocupación por su agotamiento, la protección ambiental (CO<sub>2</sub> principalmente) y la dependencia energética de países con escasos recursos energéticos convencionales impulsan el desarrollo de las energías renovables. Según la Agencia Internacional de la Energía, la energía renovable es la que deriva de procesos naturales que se reponen constantemente, es decir, la que se obtiene de las continuas corrientes de energía recurrentes en el entorno natural (Romero, 2010).

La biomasa lignocelulósica es conocida como una fuente de energía potencial renovable y económica debido al material abundante en la mayoría de los países, especialmente en Asia (Chapla *et al.*, 2011). Grandes cantidades de lignocelulosa generada a través de la silvicultura, la agricultura y las agroindustrias se clasifican como residuos que causan daño ambiental problema de contaminación debido a la gran acumulación en la naturaleza. La utilización de la biomasa como fuente renovable de materia prima para diversas aplicaciones industriales es una gran alternativa para resolver el problema. Por ejemplo, la conversión de biomasa en bioenergía es un proceso seguro y respetuoso con el medio ambiente y podría sustituir a los combustibles fósiles en una manera sostenible debido al proceso que libera dióxido de carbono y dióxido de azufre que se convierten en una seria amenaza para la salud humana (Roberto *et al.*, 2003).

La degradación o bio conversión de la biomasa contribuye no sólo a la producción de productos potenciales, pero también elimina la contaminación ambiental causada por su acumulación y abundancia en la naturaleza (Howard *et al.*, 2003). La biomasa lignocelulósica ha sido conocida como un material que se considera como la única fuente sostenible de carbono en la tierra y apto para producir combustibles y productos químicos finos con cero emisiones de carbono (Ragauskas *et al.*, 2006).

Actualmente la biomasa proporciona una fuente de energía, adicional a la de combustibles fósiles para obtener calor, electricidad y carburantes empleados en el sector transporte, por lo que puede contribuir en la reducción de la contaminación atmosférica por gases de efecto invernadero y ante la problemática de los residuos agrícolas y debido a la necesidad de incorporar combustibles no contaminantes que posean un alto poder calorífico y tengan un campo de aplicabilidad amplio es por ello que el presente proyecto presenta la propuesta para aprovechar los residuos agrícolas específicamente los del coco para obtener azúcares

fermentables a través de tratamientos químicos y posteriormente usarlos para la generación de biocombustible.

El objetivo general de la presente investigación fue provechar el residuo de coco para la obtención de azúcares fermentables utilizando un pretratamiento hidrotérmico y un ácido; los objetivos específicos de la investigación fueron: obtener y acondicionar el residuo mediante secado y molienda, obtener azúcares fermentables a partir de un pretratamiento hidrotérmico (vapor de agua) del residuo de coco a diferentes tiempos y usando ácido sulfúrico a cierta concentración, determinar la cinética de hidrólisis para cada condición y establecer los perfiles de producción de azúcares fermentables y furfural a partir de las cinéticas de hidrólisis generadas con cada tiempo de pretratamiento hidrotérmico.

En el capítulo 1 del presente trabajo se encuentran los fundamentos para entender el origen de los biocombustibles y la necesidad de usarlos, las opciones de biomasa lignocelulósica que actualmente se tiene, así como los datos del residuo que se trabajó en este proyecto, se exponen los diferentes métodos para la producción de azúcares, así como la influencia de los pretratamientos en un residuo. En el capítulo 2 se describe la metodología que se desarrolló para la generación de azúcares fermentables, lo cual abarcó la obtención del residuo, su acondicionamiento para poder tratar la muestra; posteriormente se explica cómo se aplicó el pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis a un grupo de muestras y sólo hidrólisis a otro grupo de muestras. Finalmente, se detalla el proceso de caracterización del residuo antes y después de los tratamientos, esto con la finalidad de verificar los cambios que se generan por la influencia del ácido en el material. En el capítulo 3 se presentan los resultados e interpretación de los datos obtenidos de la investigación, la caracterización de los residuos se realizó con las siguientes técnicas: Espectroscopia de infrarrojo, en cual se determinó la presencia de celulosa en el residuo; Análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la descomposición del material a una temperatura; Calorimetría diferencial de barrido (DSC) para conocer si el residuo puede ser estable con algún cambio de temperatura. También se realizó el análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) la cual es una técnica para observar la morfología del residuo de coco, antes y después del tratamiento; por último, se determinó celulosa y hemicelulosa. Finalmente se colocan las conclusiones derivadas de la investigación.

## **1. FUNDAMENTOS**

### **1.1 Impacto ambiental**

La generación de residuos agrícolas, frutícolas y florícolas (desechos agroindustriales) se ha incrementado de manera proporcional al crecimiento poblacional, ya que la demanda alimenticia propicia una mayor cantidad de hectáreas cultivadas. Se considera que la agricultura y la industria de procesamiento de alimentos son los principales contribuyentes a la producción anual total de desechos sólidos. El problema de los residuos agrícolas radica en la mala disposición: vertido incontrolado de los desechos, así como la eliminación mediante la quema, generándose problemas como:

- Contaminación atmosférica: Para disminuir la cantidad de residuos generados, los agricultores optan por la eliminación mediante la quema, provocando gases de efecto invernadero.
- Deterioro del paisaje: Gran parte de los residuos sólidos se vierten en tiraderos a cielo abierto para descomponerse, ofreciendo un hogar para las ratas y otros organismos portadores de enfermedades. Además, pueden producirse lixiviados que se filtran en el agua subterránea contaminándola.
- Riesgos para la salud: Los desechos arrojados al aire libre atraen moscas, ratas, entre otras plagas que actúan como vectores de las enfermedades y las propagan entre los seres humanos (Casco & Herrero, 2008).

### **1.2 Residuos agrícolas**

Es aquella fracción de un cultivo que no constituye propiamente la producción, parte de la cosecha que no cumple con los requisitos de calidad mínima para ser comercializada como tal. Estos residuos se obtienen de los restos de cultivos o de limpiezas que se hacen del campo para evitar las plagas. La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros), y aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante es desechada en basureros y tiraderos a cielo abierto causando así grandes problemas ambientales (Casco & Herrero, 2008).

### 1.3 Residuos lignocelulósicos agroindustriales

Son definidos como aquellos residuos o subproductos de cultivos cosechados y que posteriormente han pasado por un proceso de modificación o procesamiento en industrias conserveras (Lázaro & Arauso, 2004).

Actualmente se considera que los residuos lignocelulósicos son compuestos orgánicos que pueden ser reinvertidos en el ciclo productivo de las empresas que los generan si se sigue un manejo sustentable de los mismos; mediante el compostaje generando biofertilizantes o de la forma más rápida utilizándolos como fuente de alimentos para los animales (Lázaro & Arauso, 2004).

Los materiales lignocelulósicos se componen de lignina, hemicelulosa y celulosa. La celulosa está compuesta de largas cadenas de moléculas de glucosa, unidas por enlaces  $\beta$  1-4 glucosídicos, los cuales hacen que la cadena sea recta y de un número de polimerización mayor de 1000 y dependiendo del origen hasta 10,000 a 20,000 (Han, 2008). La hemicelulosa también se compone de largas cadenas, pero a diferencia de la celulosa contiene pentosas, la composición exacta de la hemicelulosa depende de la fuente del material celulósico.

La biomasa lignocelulósica compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina, y ceniza (Kumar et al., 2009). Las composiciones de lignocelulosa juegan un papel importante en el desempeño de la conversión de biomasa en productos de alto valor (Mood *et al.*, 2013). Las propiedades químicas de estos componentes los convierten en sustrato de enorme valor biotecnológico (Howard *et al.*, 2003).

Recientemente, se han realizado muchas investigaciones para encontrar la fuente de biomasa, principalmente material lignocelulósico que potencialmente se puede convertir en muchos valores agregados como productos químicos, biocombustibles, fuentes de energía baratas para la fermentación, nutrientes humanos y mejores alimentos para animales. La principal fuente de la biomasa lignocelulósica son desechos agrícolas, como paja de trigo, paja de arroz, madera (madera dura), subproductos de los sobrantes de la molienda del maíz, cultivos anuales y perennes, papel de desecho y sorgo dulce (Visioli *et al.*, 2014).

## 1.4 Residuos de coco

Debido a la presencia del coco en las regiones tropicales y subtropicales de todos los continentes, se desconoce su centro de origen. Su dispersión por el mundo se le atribuye a que los cocos flotantes que son llevados por corrientes marinas o por acarreo del hombre en barcos como fuente de alimento y bebida.

Beneficios en diversos sectores:

- Jardinería: los cocoteros son plantados tanto en arboledas como en calles urbanas e incluso se venden como plantas de interior. La madera del tronco se utiliza en la fabricación de macetas ornamentales.
- Industria: la copra es una materia prima vital para la extracción de aceite y la fabricación de jabones, cosméticos y shampoos.
- Ganadería: diversos subproductos del coco, como la harina, son utilizados como alimento para el ganado; además, las hojas del coco se emplean como forraje en épocas de escasez.
- Agricultura: la fibra de coco se ha convertido en un sustrato hortícola alternativo de gran potencialidad en el cultivo sin suelo y otros subproductos se utilizan para enmendar suelos y preparar abonos orgánicos.
- Alimentación: la pulpa del coco es una fuente importante de energía y un ingrediente clave en la repostería local.
- Medicina: el coco tiene numerosas aplicaciones medicinales, incluyendo propiedades antisépticas, bactericidas y diuréticas, siendo utilizado tradicionalmente para tratar una variedad de enfermedades y dolencias.
- Ecología: la presencia de cocoteros contribuye a la regulación del microclima y la protección de los suelos, siendo un elemento importante en la conservación del medio ambiente.

Producción:

- La producción nacional fue de 474 mil 139 toneladas, 16.9 % más que la producción promedio de los últimos 10 años.
- Guerrero, Jalisco y Sinaloa son los principales productores.
- Las grandes extensiones destinadas al cultivo de coco permiten disponer de este producto todo el año.

- El volumen de exportación en 2020 fue de 25 mil 9 toneladas
- Usos de la palma de coco:
  - a) Cubierta del fruto: de ella se saca fibra para la fabricación de fibras textiles y de aislantes térmicos.
  - b) Cáscara dura o endocarpio: se utiliza como combustible, para obtener carbón y como vasija o recipiente.
  - c) Agua de coco: es una bebida agradable y refrescante.
  - d) Pulpa: sus principales productos son el aceite y la copra.
  - e) Inflorescencias: de éstas se obtiene azúcar y una bebida alcohólica.
  - f) Hojas y troncos: se emplean como materiales de construcción, combustibles, techos, cestos, sombreros, cercos, bastones y escobas.
  - g) Aceite de coco: se usa en la fabricación de una gran variedad de productos como surfactantes y espumas estabilizadoras para detergentes, shampoos, cosméticos, compuestos farmacéuticos, inhibidores de la corrosión, emulsificantes y plastificantes. En la industria alimenticia se utiliza como aceite para freír, para la elaboración de helados, cremas para café, galletas, margarinas, por mencionar algunos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022).

La variedad cocos nucifera L., es considerada una fruta tropical de aspecto redondeado cuyas dimensiones oscilan entre 20 a 30 cm, pudiendo alcanzar pesos de hasta 2,5 kg. Es un fruto tropical que presenta una forma redondeada, mide de 20–30 cm de largo y puede llegar a pesar hasta 2,5 kg. El fruto del cocotero se compone de una capa externa o exocarpio que se presenta suave o lignificado, en el mesocarpio se tienen tejidos fibrosos duros y constituye el 35% del total del fruto, en la parte más interna se encuentra la porción conocida como endocarpio que por lo general rodea a la semilla, conocida de manera común como testa (León, 1987).

La fibra de coco es considerada como una de las más duras y de menor longitud comparándola con otras fibras vegetales. El diámetro medio de las fibras es 1 mm y en longitud llegan a medir entre 15 y 30 cm. Las fibras obtenidas del coco están constituidas principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, componentes que le otorgan las propiedades absorción y retención de agua; la composición química de las fibras de coco depende en gran parte del grado de madurez del fruto, variedad y lugar de cultivo. Un aspecto tecnológico de gran importancia corresponde a su resistencia a la tensión, por lo que tienen la función de ser tejido de soporte.

Su excelente capacidad de estiramiento le confieren diversas aplicaciones en los campos de la construcción, química analítica y el tratamiento de efluentes industriales (Anirudhan *et al.*, 2007).

La fibra de estopa de coco, también llamada fibra bonote, presenta 3 tipos principales: fibra esteras o hilo: larga y fina, fibra de cerda: más tosca, y fibra para colchones: fibra más corta (Cavides, 1994).

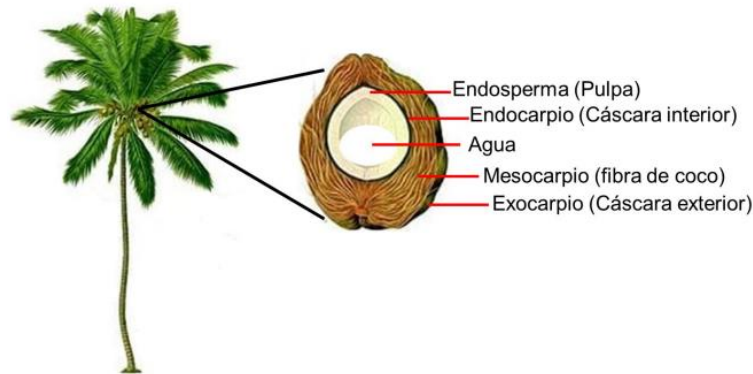


Figura 1.1 Partes del coco

La actividad de producción de coco genera muchos residuos que afectan a las condiciones medio ambientales de todas las zonas de comercialización, debido a que la cascara del coco viene a ser una fibra difícil de degradar si no se genera un tratamiento, por lo cual las personas que comercializan este tipo de producto, tan solo se dedican en desechar la cascara en zonas aledañas como quebradas colindados en ríos, botaderos de basura, en calles o en cualquier sitio para deshacerse de este desecho (Quintero, 2003).

La fibra de coco se clasifica por el grado de la madurez del fruto, ya que mientras más maduro la fibra se tornará de color café claro y es más rígida debido al contenido de lignina en su estructura. En el caso de la fibra del fruto verde es más flexible de color blanco, pero esta es más susceptible a daño por microorganismos dado que contiene mayor humedad. La fibra de coco es la única fibra natural relativamente resistente a los daños provocados por el agua salada (Freire, 2012).



## 1.5 Composición y estructura de la biomasa lignocelulósica

Los materiales lignocelulósicos tienen tres componentes fundamentales, los polisacáridos, la lignina y otras sustancias que no forman parte de la pared celular.

### 1.5.1 Polisacáridos

El componente polisacárido comprende carbohidratos de alto peso molecular (celulosa y hemicelulosa), que representan entre el 60-80 % del total de los materiales lignocelulósicos (Oliva, 2003).

- Celulosa

La celulosa que es el biopolímero formado por D-glucosa, es el material orgánico más abundante sobre la corteza terrestre, además, es el principal componente estructural de la pared celular de las plantas, la cual otorga resistencia mecánica y estabilidad química. Las moléculas largas de celulosa llamadas microfibrillas, forman haces por los puentes de hidrógeno que se crean entre los numerosos grupos  $\text{-OH}$  de los anillos de glucosa (Roy & Kumar, 2013).

La celulosa, componente mayoritario de las paredes celulares de las fibras de madera, es un polímero lineal de  $\beta$ -D-Glucosa con un peso molecular de aproximadamente 500.000. Las moléculas individuales de glucosa están unidas por enlaces  $\beta$ -(1,4), según se muestra en la figura 1.1. El número de azúcares de cadena (grado de polimerización G.P.), varía en los diferentes materiales celulósicos.

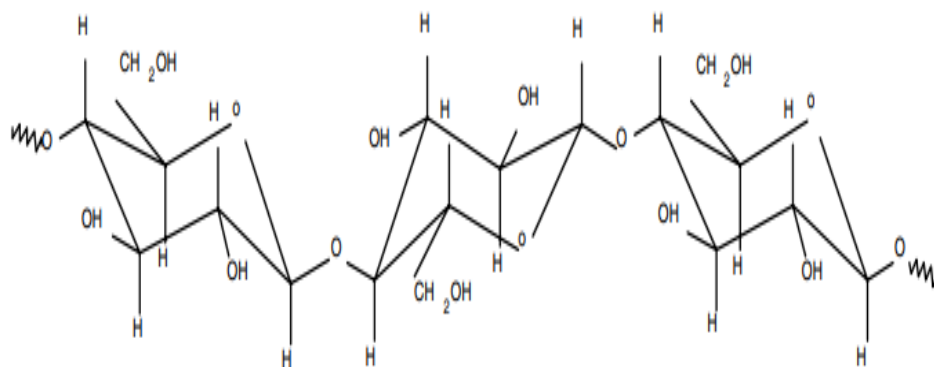


Figura 1.2 Estructura primaria de la celulosa

- Hemicelulosa

Las hemicelulosas están constituidas por polímeros de unidades de anhidro azúcares unidas por enlaces glucosídicos, formadas por más de un tipo de azúcar (hexosas o pentosas), y además presentan ramificaciones y sustituciones. Su papel es suministrar la unión entre la lignina y la celulosa. En estado natural existe en forma amorfa con un grado de polimerización que no excede de 200 (G.P.).

Existen dos tipos de hemicelulosas que se encuentran tanto en las maderas duras como en las blandas: los xilanos y los glucomananos (Oliva, 2003). Es el segundo polímero más abundante (20-50 %) de la biomasa lignocelulósica, es heterogénea y está compuesta por pentosas, hexosas y azúcares acetilados (Agbor *et al.*, 2011). El peso molecular de la hemicelulosa, el grado de cristalinidad y la resistencia mecánica son mucho menores que los de la celulosa. La hemicelulosa es un polímero ramificado y su composición en términos de monosacáridos difiere mucho de especie a especie (Kalia *et al.*, 2011).

#### 1.5.2 Lignina

Es la tercera fracción mayoritaria de la biomasa lignocelulósica. Se trata de un polímero tridimensional amorfo formado por la polimerización deshidrogenativa de unidades de fenilpropano ligadas por diferentes tipos de enlaces que se alternan de manera desordenada. Los monómeros que forman la lignina son los denominados alcoholes cinamílicos, diferenciados entre sí por las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático. Así, el alcohol p-cumarílico que da lugar a las unidades phidroxifenilo (unidades H) no presenta ningún sustituyente; el alcohol coniferílico que da lugar a las unidades guayacilo (unidades G) presenta un grupo metoxilo en la posición 3 del anillo aromático y el alcohol sinapílico que da lugar a las unidades siringilo (unidades S) presenta dos grupos metoxilo en posiciones 3 y 5 de dicho anillo (Oliva, 2003).

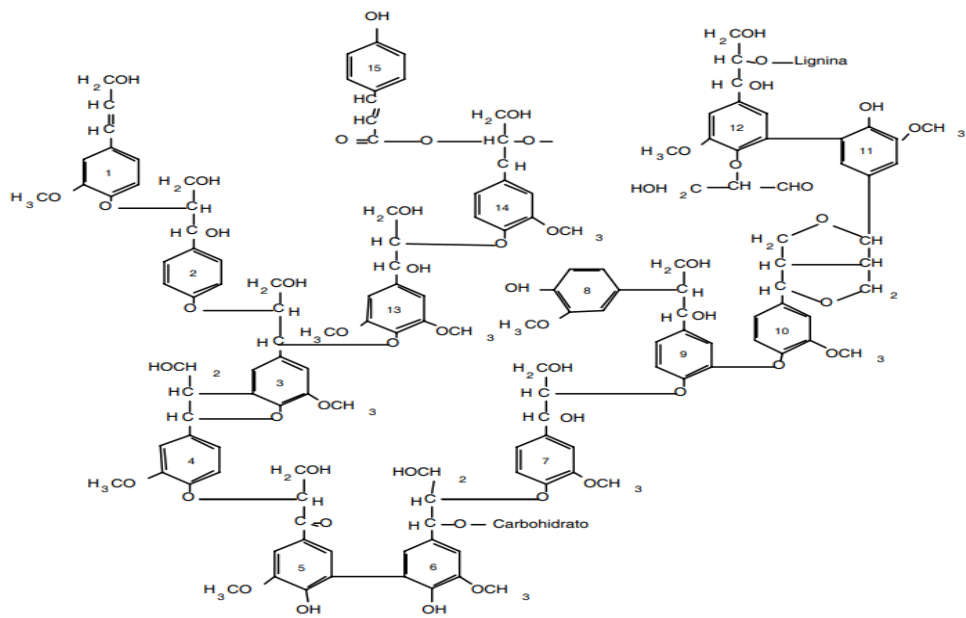


Figura 1.3 Estructura de la lignina

La lignina es un polímero hidrocarbonado complejo que posee constituyentes aromáticos y alifáticos, su principal monómero es fenil propano unido de diferentes formas. Este polímero es amorfo, hidrofóbico, termoplástico, no hidrolizable por ácidos y presenta propiedades mecánicas inferiores a la celulosa (Kalia *et al.*, 2011). La lignina puede separarse de la biomasa lignocelulósica aumentando el contacto entre microorganismos y holocelulosa; sin embargo, no puede ser degradada fácilmente por medios biológicos, razón por la cual la delignificación es considerada una fase primordial en el proceso de digestión anaerobia de materia lignocelulósica (Taherzadeh & Karimi, 2008). La Figura 1.4 muestra la distribución del material lignocelulósico en las plantas.

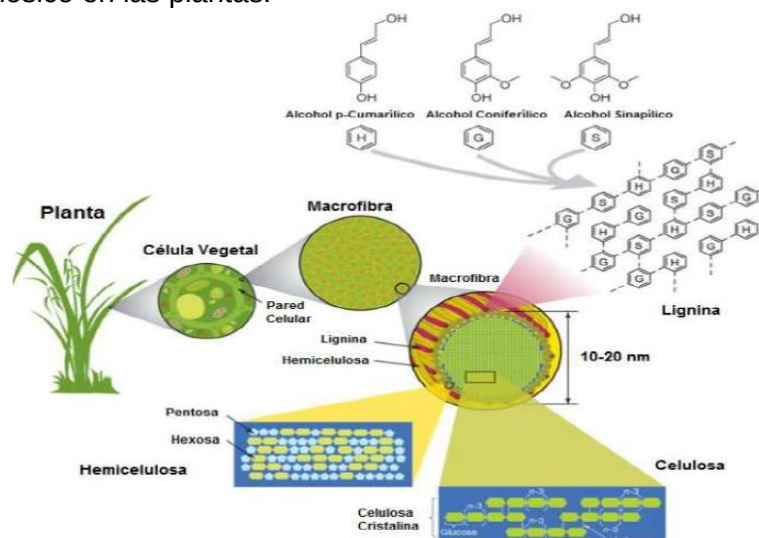


Figura 1.4 Distribución del material lignocelulósico en plantas

## **1.6 Pretratamientos de biomasa lignocelulósica**

El objetivo del pretratamiento es eliminar la lignina y hemicelulosa, reduce la cristalinidad de la celulosa y aumenta la porosidad de los materiales (Ye, 2002).

El pretratamiento tiene como objetivo preparar la materia prima para alcanzar el máximo rendimiento en la etapa de producción y eliminar cualquier sustancia que pueda interferir en el proceso (inhibidores) (Roy & Kumar, 2013). Las características principales que debe cumplir este pretratamiento son las siguientes:

- Aumentar el área superficial del material.
- Disminuir la presencia de sustancias que dificulten las etapas de hidrólisis y de fermentación.
- Reducir el grado de cristalización de la celulosa y disociar el complejo lignina celulosa evitando, en la medida de lo posible, la degradación de los carbohidratos.
- Tener bajos costos de operación y de requerimientos energéticos.

Por su naturaleza, los pretratamientos se pueden dividir en cuatro grupos: físicos, fisicoquímicos, químicos y biológicos (Sun & Cheng, 2002), de los cuales se ha demostrado que los químicos modifican eficazmente las estructuras químicas de la lignocelulosa (Young y Kyoung, 2015). La utilización de los productos químicos en el pretratamiento, la neutralización y el acondicionamiento de la fermentación deben ser mínimo y barato, de estos procedimientos, se utilizan el empleo de ácido sulfúrico, nítrico o ácido clorhídrico para eliminar la hemicelulosa y exponer la celulosa a enzimas hidrólisis, mientras que el pretratamiento con álcali implica una solución alcalina, para eliminar la lignina y diferentes sustitutos del ácido urónico sobre hemicelulosa que reducirán la accesibilidad de enzima a la hemicelulosa (Parameswaran y Ashok, 2015).

### **1.6.1 Pretratamiento químico**

Se refiere al uso de productos químicos, como ácidos, bases y líquidos iónicos, para alterar las características físicas y químicas de la biomasa lignocelulósica. Entre las tres categorías de pretratamiento discutidas, el pretratamiento químico ha recibido el mayor interés de investigación. Aunque se han estudiado muchos métodos de pretratamiento químico para la

producción de etanol celulósico, solo algunos de ellos se han aplicado a la producción de biogás en procesos AD (Yi *et al.*, 2014).

### **1.6.2 Biológicos**

Existen hongos capaces de degradar la lignina y la celulosa para obtener sus constituyentes individuales, ejemplo de ellos: *Pleurotus ostreatus*, *Phanerochaete sordida*, *Pycnoporus cinnabarinus*, etc., que logran degradar el residuo lignocelulósico en pocas semanas. Este tratamiento presenta la ventaja de que requiere muy poco consumo de energía, es limpio con el medio ambiente, conserva azúcares debido a la nula cantidad de inhibidores producidos, por otro lado, tiene el inconveniente de actuar a una velocidad muy baja y además de un control estricto de las condiciones de crecimiento de los microorganismos, razones por las cuales no es considerado como un pretratamiento sustentable (Yi *et al.*, 2014, Romero, 2003, Taherzadeh & Karimi, 2008).

### **1.6.3 Pretratamiento físico**

El pretratamiento mejora la descomposición de moléculas de azúcar complejas para hacerlas más susceptibles a la hidrólisis (Nath *et al.*, 2011). Los métodos comunes en la práctica son el pretratamiento físico que utiliza molienda mecánica para moler el sustrato.

### **1.6.4 Pretratamiento combinado**

El pretratamiento de biomasa lignocelulósica por medios físicos, químicos o biológicos ha sido ampliamente investigado para mejorar la producción de biogás en el proceso AD. Dado que la biodegradabilidad de la biomasa está limitada por varios factores, como la cristalinidad de la celulosa, el contenido de lignina y las interconexiones entre la hemicelulosa y la lignina, un solo método de pretratamiento no brinda resultados eficientes debido a su modo de funcionamiento específico limitado, por ejemplo, el NaOH se dirige principalmente a la lignina, pero no hemicelulosa. (Yi *et al.*, 2014).

### **1.6.5 Hidrólisis**

Proceso mediante el cual las cadenas de polisacáridos que forman la biomasa se transforman en sus monómeros elementales mediante el uso de soluciones ácidas o alcalinas, también mediante el empleo de enzimas.

#### **a) Hidrólisis alcalina**

Es la adición de bases diluidas a la biomasa y su eficiencia depende del contenido de lignina de los materiales, siendo más eficiente en la biomasa lignocelulósica con bajo contenido de lignina como en los residuos agrícolas y agroindustriales (Singh *et al.*, 2014). Las principales ventajas de este tratamiento son su alta eficiencia para solubilizar la lignina, la baja corrosión y toxicidad de los reactivos utilizados, y la aplicación de esta tecnología en condiciones ambientales (Kim *et al.*, 2016). El mecanismo de hidrólisis alcalina de la biomasa parece estar basada en la saponificación de los enlaces ésteres intramoleculares que unen los xilanos de la hemicelulosa y otros componentes (Singh *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2016).

#### **b) Hidrólisis ácida**

La hidrólisis ácida consiste en un proceso químico que, mediante el empleo de catalizadores ácidos, transforma las cadenas de polisacáridos que forman la biomasa (hemicelulosa y celulosa) en sus monómeros elementales. La hidrólisis ácida de los materiales lignocelulósicos es un proceso conocido desde 1819 (Larsson, 2000), que alcanzó su mayor desarrollo durante las dos Guerras Mundiales, períodos en los que la escasez de petróleo hizo que se empleara masivamente la madera para la producción de etanol. Durante este período se desarrollaron numerosos procesos cayendo posteriormente en desuso por razones económicas. Este tipo de hidrólisis puede realizarse empleando diferentes clases de ácidos como el ácido sulfuroso, clorhídrico, sulfúrico, fosfórico, nítrico y fórmico (Galbe y Zacchi, 2002). Sin embargo, sólo los ácidos clorhídrico y sulfúrico han sido empleados a escala industrial. Los procesos industriales de hidrólisis ácida pueden agruparse en dos tipos: los que emplean ácidos concentrados y los que utilizan ácidos diluidos.

Los procesos que implican ácidos concentrados operan a baja temperatura, pudiendo obtenerse altos rendimientos de hidrólisis (superiores al 90% de la glucosa potencial). A pesar de esto, la gran cantidad de ácido empleado en la impregnación del material a tratar y lo costoso de su recuperación, unido a los efectos corrosivos de los ácidos concentrados que obliga a altas inversiones en los equipamientos, hacen que el proceso no sea rentable. Además, tiene el problema asociado de que es necesario una costosa etapa de neutralización antes de la fermentación (Keller, 1996).

Los procesos que emplean ácidos diluidos tienen su principal ventaja, que es el bajo consumo de ácidos. Sin embargo, se requieren relativamente altas temperaturas para alcanzar rendimientos aceptables de conversión de celulosa a glucosa.

El máximo rendimiento en glucosa se consigue a altas temperaturas y tiempos de residencia cortos. Este tipo de procesos operan a una temperatura de 240 °C, una concentración de ácido de 1 % (p/v) y un tiempo de reacción de 6-12 seg. Aun así, bajo estas condiciones los mejores rendimientos alcanzados están en torno al 60 % del rendimiento teórico (Wyman, 1996).

## **1.7 Temperatura**

La concentración de carga química tiene importancia, así la temperatura también da un impresionante efecto sobre la descomposición de la estructura del complejo hemicelulosa-lignina para mejorar la accesibilidad de la celulosa. Diferentes temperaturas producirán varios rendimientos de producción de azúcar. Se puede concluir que la reacción tarda menos tiempo en alcanzar la máxima producción de azúcar reductor a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, esta condición conduce a una rápida tasa de degradación del azúcar (Lenihan *et al.*, 2010).

Por lo tanto, elegir el mejor rango para la optimización juega un papel importante para obtener una producción eficaz de azúcar reductor.

En el pretratamiento con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido, reportaron que la temperatura más utilizada para el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica está en el rango de 80–200 °C (Kumar *et al.*, 2009). Lu en 2007 informó que la optimización de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido para rastrojo de maíz se llevó

a cabo en un rango de temperatura de 80 a 120 °C y la temperatura óptima se encontró en 120 °C con un rendimiento de glucosa del 8.4 % (Lu *et al.*, 2007).

Una observación similar había sido reportada por Timung *et al.* en 2015 que se realizó la optimización de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido para bagazo de caña de azúcar y bambú en un rango de temperatura de 80 a 150 °C y la temperatura óptima para ambos bagazos de caña de azúcar y bambú se encontró a 100 °C con rendimiento óptimo de reducción azúcar 23,49 g/L y 15,6 g/L, respectivamente. Anwar *et al.*, (2012) informaron que el pretratamiento con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido de biomasa celulósica de pulimento de arroz se llevó a cabo a una temperatura de 100 °C como temperatura óptima (Anwar *et al.* 2012). A pesar de la mayoría de los estudios utilizaron una temperatura más alta (>100 °C) para el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido pretratamiento, todavía hay algunos inconvenientes al usar alta temperatura.

## **1.8 Inhibidores en la hidrólisis ácida**

El pretratamiento ácido podría formarse bajo una baja concentración de ácido con alta temperatura o bajo una alta concentración de ácido con baja temperatura.

El tratamiento previo de la biomasa lignocelulósica mediante el uso de ácido concentrado tiene ventajas y desventajas. El ácido concentrado es más económico que el ácido diluido ya que se realiza a baja temperatura, mientras que el ácido diluido debe funcionar a alta temperatura (Mood *et al.*, 2013).

Sin embargo, existen algunas desventajas, por ejemplo, la corrosión del equipo, la contaminación ambiental, el consumo elevado de ácido, la demanda de energía para la recuperación de ácido y la producción de inhibidor de fermentación, que es 5-hidroximetil furfural (5-HMF). En un esfuerzo por superar los inconvenientes del ácido concentrado, la hidrólisis ácida diluida ofrece una ventaja al reducir el consumo de ácido, pero requiere altas temperaturas y aplica unas condiciones fuertes para producir glucosa a partir de celulosa cristalina y da como resultado una degradación importante de la hemicelulosa amorfa (Rabemanolontsoa *et al.*, 2016).



## 2. MÉTODO

En la Figura 2.1 se presenta la metodología para la “Obtención de azúcares fermentables de los residuos de coco mediante un pretratamiento hidrotérmico y ácido”.

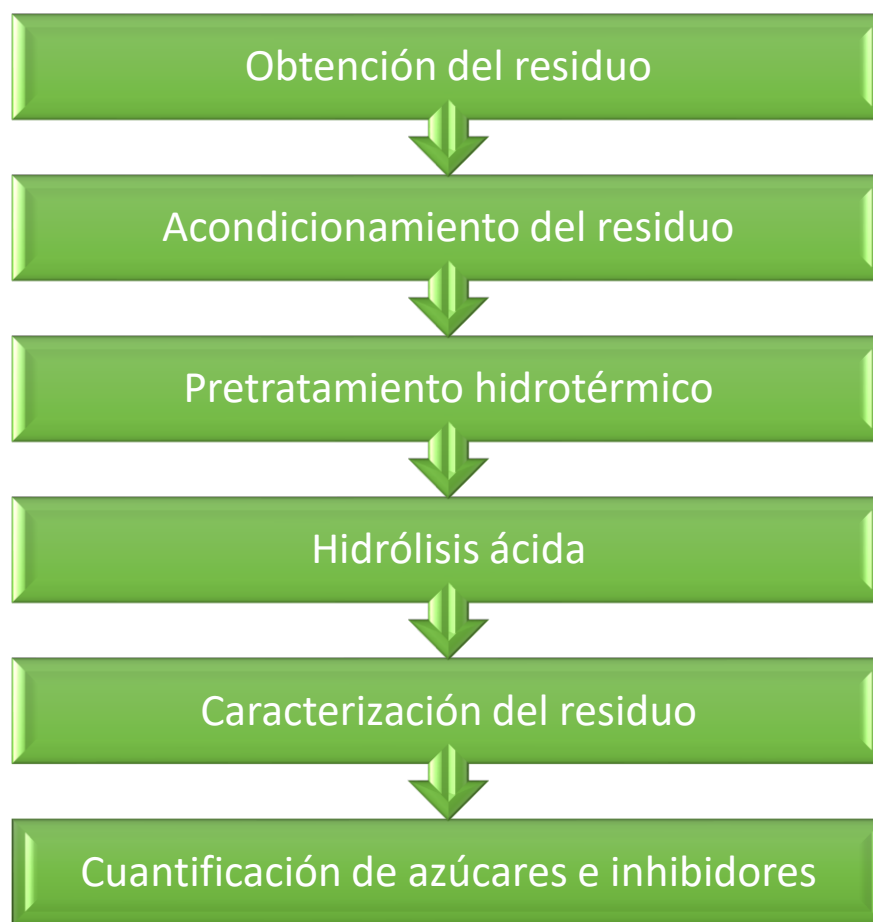


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proyecto

### 2.1 Obtención del residuo:

Los residuos de coco se obtuvieron de comercios que generan la cáscara del coco, se recolectaron aproximadamente 30 piezas, cada cáscara se cortó en 4-5 trozos medianos, se colocaron a secar al aire libre durante 10 días; después con la uña de un martillo se cortaron en trozos pequeños y se colocaron al rayo del sol por 5 días dentro de un ambiente seco. Las fibras obtenidas en este proceso son llamadas mesocarpio (bonote, fibra del coco).

## **2.2 Acondicionamiento del residuo:**

Una vez que se tuvieron los residuos más pequeños de un tamaño aproximado de 2-5 cm se procedió a lavarlos con agua destilada (dos enjuagues) para retirar suciedad del residuo, y después un enjuague con agua desionizada. Se escurrió el residuo y se colocó a secar al sol durante un día, posteriormente se sometió a secado en la mufla por 24 horas a una temperatura de 45 °C. Una vez que el residuo se encontraba seco se procedió a molerlo en el molino, se pasó por un tamiz con número de malla 60.

Finalmente, el polvo obtenido se almacenó en un contenedor seco con tapa para evitar alguna contaminación.

## **2.3 Pretratamiento hidrotérmico a diferentes tiempos:**

Se realizaron muestras por duplicado para los tiempos de: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 min, se utilizaron 20 tubos de 12 mL donde se colocaron 0.26 gramos del residuo y se adicionaron 5 mL de agua con temperatura de 70 °C, durante 30 minutos se mantuvo esta temperatura en un reactor; una vez transcurrido este tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente.

## **2.4 Hidrólisis ácida**

Las muestras que a continuación se describen en el inciso A y B, se colocaron en el reactor HI839800 de HANNA INSTRUMENTS, el cual se programó a una temperatura de 105 °C, cada lote de muestras se colocó en dicho reactor durante el tiempo establecido (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 min), las muestras se mantuvieron en agitación. Una vez que se cumplieron los tiempos de cada muestra se retiraron, se dejaron enfriar y se colocaron en refrigeración para las pruebas posteriores.

Para este proceso se realizó para dos tipos de muestras:

- A) Muestras con pretratamiento hidrotérmico: de las muestras provenientes del pretratamiento hidrotérmico las cuales contenían 0.26 gramos de residuos más agua caliente a 70 °C, se colocaron 5 mL de ácido de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con una concentración de 1.5 M. Se taparon y se colocaron en el reactor a diferentes tiempos.

- B) Muestras sin pretratamiento hidrotérmico: en este proceso se utilizó el residuo seco, es decir, sin ningún pretratamiento previo, se realizó por duplicado, por lo que se prepararon 20 tubos con 0.26 gr del residuo para cada uno, se agregaron 7 mL de la solución de ácido de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con una concentración de 1.5 M, debido a las condiciones del residuo, fue necesario utilizar una mayor cantidad en comparación a las muestras con pretratamiento. Se taparon los tubos y se colocaron en el reactor.

## **2.5 Caracterización del residuo**

Antes de ser sometido a hidrólisis y después de este tratamiento, se realizó una caracterización con las técnicas siguientes:

- Espectroscopia de infrarrojo: en cual se determinó la presencia de celulosa en el residuo.
- Análisis termogravimétrico (TGA)
- Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
- Microscopia electrónica de barrido (MEB)

## **2.6 Cuantificación de los azúcares e inhibidores**

Una vez que se realizó el tratamiento de hidrólisis ácida para ambos tipos de muestras, se procedió a la cuantificación de azúcares con el método DNS. El residuo de coco después del proceso de hidrólisis presentó dos fases, un precipitado color café oscuro y un líquido transparente, del hidrolizado se tomaron 0.3 mL a los cuales agregaron 2.7 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  destilada para completar un volumen de 3 mL, enseguida se agregó NaOH 1N para ajustar el pH mayor a 8, la cantidad de NaOH que se utilizó fue de 1 mL de para las muestras a las que se realizó el pretratamiento hidrotérmico y de 2 mL para las muestras a las que no se realizó pretratamiento.

### **2.6.1 Método DNS**

El reactivo DNS se preparó de la siguiente manera: de una solución de 100 mL de NaOH 0.2 M, se tomaron 50 mL y se adicionaron poco a poco 30 g de tartrato de sodio y potasio

tetrahidratado  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , manteniendo agitación y calentamiento constante, después se agregó 1 gr de ácido 3-5 dinitrosalicílico hasta llegar a una solución homogénea con tonalidad naranja, se retiró de agitación y se aforó con el hidróxido de sodio restante.

De las muestras que se llevaron a pH mayor de 8, se tomaron 0.5 mL de cada una y se colocaron en nuevos tubos, se agregaron 0.5 mL de la solución de DNS, se llevaron a calentamiento a baño maría con una temperatura de 92°C durante 5 minutos, enseguida se retiraron del calor y se dejaron enfriar a temperatura ambiente; después se agregaron 10 mL de agua destilada para proceder a la lectura en el espectrofotómetro UV-vis a una absorbancia de 540 nm.

### **2.6.2 Curva de calibración**

Para realizar la cuantificación de los azúcares se realizó una curva de calibración de glucosa grado reactivo, con una concentración de trabajo de 5 g/L, a continuación, se describen las concentraciones utilizadas: 0.5 g/L, 1 g/L, 1.5 g/L, 2 g/L, 2.5 g/L, 3 g/L, las cuales se aforaron en matraces de 25 mL, enseguida se tomó una alícuota de 0.5 mL de cada una de las concentraciones y se colocó en un tubo de 12 mL, se adicionó 0.5 mL del reactivo DNS y se procedió a calentamiento por 5 min, una vez que se enfriaron a temperatura ambiente, se agregaron 10 mL de agua destilada, se programó el espectrofotómetro a una absorbancia de 540 nm, posteriormente cada muestra se colocó en el equipo para medir la absorbancia en la región UV-VIS, una vez obtenidos los datos se procedió a realizar la curva de calibración y obtener la ecuación de la recta, asimismo se obtuvo el valor de  $R^2$  con lo que se determinó que la curva tiene una alta correlación entre los datos del eje Y y X y por lo tanto se puede utilizar para la determinación de las concentraciones de los azúcares. Posteriormente se procedió a medir las absorbancias en el espectrofotómetro de ambos grupos de muestras, es decir, las de pretratamiento hidrotérmico con hidrólisis y las muestras solo con hidrólisis.

### **2.6.3 Determinación de inhibidores**

Determinación de furfural: de cada una de las muestras a las que se les aplicó hidrólisis ácida, se tomó una alícuota de 200  $\mu\text{L}$  y se diluyó con agua destilada a un volumen final de 10 mL, se analizaron las muestras en el espectrofotómetro UV-vis a una absorbancia de 277 nm. Para esta medición se realizó una curva de calibración tomando una concentración inicial de 200 mg/L tomando como referencia 7 puntos.

Determinación de Hifroximetilfurfural (HMF): esta medición solo se realizó para muestras a las muestras que se procesaron con hidrólisis ácida, es decir, sin ningún pretratamiento. Una vez

obtenido el hidrolizado, se tomaron 200  $\mu\text{L}$  de cada uno de los tubos y se diluyó con agua destilada a un volumen final de 10 mL, posteriormente se analizaron en el espectrofotómetro UV-vis a una absorbancia de 284 nm. En esta medición se tomó una concentración inicial de 200 mg/L y de referencia 8 puntos para realizar la curva de calibración.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización del residuo de coco

**3.1.1 Espectroscopia de infrarrojo:** Los espectros obtenidos en la región de infrarrojo permitieron observar las principales vibraciones, a las cuales se les asignan grupos funcionales, y se comparan con otros estudios realizados al mismo tipo de residuo.

En la Figura 3.1 se muestran los espectros del residuo de coco, se identifica al residuo de coco y el residuo lavado con agua destilada, se puede observar que en el espectro de la muestra se distingue la celulosa, la lignina y polisacáridos, en los cuales se muestran los picos con más intensidad, lo que quiere decir que se exponen más estos elementos por el lavado que sufrió el residuo, a diferencia del residuo que no se lavó. En general la estructura del residuo se puede observar en ambos espectros.

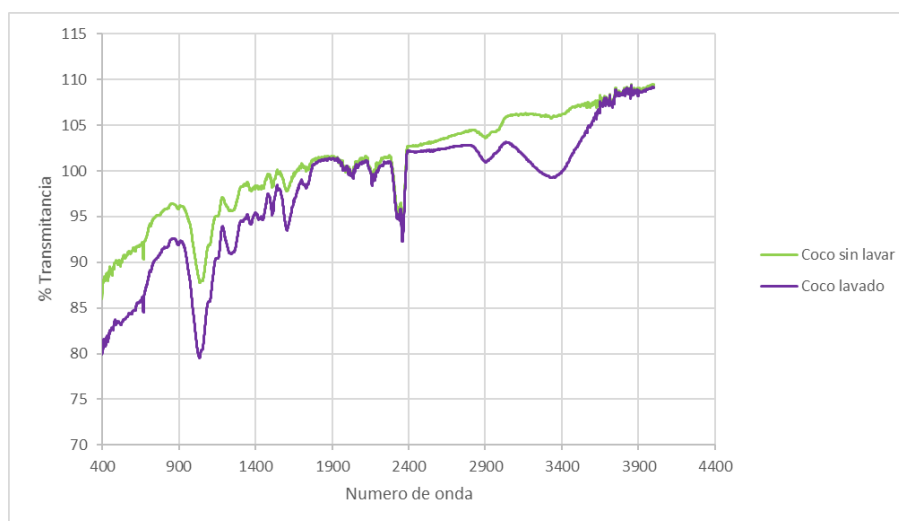


Figura 3.1 Espectro del residuo de coco sin lavar y lavado

A continuación, en la Figura 3.2 se muestran el espectro del residuo de coco lavado con agua destilada, se obtuvieron los siguientes resultados: se identificó un pico de absorción en  $3327.7\text{ cm}^{-1}$  representando el enlace OH (hidroxilo), este pico es asignado a los polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y lignina); se observa un pico a  $2890.9\text{ cm}^{-1}$  asignado a la presencia de lignina. Asimismo, se observó un pico intenso a  $1028.1\text{ cm}^{-1}$ , el cual se relaciona con la presencia de celulosa; en el pico a  $1509\text{ cm}^{-1}$ , se observa la presencia de lignina de la fibra del coco.

En general los compuestos que se encuentran en el residuo de coco, son los siguientes:

- enlace OH (hidroxilo): polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y lignina)

- grupo alifático CH conectado al anillo aromático: lignina
- enlaces C-O de alcoholes: celulosa

Por lo que la presencia de celulosa y hemicelulosa resulta positiva para la generación de azúcares fermentables del residuo de coco.

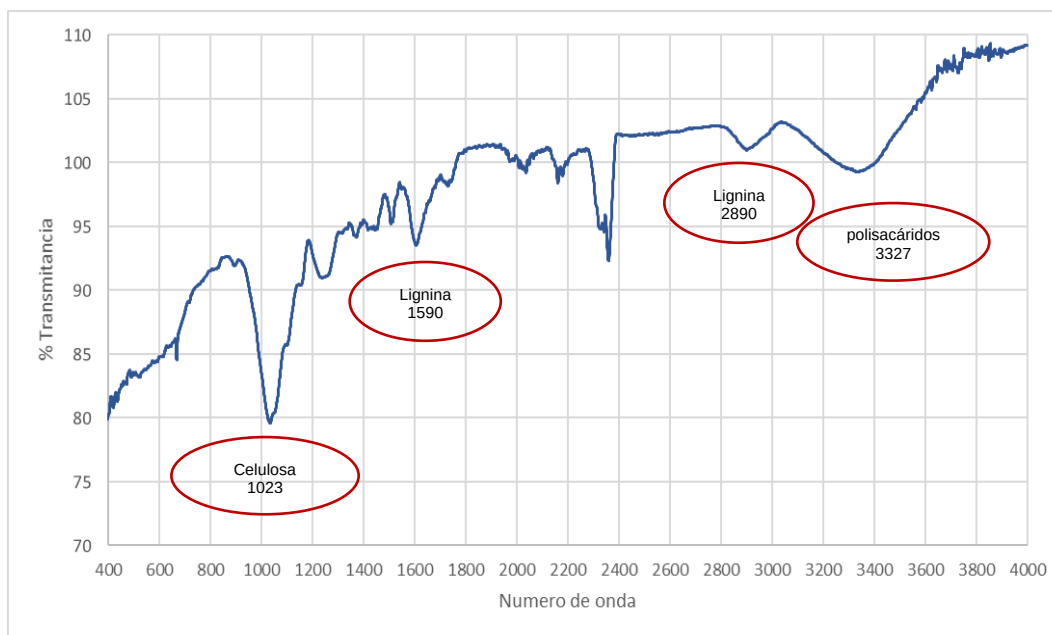


Figura 3.2 Espectro del residuo de coco y grupos funcionales

Hernández en 2018, realizó la caracterización química de la fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) proveniente de la región de Guerrero en México, utilizando la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR) y obtuvo el espectro de las fibras, a continuación, se muestra:

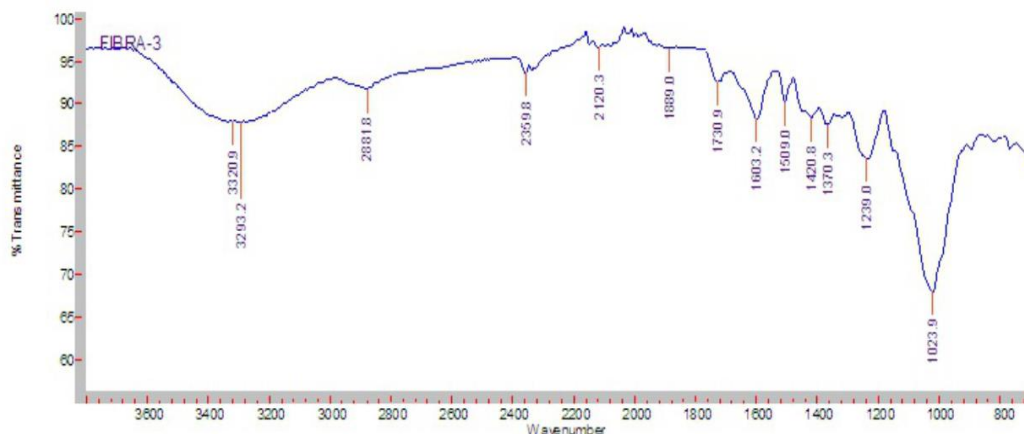
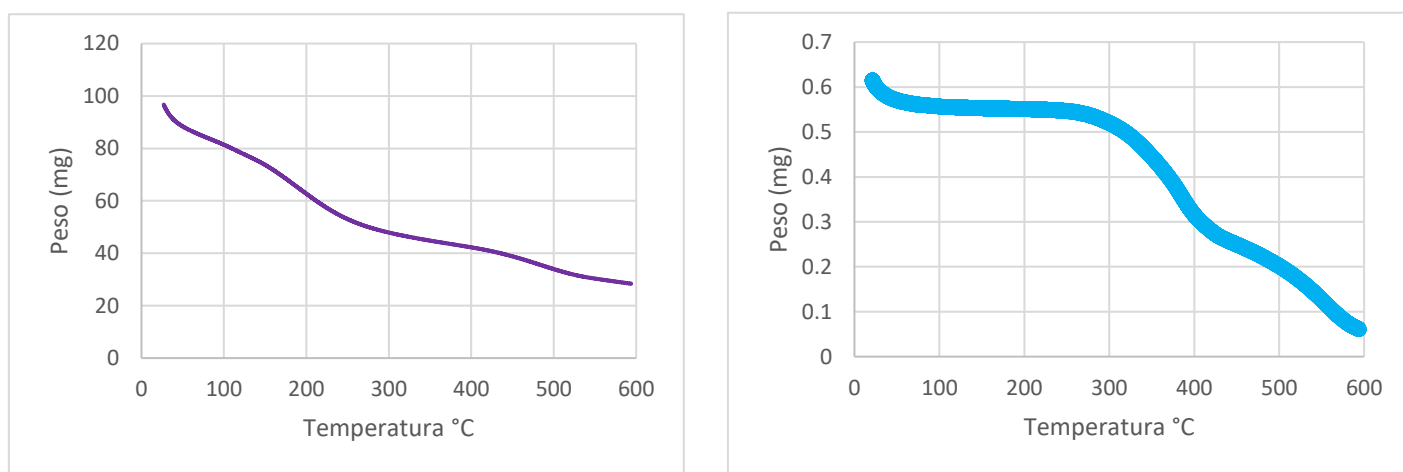


Figura 3.3 Espectro de IR de la fibra de coco de la región de Guerrero, México.

Como se observa el espectro anterior, se identifican los mismos picos de absorción encontrados en la parte experimental de esta investigación, lo que demuestra la existencia de celulosa, hemicelulosa y lignina en el residuo de coco, por lo que es factible obtener azúcares fermentables.

### 3.1.2 Análisis termo gravimétrico (TGA):

El análisis se realizó para dos muestras: residuo de coco con tratamiento hidrotérmico y sin tratamiento hidrotérmico, en la Figura 3.4, se muestra los termogramas del análisis de ambas muestras:



a) muestra sin tratamiento

b) muestra con hidrólisis ácida

Figura 3.4 Termogramas del residuo sin tratamiento y con hidrólisis

El análisis de resultados se la figura anterior, es el siguiente:

- a) Residuo de coco sin tratamiento: En el termograma se observa que hay una descomposición del material conforme aumenta la temperatura. También se indica que la temperatura de descomposición para esta muestra es de 200°C sin embargo no se identifica una descomposición del material.
- b) Residuo de coco después de hidrólisis: se observa que hay una descomposición del material conforme aumenta la temperatura, la más importante es a una temperatura de 300 °C, lo cual puede ser por la influencia del ácido propiciando la descomposición del material a una temperatura de 700 °C.



### 3.1.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC):

El análisis se realizó para el residuo de coco para dos muestras, la primera no tenía ningún tratamiento, y la segunda es el residuo de coco con el tratamiento de hidrólisis.

En la siguiente figura, se muestran los termogramas de ambas muestras.

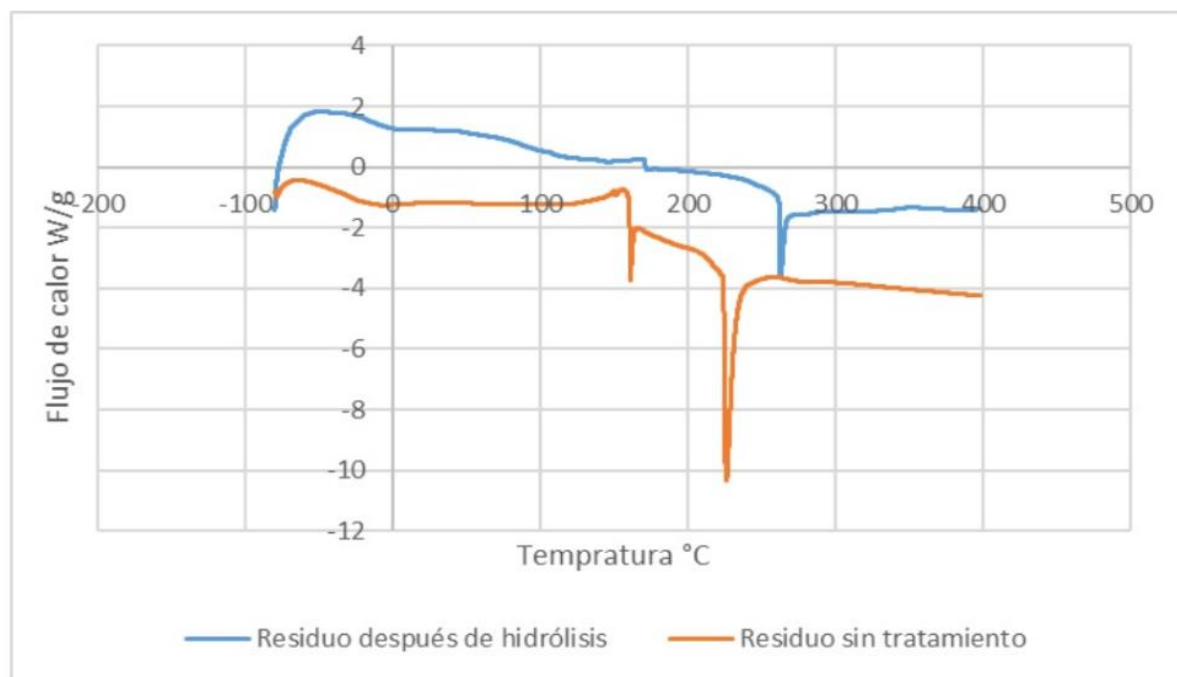


Figura 3.5 Termograma del residuo de coco sin tratamiento y con hidrólisis

De acuerdo a la figura 3.5, el análisis para ambas muestras es el siguiente:

a) Residuo de coco sin tratamiento: el residuo no tiene algún tratamiento, se observa en el termograma la curva calorimétrica la cual indica principalmente un proceso endotérmico, que muestra la fase de fusión del material (220°C aproximadamente), no se observa que la curva tenga una tendencia descendente, por lo que indica que el material no se degrada a la máxima temperatura. Se observan los siguientes datos:

- Transición vítrea ( $T_g$ ): no se identifica
- Temperatura de Fusión ( $T_m$ ): 220 °C
- Temperatura de degradación ( $T_d$ ): no se observa

b) Residuo de coco con hidrólisis: el residuo tiene el tratamiento de hidrólisis, se observan características similares con respecto a la muestra que no tiene la hidrólisis, se observa en la curva calorimétrica un proceso endotérmico, el cual se asocia a la fase de fusión del material (260 °C), de igual manera no se observa que la curva tenga una tendencia hacia abajo, indica que el residuo continúa disminuyendo en su masa. El termograma proporciona los siguientes datos:

- Transición vítrea ( $T_g$ ): no se identifica
- Temperatura de Fusión ( $T_m$ ): 260 °C
- Temperatura de degradación ( $T_d$ ): no se observa

En ambas muestras se observa un comportamiento similar ante la influencia de la temperatura.

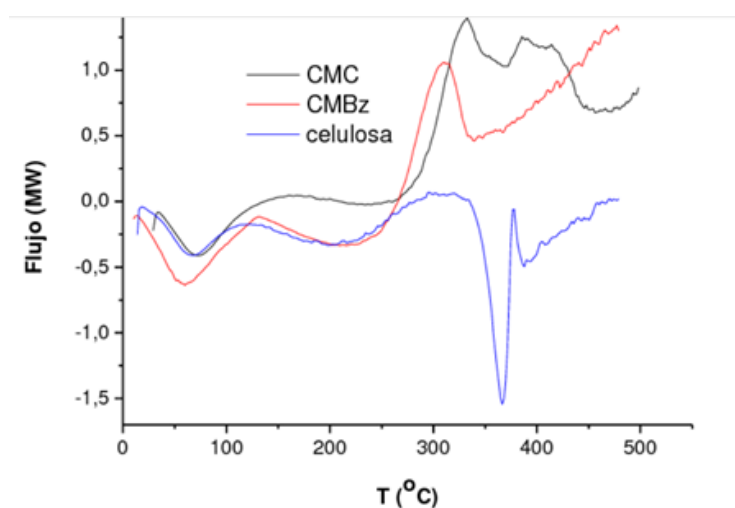


Figura 3.6 Termograma: calorimetría diferencial de barrido de la celulosa y sus derivados

La figura 3.6 muestra el termograma obtenido de la investigación de León-Fernández, et al., en 2014, en el que realiza la caracterización química, estructural y morfológica de un copolímero base celulosa, donde se observa un pico endotérmico a 361°C, el cual indica la descomposición de la celulosa; se observa que el comportamiento del residuo de coco es similar al de la celulosa, esto debido a que el residuo de coco contiene celulosa en su composición, asimismo se observa que la temperatura de descomposición es similar en ambos análisis y no se observa una temperatura de degradación, lo que indica que es un material térmicamente estable.

### 3.1.4 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se realizó Microscopía Electrónica de Barrido a las muestras de coco, con la finalidad de examinar la microestructura; además de obtener información detallada sobre la topografía de la superficie, la composición y la morfología del material.

#### A) Residuo de coco

En las siguientes figuras se muestran diferentes micrografías de residuo de coco al cual no se le aplicó ningún tratamiento.

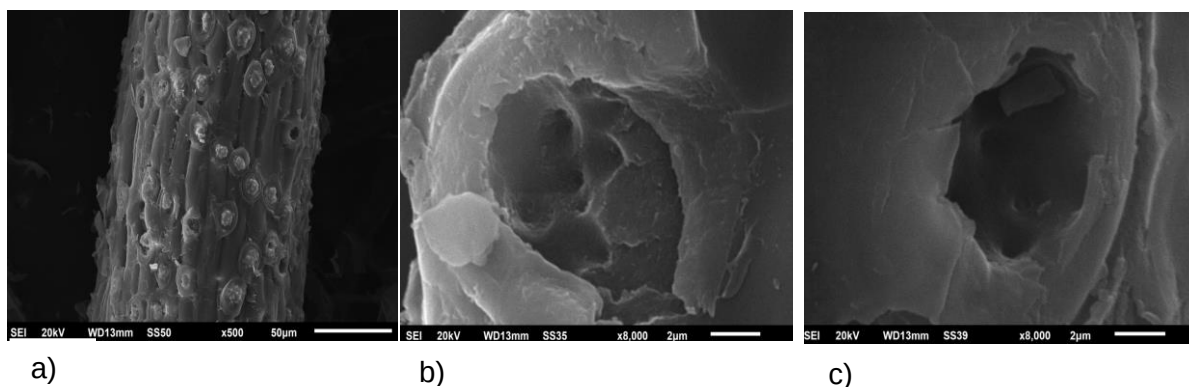


Figura 3.7 Micrografía del residuo de coco antes del tratamiento

Como se observa en la figura 3.7, la micrografía del residuo de coco muestra una estructura alargada en forma de cilindro, en la que se presentan poros que son parte de éste, así como partículas en forma circular con puntos incrustados en éstos.

Asimismo, se muestra el análisis EDS de la estructura, donde se indica la composición del material.

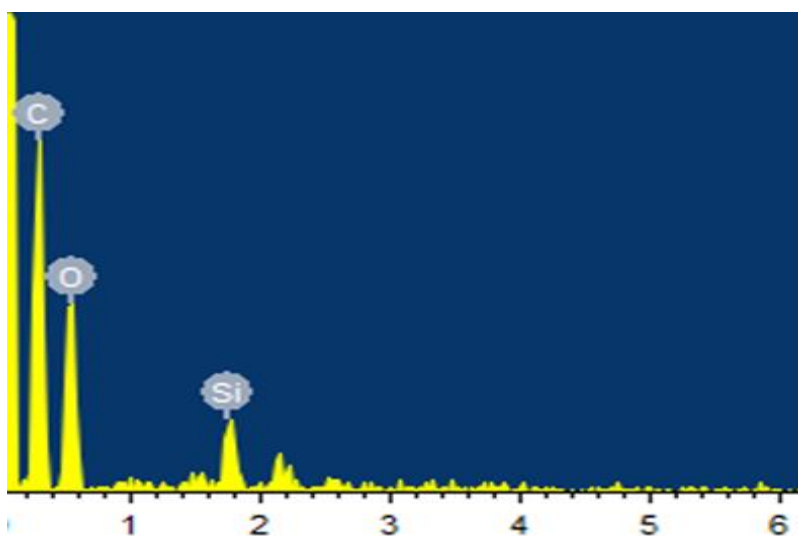


Figura 3.8 Análisis EDS del residuo de coco

De acuerdo a la figura 3.8, se observa que la composición del material presenta: carbono y oxígeno, los cuales confirman que es una sustancia orgánica, asimismo se identificó la presencia de silicio el cual es un elemento presente en el suelo; otro aspecto de la estructura es que tiene en su cuerpo poros en los cuales están incrustadas formas parecidas a un “círculos con puntos incrustados”.

#### B) Residuo de coco al que se aplicó hidrólisis ácida

La muestra que se analizó solo se aplicó hidrólisis ácida utilizando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a una concentración 1.5 M a una temperatura de 105 °C y un tiempo de reacción de 30 min.

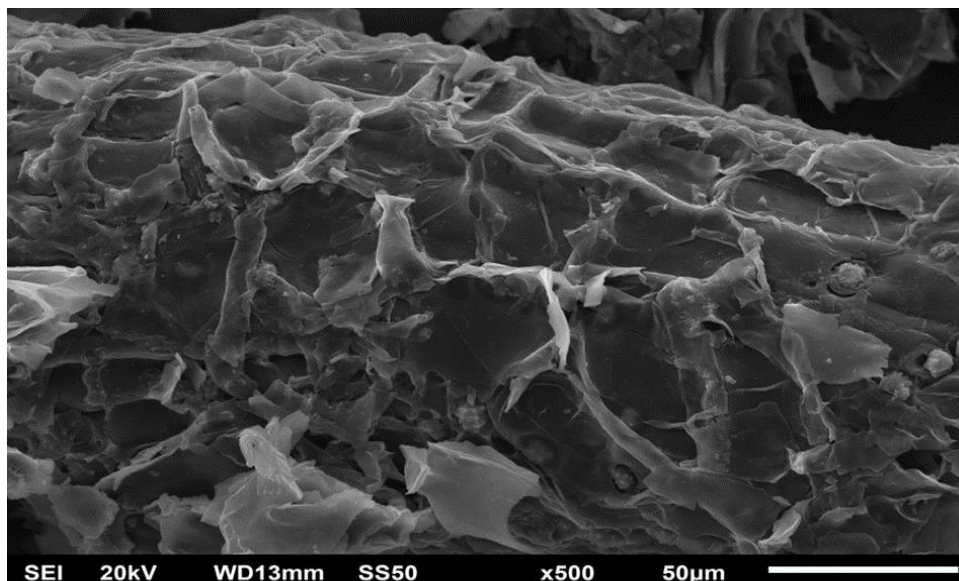


Figura 3.9 Micrografía del residuo de coco después de la hidrólisis

En la Figura 3.9 se observa una estructura similar a la figura 3.7 inciso a), ya que presenta la misma forma cilíndrica, con los poros y “círculos con puntos incrustados ” sin embargo, aquí se observan modificaciones en su estructura principal, es decir que se va desintegrando en su superficie, esto por la acción del ácido en el residuo.

Asimismo, se obtuvo el análisis EDS del residuo de coco con el tratamiento de hidrólisis, a continuación, se muestra:

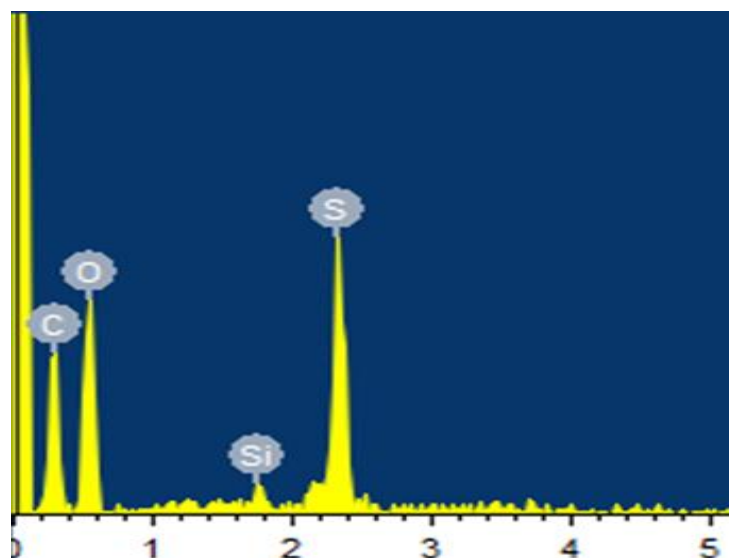


Figura 3.10 Análisis EDS del residuo después de la hidrólisis

De acuerdo a la Figura 3.10, se observa la composición del material, principalmente la presencia de azufre, esto por la influencia del ácido en la estructura, lo que quiere decir que, al realizar la hidrólisis, el ácido penetra en la materia para que rompa las cadenas de lignina, y poder liberar las moléculas de celulosa y hemicelulosa, esto para la obtención de azúcares. La composición de la estructura también presenta carbono y oxígeno lo que corrobora que es materia orgánica.

Derivado del estudio realizado por Trujillo, en la Figura 3.11 se muestra la MEB del bagazo de coco al cual se le aplicó un tratamiento químico, se pueden observar las fibras del coco, y la estructura completa de la fibra y de cómo es que se comienza a degradar por el tratamiento aplicado.

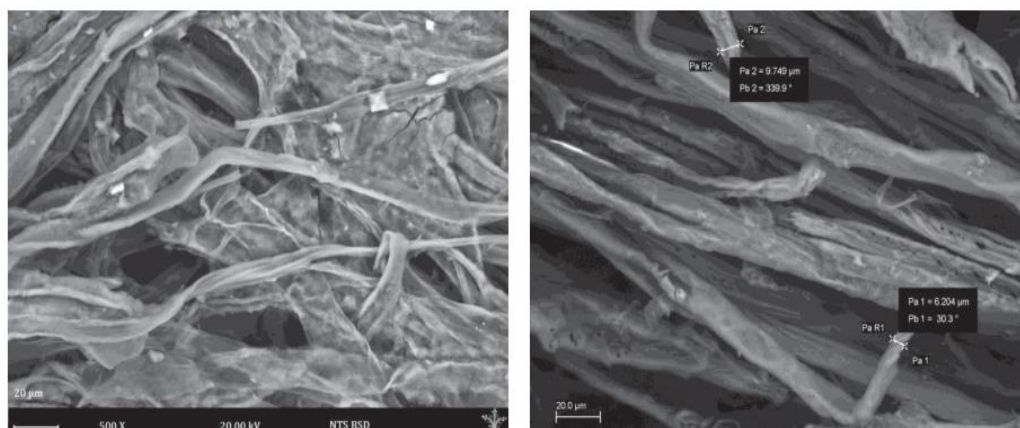


Figura 3.11 Micrografía del residuo de coco después de un tratamiento químico

### 3.1.5 Determinación de celulosa y hemicelulosa

Con el fin de determinar la cantidad de celulosa y hemicelulosa presentes en los residuos de coco y de revisar como afectó el pretratamiento hidrotérmico, se analizó el residuo de coco de 3 maneras, a continuación, se describen:

- a) MC: muestra de residuo de coco sin tratamiento
- b) MP: muestra de residuo con pretratamiento hidrotérmico con agua a 70°C, durante 30 minutos
- c) MH: muestra del residuo de coco con hidrólisis ácida usando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.5 M, con un tiempo de 30 min

Se determinó lo siguiente para cada una de las muestras:

- Extraíbles
- Holocelulosa
- Celulosa
- Hemicelulosa

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

Tabla 3.1 Resultados de determinaciones

| Muestra | Extraíbles | Holocelulosa | Celulosa | Hemicelulosa |
|---------|------------|--------------|----------|--------------|
| MC      | 13%        | 79%          | 38.5%    | 61.65%       |
| MP      | 10%        | 89%          | 40.65%   | 58.90%       |
| MH      | 58%        | 59%          | 42.65    | 56.95%       |

### 3.2 Cuantificación de azúcares e inhibidores

#### 3.2.1 Cuantificación de azúcares

Para cuantificar los azúcares se realizaron dos curvas de calibración, ya que se tienen dos grupos de muestras diferentes. Se tomó como patrón glucosa grado reactivo, se realizó la curva de calibración correspondiente con una concentración de: 0.5, 1,1.5, 2,2.5 y 3 g/L, con una  $R^2$  de 0.98.

- a) A continuación, en la figura 3.12 se muestra los datos obtenidos de la cuantificación de azúcares provenientes de las muestras a las que se realizó pretratamiento hidrotérmico y posteriormente hidrólisis ácida. Las muestras se realizaron por duplicado en tiempos

de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 min. Los datos de la concentración indican que, a un mayor tiempo de tratamiento de la muestra por medio de hidrólisis ácida, genera una mayor cantidad de azúcares, en este caso el tiempo de 120 min demostró una generación de 6.13 g azúcares/g biomasa, así como el tiempo de 300 min con 6.86 g azúcares/g biomasa. Por lo que en este tratamiento se infiere que, a mayor tiempo de reacción, existe una mayor generación de azúcares del residuo de coco.

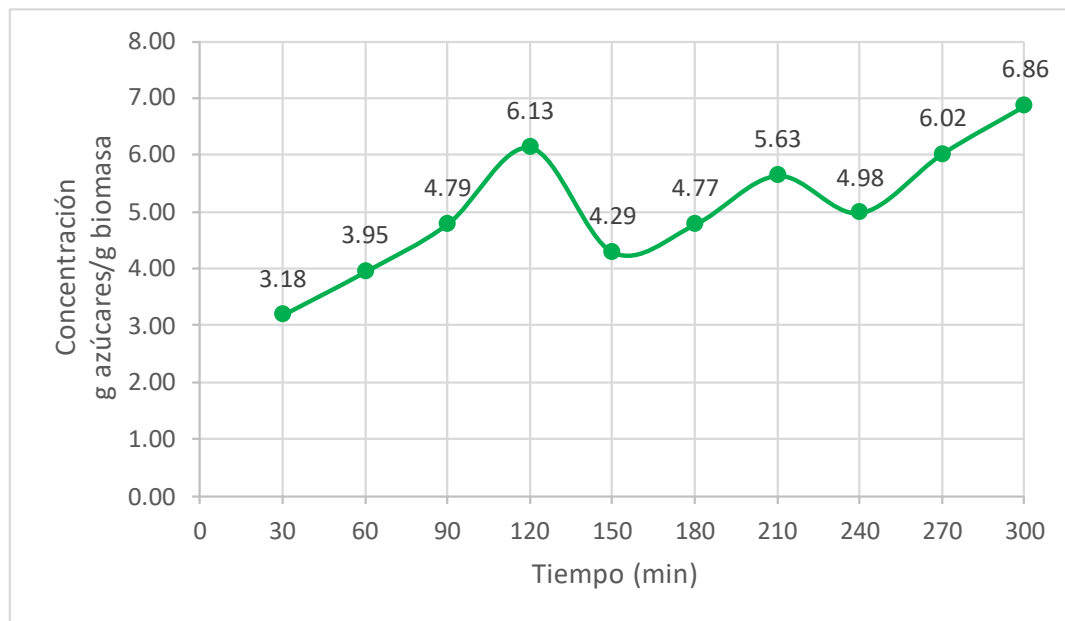


Figura 3.12 Generación de azúcares de muestras con pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis ácida

- b) Se realizó una curva de calibración para la cuantificación de azúcares, para las muestras a las que se realizó hidrólisis. Las concentraciones que se consideraron son 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 g/L.

En la Figura 3.13 se presentan los datos obtenidos de las muestras que fueron tratadas con hidrólisis, las cuales se realizaron por duplicado y en un tiempo de 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 y 300 min, de acuerdo a estos tiempos, se observa que la generación de azúcares aumenta conforme el tiempo de reacción es mayor, llega a un punto máximo de generación de azúcares para disminuir a partir del tiempo de 180 min, a partir de estos minutos la generación desciende y asciende de manera desigual. La mayor generación de azúcares

se dio en el tiempo de 150 min con una concentración de 3.14 g azúcares/g biomasa, el segundo lugar en el tiempo de 120 min se generaron 2.77 g azúcares/g biomasa.

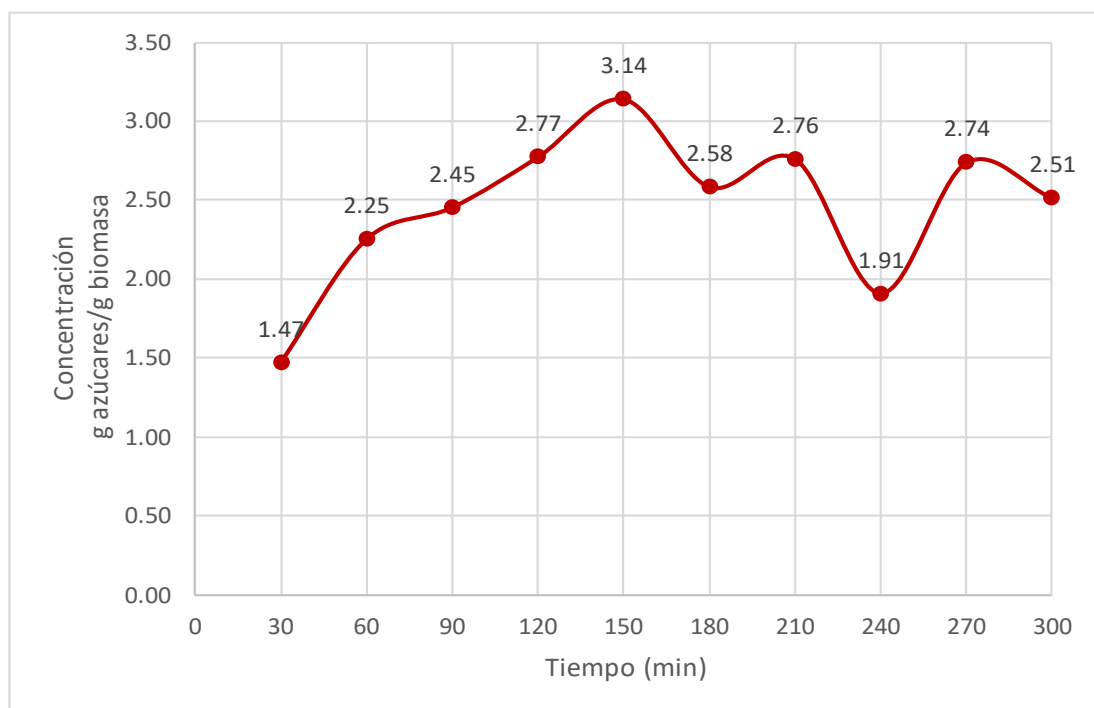


Figura 3.13 Generación de azúcares de muestras con hidrólisis ácida

Derivado de los resultados anteriores, en la tabla 3.1 y figura 3.14 se realiza una comparación de las concentraciones obtenidas de los dos procedimientos que se aplicaron a las muestras y con el mismo tiempo, como se puede observar la generación mayor de azúcares fue en las muestras a las que se realizó pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis ácida. Se puede observar que la mayor generación de azúcares se produjo cuando a los residuos de coco se aplicó el pretratamiento hidrotérmico.



Tabla 3.2 Diferencia de generación de azúcares

| Tiempo (min) | Pretratamiento hidrotérmico + hidrólisis (g azúcares/g biomasa) | Hidrólisis (g azúcares/g biomasa) | Diferencia |
|--------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------|
| 30           | 3.18                                                            | 1.47                              | 1.72       |
| 60           | 3.95                                                            | 2.25                              | 1.70       |
| 90           | 4.79                                                            | 2.45                              | 2.34       |
| 120          | 6.13                                                            | 2.77                              | 3.36       |
| 150          | 4.29                                                            | 3.14                              | 1.15       |
| 180          | 4.77                                                            | 2.58                              | 2.19       |
| 210          | 5.63                                                            | 2.76                              | 2.87       |
| 240          | 4.98                                                            | 1.91                              | 3.07       |
| 270          | 6.02                                                            | 2.74                              | 3.28       |
| 300          | 6.86                                                            | 2.51                              | 4.35       |

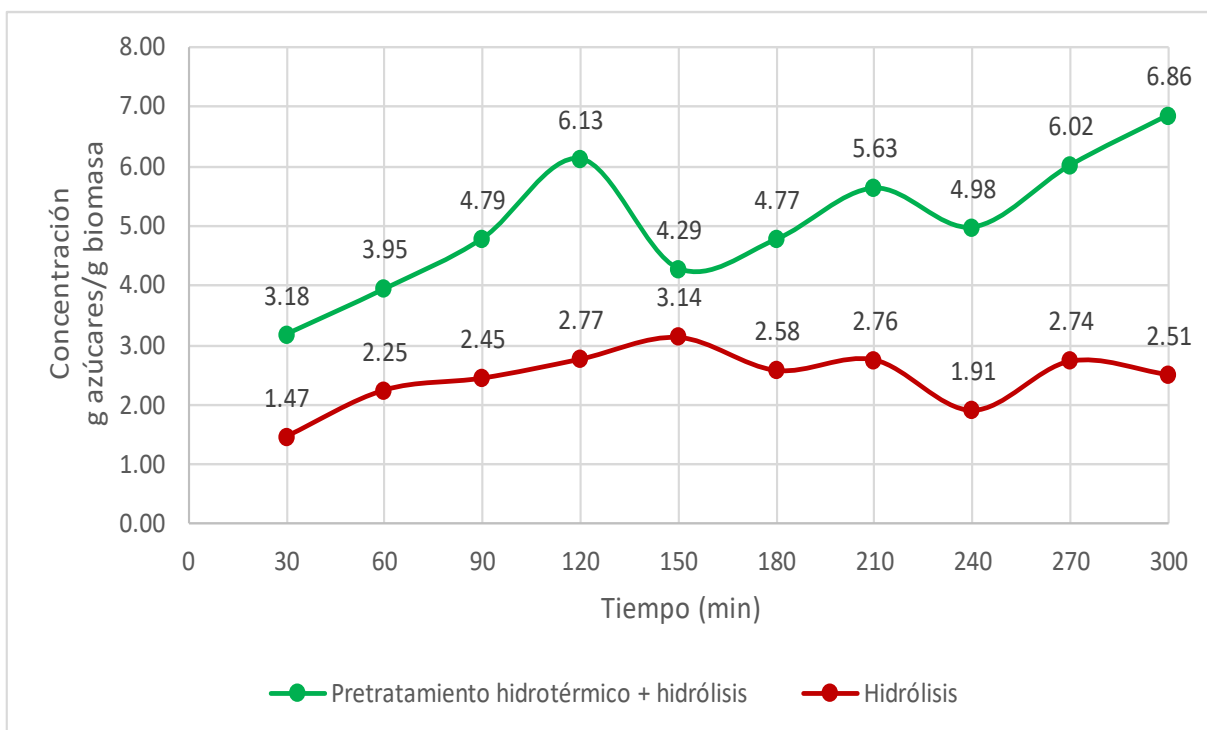


Figura 3.14 Generación de azúcares en muestras con ambos tratamientos

### 3.2.2 Cuantificación de furfural

A continuación, se realizó una curva de calibración para determinar la presencia de furfural, la cual se realizó con una concentración inicial de 200 mg/L y se tomaron 5 puntos de referencia. Se midieron en el espectrofotómetro UV-vis a una absorbancia de 284 nm.

Los resultados de la determinación de furfural para las muestras a las que se aplicó pretratamiento hidrotérmico y posteriormente hidrólisis ácida, son los siguientes:

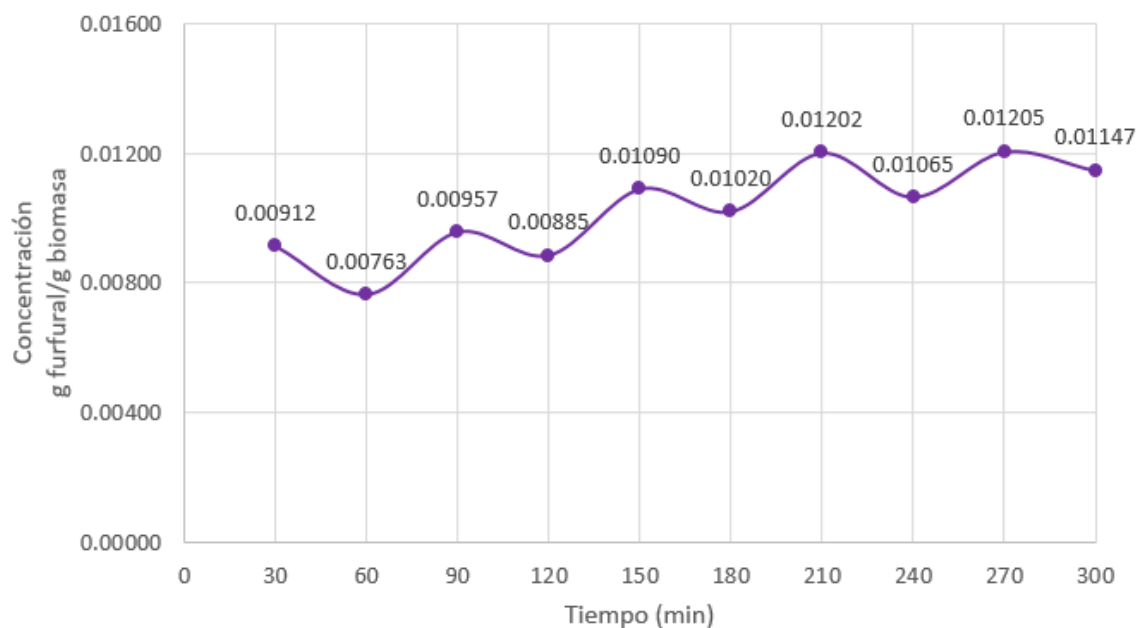


Figura 3.15 Generación de furfural en muestras de coco con pretratamiento hidrotérmico + hidrólisis

Como se observa en la Figura 3.15, la generación de furfural incrementa conforme el tiempo aumenta, la mayor cantidad de furfural se produjo en el tiempo de 270 min con una concentración de 0.01205 g furfural/g biomasa.

Asimismo, se realizó una curva de calibración de furfural para muestras que solo se les aplicó hidrólisis ácida, teniendo una concentración inicial de 200 mg/ L y se tomaron 7 puntos de referencia, midieron en el espectrofotómetro UV-vis a una absorbancia de 291 nm.

Posteriormente se realizó la medición de furfural y los resultados fueron los siguientes:

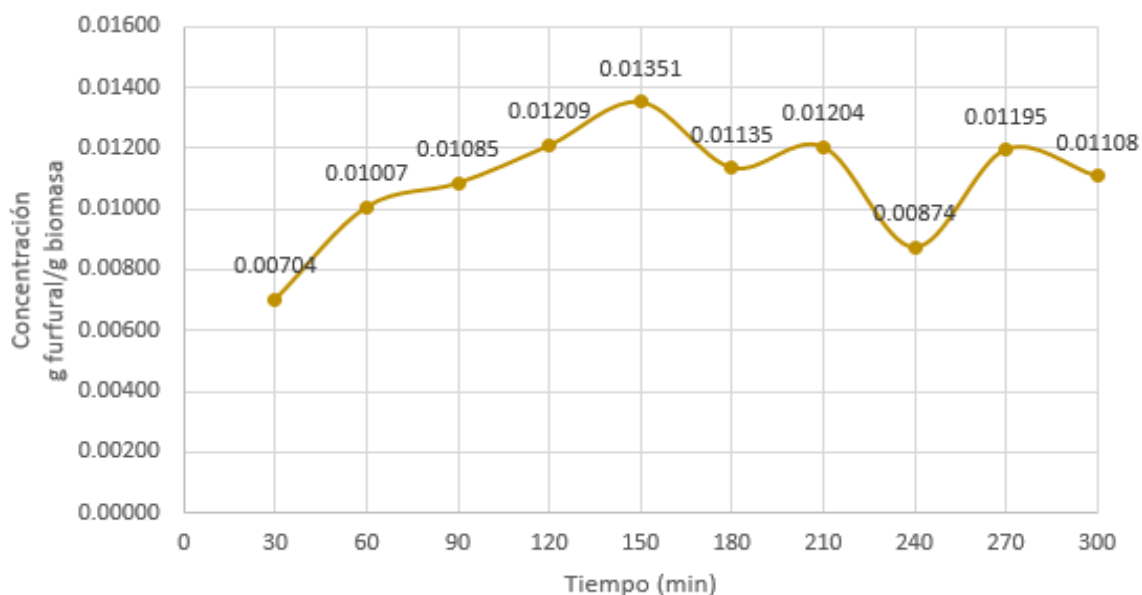


Figura 3.16 Generación de furfural muestras de hidrólisis

En la figura 3.16 se observa que la producción de furfural en las muestras a las que solo se les aplicó hidrólisis, se observa que la cantidad aumenta conforme el tiempo se incrementa; el tiempo donde se observa la mayor generación es en 150 min con una concentración de 0.01351 g furfural/g biomasa, después de ese tiempo la concentración del furfural disminuye.

A continuación, se muestra la comparación de la generación de furfural a muestras a las que se aplicó el pretratamiento hidrotérmico y a las que no se aplicó este pretratamiento:

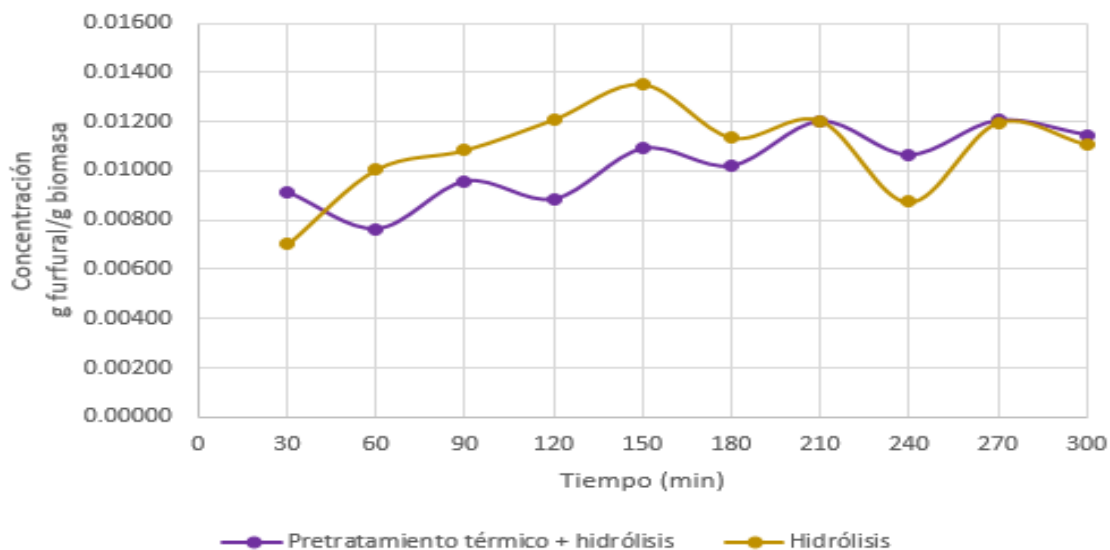


Figura 3.17 Generación de furfural para ambos grupos de muestras

En la Figura 3.17 se muestra la comparación de producción de furfural, se observa que los inhibidores se generan conforme el tiempo de reacción va aumentando. La mayor cantidad de furfural se obtuvo en las muestras de residuos a las que se les realizó hidrólisis ácida, es decir, a las muestras de coco que no se les aplicó pretratamiento hidrotérmico.

### 3.2.3 Cuantificación de HMF

Para determinar la cantidad de Hidroximetilfurfural generado por la descomposición de azúcares, se realizó una curva de calibración del reactivo HMF, partiendo de una concentración de 200 mg/ L y se tomaron 8 puntos de referencia. Posteriormente se realizaron las lecturas y los resultados se muestran continuación:

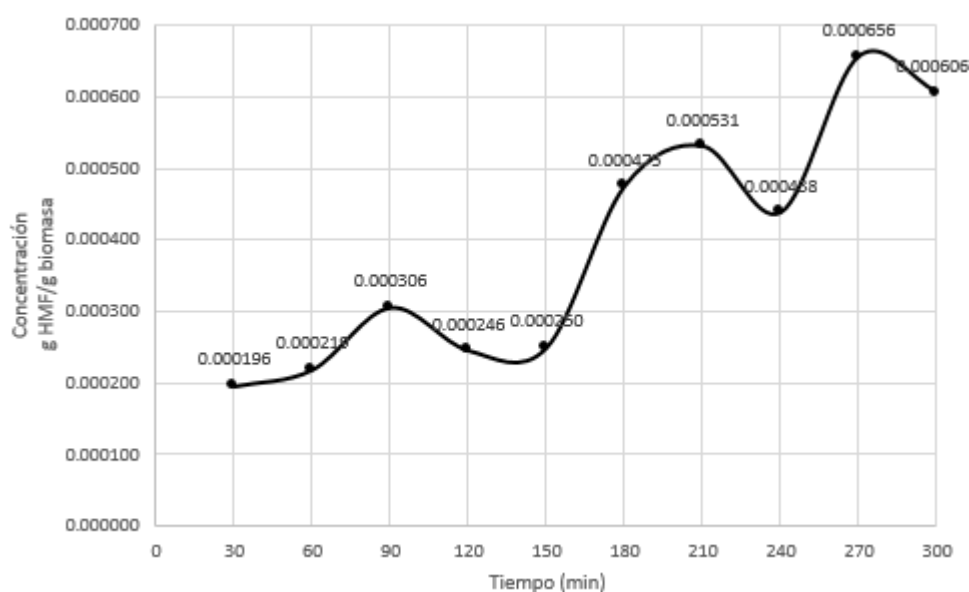


Figura 3.18 Generación de HMF muestras de hidrólisis

Como se muestra en la Figura 3.18, a medida que avanza el tiempo de reacción, la generación de HMF aumenta, la mayor concentración se dio en el tiempo de 270 min, con una concentración de 0.000656 g furfural/g biomasa.

## CONCLUSIONES

Al término de la presente investigación se tuvieron las siguientes conclusiones:

- A través de la espectrofotometría de infrarrojo, se observó que en el residuo de coco se encuentra celulosa, hemicelulosa y lignina.
- El residuo presenta una estabilidad térmica, por lo que el tratamiento con ácido no influye en la degradación del mismo. El residuo de coco es térmicamente estable.
- En el análisis de microscopia electrónica de barrido, se observa estructura del residuo de coco sin pretratamiento, así como la estructura modificada por el ácido sulfúrico.
- El análisis EDS mostró que la estructura del residuo de coco contiene: carbono y oxígeno, elementos característicos que indican que es materia orgánica.
- El porcentaje de holocelulosa se observó en mayor cantidad a la muestra que se realizó pretratamiento hidrotérmico, por lo que dicho tratamiento influye en la generación de azúcares.
- La mayor generación de azúcares, se efectuó en las muestras a las que se aplicó pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis ácida.
- Para las muestras a las que se les aplicó pretratamiento hidrotérmico más hidrólisis ácida, la mayor generación de azúcares fue en un tiempo de 120 y 300 min.
- La cantidad de azúcares que se generó en 300 min es de 6.86 g azúcares/g biomasa y en 120 min es de 6.13 g azúcares/g biomasa
- Para las muestras a las que se les aplicó hidrólisis ácida, la mayor generación de azúcares fue en un tiempo de 150 min con una concentración de 3.14 g azúcares/g biomasa
- El furfural se generó en mayor cantidad en las muestras que solo se aplicó la hidrólisis ácida.
- El HMF se formó en mayor cantidad en el tiempo de 270 min para la muestra a la que solo se le aplicó hidrólisis.

## REFERENCIAS

Agbor Valery, B., Cicek N., Sparling R., Berlin A., Levin David, D. (2011). Biomass pretreatment: Fundamentals toward application. *Biotechnology Advances*. Vol. 29, 675-685

Anirudhan T, Unnithan, M. Arsenic (2007). Removal from aqueous solutions using an anion exchanger derived from coconut coir pith and its recovery. *Chemosphere*: 60–66.

Barakat, A., de Vries, H., Rouao, X., (2013). Dry fractionation process as an important step in current and future lignocellulose biorefineries: a review. *Bioresour Technol* 134:362–373

Barroso Casillas, M. (2010). Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Behera, S., Arora, R., Nandhagopal, N., & Kumar, S. (2014). Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 36, 91-106.

Casco, J. M., Herrero, R. H. (2008). Compostaje. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 530p.

Cavides H, Rojas W. (1994). Evaluación de la estopa de coco como fuente alternativa de fibra celulósica para papel. Tesis (Ingeniero Químico). Santiago de Cali:Universidad del Valle.

Chapla, D., Pandit, P., Shah, A. (2011). Production of xylooligosaccharides from corncob xylan by fungal xylanase and their utilization by probiotic. *Bioresour Technol* 15:215–221

Flores, N., Gutiérrez, D., Solache, M., Cuellar, F., Carreño, M.C. (2023). Producción de azúcares reductores a partir de coronilla de piña, olote de maíz y tallo de rosa utilizando ácido fosfórico: cinética y termodinámica. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 23, 1-9. DOI: 10.24275/rmiq/IA24159

Freire, L. (2012). Esmeraldas digital noticias. Available from <http://esmeraldas2012.blogspot.com/>

Galbe, M. & Zacchi, G. (2002). A review of the production of ethanol from softwood. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 59: 618-628.

Garcés, A., Vélez, N., Ruiz, S., Serna, J., Suarez, E. (2006). Evaluación de algunos residuos orgánicos como sustrato para el cultivo de hongos comestibles. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(2), 15-20.

Gutiérrez, D., Carreño, M.C., Solache, M., Gómora, J.C., Ventura, S., Flores, N. (2022). Kinetic and thermodynamic study on acid cob, rose stem, and pineapple crown. *Chemical Engineering Communications*. 1-10. DOI: 10.1080/00986445.2022.2129620.

Gómora, J.C., Carreño, M.C., Flores, N., Hernández, M.C., Fernández, S.M. (2020). Kinetic and thermodynamic study of corn cob hydrolysis in phosphoric acid with a low yield of bacterial inhibitors. *Biomass and Bioenergy*. Vol 143. 1-9. DOI: 10.1007/s10570-022-05022-6

Gómora, J., Carreño, M.C., Cuellar, F., Flores, N. (2022). Producción de azúcares por hidrólisis ácida diluida del bagazo de avena con tres ácidos diferentes: cinética y termodinámica. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 21, 1-15. DOI: 10.24275/rmiq/IA2822

Gómora, J.C., Tecante, A., Carreño, M.C., Flores, N., Ventura, S. (2022). Preparation of porous microcrystalline cellulose from mezcal industry agave bagasse by low reagent loading sequential chemical treatment. *Springer Natura B.V.* DOI: 10.1007/s10570-022-05022-6

Han, J. (2008). "Properties of non Wood Fibers", USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison WI 53705-2398. USA. Instituto Peruano del Espárrago. 2004. Primer censo nacional de productores y plantas de procesamiento de espárrago. Lima. Perú.

Howard, R., Abotsi, E., Jansen van Rensburg, E., Howard, S. (2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *Afr J Biotechnol* 2(12):602–619

Kalia, S., Dufresne, A., Cherian, B. M., Kaith, B. S., Avérous, L., Njuguna, J., & Nassiopoulou, E. (2011). Cellulose-based bio-and nanocomposites: a review. *International journal of polymer science*, 2011.

Keller, F. (1996). Integrated bioprocess development for bioethanol production. In: Wyman CE (ed) Handbook on bioethanol: production and utilization. Taylor and Francis, Bristol. 351-357.

Kshirsagar, S., Wagmare, P., Loni, P., Patil, S., Govindwar, S. (2015). Dilute acid pretreatment of rice straw, structural characterization and optimization of enzymatic hydrolysis condition by response surface methodology. RSC Adv 5:46525 46533

Kumar, R., Wyman, E. (2009). Effect of xylanase supplementation of cellulose on digestion of corn stover solids prepared by leading pretreatment technologies. Bioresour Technol 100:4203–4213

Kumar, P., Barrett D., Delwiche, M., Stroeve, P. (2009). Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. Ind Eng Chem Res 48:3713–3729

Larsson, S. (2000). Ethanol from lignocellulose-Fermentation inhibitors, detoxification and genetic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for enhanced resistance. Tesis doctoral. Lund. Suecia.

Lázaro, L., & Arauzo, J. (2004). Aprovechamiento de residuos de la industria de conservas vegetales. Hidrólisis enzimática. Universidad de Zaragoza. España. Localización: [Zubía](#), ISSN 0213-4306, [Nº 12, 1994](#), págs. 227-240

Lenihan, P., Orozco, A., O'Neill, E., Ahmad, M., Rooney, D.W., Walker, GM. (2010). Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass. Chem Eng J 156:395–403

León, J. (1897). Botánica de los cultivos tropicales. San José: IICA

Mäki-Arvela, P., Anugwom, I., Virtanen, P., Sjöholm, R., Mikkola, JP. (2010). Dissolution of lignocellulosic materials and its constituents using ionic liquids – a review. Ind Crop Prod 32(3):175–201



Mood, S.H., Golfeshan, A.H., Tabatabaei, M., Jouzani, G.S., Najafi, G.H., Gholami, M., Ardjmand, M. (2013). Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew Sustain Energy Rev* 27:77–93

Nath Y, De Coninck J, Husson F, Durand A, Kumar S (2011) Comparison of some new pretreatment methods for second generation bioethanol production from wheat straw and water hyacinth. *Bioresour Technol* 102:4416–4424. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.125>

Oliva, J.M. (2003). Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de ciencias biológicas

Parameswaran, B., Ashok, P. (2015). Introduction: lignocellulosic biomass. In: Ashok P, Sangeeta N, Parameswaran B, Christian L (eds) *Pretreatment of biomass: processes and technologies*. Elsevier, India, pp 3–6

Quintero G, S.L. (2003). Evaluación del uso de la estopa de coco (*Cocos nucifera*), obtenida como residuo de la industria alimenticia en el Valle del Cauca, para la elaboración de elementos prefabricados de concreto aligerado [Trabajo de grado Ingeniero Agroindustrial]. Palmira: Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración.

Ragauskas, A.J., Williams, C.K., Davison, B.H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C.A., Frederick, W.J., Hallett, J.P., Leak, D.J., Liotta, C.L., Mielenz, J.R., Murphy, R., Templer, R., Tschaplinski, T. (2006). The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 311(5760):484–489

Rabemanolontsoa, H., Saka, S. (2016). Various pretreatment of lignocellulosic. *Bioresour Technol* 199:83081.

Roberto, I.C., Mussatto, S.I., Rodrigues, R.C.L.B. (2003). Dilute-acid hydrolysis for optimization of xylose recovery from rice straw in a SemiPilot reactor. *Ind Crop Prod* 17:171–176

Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de Energía alternativa a los combustibles fósiles. XII Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 2010; 104. Vol. 104, Nº. 2, pp 331-345, 2010

Romero, A.J., Molina, A., García, P., Ruiz-Colorado, A.A., Linares-Solano, A. & Salinas Martínez de Lecea, C. (2003). "Phosphoric acid activation of recalcitrant biomass originated in ethanol production from banana plants". *Biomass and Bioenergy*, 35 (3), 1196–1204. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.12.007

Roy, A. & Kumar, A. (2013). Pretreatment methods of lignocellulosic materials for biofuel production. *A review. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*. Vol. 2, 181-193.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Producción de copra y coco en México.

Singh, S., Cheng, G., Sathitsuksanoh, N., Wu, D., Varanasi, P., George, A., Balan, V., Gao, X., Kumar, R., Dale, B. E., Wyman, C. E., Simmons, B. A. (2014). Comparison of different biomass pretreatment techniques and their impact on chemistry and structure. *Frontiers in Energy Research*. Vol. 2, 1-12.

Solarte Toro, J.C., Romero García J. M., Martínez Patiño J. C., Ruiz Ramos E., Castro Galiano, E., Cardona Alzate, C. A. (2019). Acid pretreatment of lignocellulosic biomass for energy vectors production: A review focused on operational conditions and techno-economic assessment for bioethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 107, 587-601.

Sun Y. & Cheng J. (2002) Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*. 83: 1-11.

Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences*, 9(9), 1621-1651.

Timung, R., Mohan, M., Chilukoti, B., Samsal, S., Banerjee, T., Goud, V.V. (2015). Optimization of dilute acid and hot water pretreatment of different lignocellulosic biomass: a comparative study. *Biomass Bioenergy* 8:9–18

Visioli, L.J., Enzweiler, H., Kuhn, R.C., Schwaab, M., Mazutti, M.A. (2014). Recent advances on biobutanol production. *Sustain Chem Process* 2(15):1–9  
Wyman C. E. (1996). Ethanol production from lignocellulosic biomass: overview. Wyman, C. E. 1-18. Bristol, Taylor and Francis. Handbook on bioethanol: production and utilization.

Sun, Y., Cheng, J. (2001). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7625, USA. *Bioresource Technology* 83 (2002) 1–11

Young H.J., Kyoung, H.K. (2015). Acidic pretreatment. In: Ashok P, Sangeeta N, Parameswaran B, Christian L (eds) Pretreatment of biomass: processes and technologies. *Elsevier, India*, pp 27–50

Zheng, Y., Zhao, Y., Xu, F., Li. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 42, 35-53.