

## **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PIRÓLISIS CON RESIDUOS DE MAÍZ Y COCO EN ATMÓSFERA DE CO<sub>2</sub>**

### **EVALUATION OF THE PYROLYSIS PROCESS WITH CORN AND COCONUT WASTES IN CO<sub>2</sub> ATMOSPHERE**

---

**Brian Castro<sup>1</sup>, John Rodríguez<sup>1</sup>, Wilson Hernández<sup>1</sup>, Gabriel Camargo<sup>1</sup>, Nikolay Agudelo<sup>2</sup>**

Universidad Libre de Colombia, (1) Ingeniería Mecánica/Ingeniería, (2) Ingeniería Ambiental/Ingeniería, Ak. 70 #53-40, Sede bosque popular, Bogotá D.C. – Colombia.  
(e-mail: brian.castros@unilibrebog.edu.co)

*Recibido: 26/10/2020 - Evaluado: 23/12/2020 - Aceptado: 16/01/2021*

---

#### **RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo es evaluar el proceso de pirólisis mezclando residuos de los cultivos de coco y maíz, en atmósfera de CO<sub>2</sub> y compara el resultado del producto sólido obtenido en la biomasa de partida. Para esta investigación se caracterizó la materia prima mediante análisis próximo, espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), y análisis termogravimétrico (TGA). El proceso de pirólisis se realizó en un reactor de lecho fijo con un flujo de CO<sub>2</sub> a una temperatura de 450°C y por un tiempo de 2 horas (2.77\*10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s). Los resultados obtenidos demuestran que el poder calorífico de los residuos carbonosos de la pirólisis se incrementa en un 59.7% comparado con el de la materia prima original, el FTIR del sólido demuestra la transformación de los grupos carbonilo e hidroxilo originales que hacen parte de los gases y productos condensables.

#### **ABSTRACT**

The objective of the present work is to evaluate the pyrolysis process mixing corn and coconut crop residues in CO<sub>2</sub> atmosphere and to compare the result of the solid product obtained in the starting biomass. For this research, the feedstock was characterized by proximate analysis, Fourier transform infrared spectrometry (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and thermo-gravimetric analysis (TGA). The pyrolysis process was carried out in a fixed bed reactor with a CO<sub>2</sub> flow at a temperature of 450°C and for a time of 2 hours (2.77\*10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s). The results show that the calorific value of the carbonaceous residues from the pyrolysis is increased by 59.7% compared to the original raw material, the FTIR of the solid demonstrates the transformation of the original carbonyl and hydroxyl groups that are part of the condensable gases and products.

Palabras clave: pirólisis, caña de maíz, cáscara de coco, biocombustible  
Key words: pyrolysis, corn cane, coconut shell, biofuel

## INTRODUCCIÓN

Es importante destacar que aproximadamente el 82% del consumo energético mundial está basado en combustibles de naturaleza fósil (petróleo, carbón y gas natural) (Emeka *et al.*, 2015; Indian PNG Statistic, 2020). En la actualidad y debido al agotamiento de las fuentes fósiles, las fluctuaciones del precio de los combustibles y la problemática ambiental relacionada con el calentamiento global ocasionado por los gases de efecto invernadero y calidad del aire, se trabaja por tener energías limpias y renovables, como: la eólica, solar, de marea, geotérmica y de biomasa para ser utilizadas como alternativa (Nsful *et al.*, 2015; Rout *et al.*, 2016; Ali *et al.*, 2017).

Es centro de interés la investigación científica e industrial, en el contexto de la generación sostenible de calor, la seguridad energética, el cambio climático, la mitigación y la obtención de combustibles alternativos a partir de fuentes renovables respetuosas con el medio ambiente, destacándose los residuos lignocelulósicos de cultivos de gran extensión en vías de desarrollo, justamente por ser los únicos portadores de carbono renovable y sostenible; (Van der Stelt *et al.*, 2011), con el potencial de convertirse en combustibles líquidos, productos químicos y materiales sintéticos que reemplazan a los combustibles fósiles (Molinder *et al.*, 2016; Conesa *et al.*, 2014).

En el último quinquenio, mundialmente el aprovechamiento energético de los residuos lignocelulósicos a nivel industrial y doméstico han alcanzado una relevancia creciente, sobre todo porque utilizar la energía de la biomasa, es amigable con el medio ambiente ya que no contribuye a un incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera (McKendry, 2002), por otra parte podría ser una alternativa interesante para crear empleo en áreas rurales y aportar a la independencia energética de países en vías de desarrollo.

La transformación denominada pirólisis consiste en someter los residuos lignocelulósicos a elevadas temperaturas, en ausencia de oxígeno y durante un tiempo determinado, para romper sus estructuras y de esta manera generar combustibles sólidos, líquidos o gaseosos (Sokhansanj *et al.*, 2002; Delgado *et al.*, 2013).

Para este tipo de estudios se han empleado materiales tales como cuesco de palma, cascarilla de café, caña de azúcar, semillas de algodón, albaricoque, eucalipto, pino, residuos de tabaco, palma de olivo, girasol, tallos de ajo, frutales, entre otros.

La distribución relativa de los productos suele depender de las condiciones de pirólisis, así como del tipo de biomasa. La literatura especializada sobre pirólisis de biomasa se centra en; el análisis de los componentes volátiles, la cinética de pirólisis, temperatura, velocidad de gas inerte, tamaño de partícula, grado de mezcla, etc. (Meng *et al.*, 2015). Los productos que se pueden generar de estas transformaciones se pueden observar en la Figura 1.

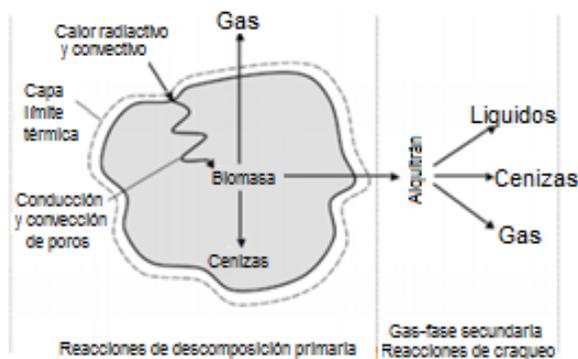


Fig. 1: Pirólisis en una partícula de biomasa (Fuente: Adaptado de Sokhansanj *et al.*, 2010).

Para este tipo de estudios se han empleado materiales tales como cuesco de palma, cascarilla de café, caña de azúcar, semillas de algodón, albaricoque, eucalipto, pino, residuos de tabaco, palma de olivo, girasol, tallos de ajo, frutales, entre otros.

Estos residuos lignocelulósicos están constituidos por una mezcla de celulosa, hemicelulosa (García *et al.*, 2015; Carrier *et al.*, 2016), se pueden observar en las Figuras 2 y 3.

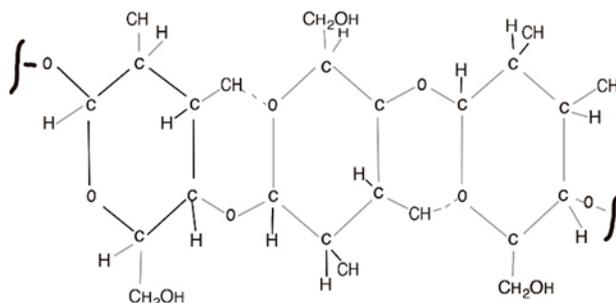


Fig. 2: Estructura molecular de la celulosa (Fuente: Adaptado de Sokhansanj *et al.*, 2010).

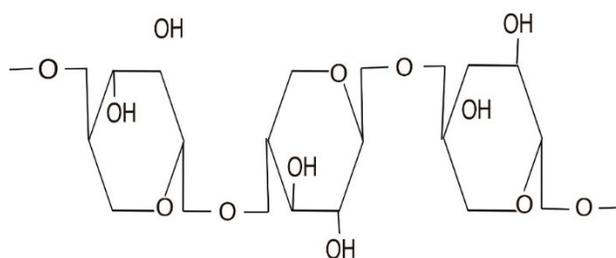


Fig. 3: Estructura molecular de una Hemicelulosa típica, Xilano (Fuente: Adaptado de Sokhansanj *et al.*, 2010).

La pirólisis rápida de la lignina se ha estudiado en gran medida como método de formar productos químicos valiosos o combustibles de hidrocarburos (Nsimba *et al.*, 2013).

Una manera alterna de modificar la distribución de los productos obtenidos de la pirólisis, es mediante la descomposición térmica simultánea de mezclas con sustratos diferentes (co-pirólisis), por ejemplo, residuos agrícolas y componentes poliméricos (Wang *et al.*, 2017; Iraola-Arregui *et al.*, 2018; Ozonoh *et al.*, 2018; Polanco, 2019; Díaz *et al.*, 2020; Escobar *et al.*, 2020).

En el presente trabajo de investigación se evidencia el efecto del porcentaje de mezcla y temperatura sobre las propiedades del carbón residual que queda como resultado del proceso de pirólisis.

Colombia es un país con vocación agrícola lo que permite utilizar este hecho para emplear residuos lignocelulósicos de diferentes cultivos en el desarrollo de energías alternativas con miras a obtener combustibles que sean sólidos, líquidos y gaseosos, mediante las transformaciones termoquímicas. Los residuos de la agroindustria no se aprovechan del todo y se usan principalmente para densificar (Williams, 2013), como lo son los cultivos coco y maíz que abarcan un área extensa de 60000 km<sup>2</sup> (Gómez *et al.*, 2008), y una producción de 1'500.000 ton respectivamente para el año 2013 (AENE Consultoría, 2003). Lo que permite establecer que se cuenta con un material residual que posibilita investigar en procesos de pirolisis. Existen diferentes tipos de transformaciones termoquímicas cuyas diferencias generales se resumen en la Tabla 1.

La producción mundial de Coco proveniente de 95 países, de acuerdo con la organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAOSTAT) en 2014 alcanzó 61.750.899 toneladas y en el mismo año en México, la industria del coco procesó 1.168.176 toneladas de residuos de coco en el ambiente, lo que generó solamente de endocarpio de coco 140.181.124 toneladas (12 % p/p) (Quintana *et al.*, 2017).

Tabla 1: Distribución de productos durante la pirolisis. Efecto del Tiempo de residencia y temperatura. (Fuente: Adaptado de Álvarez *et al.*, 2014).

Proceso termoquímico	Tiempo de residencia (s)	Temperatura superior (°K)	Carbonizado	Líquido	gas
Pirolisis convencional	1800	470	85-91	07.-12	2-5
	1200	500	58-65	17-24	8-14
	900	550	44-49	26-30	16-22
	600	600	36-42	27-31	27-34
	600	850	27-33	20-26	36-41
Pirolisis lenta	200	600	32-38	28-32	25-29
	90	750	26-32	27-34	33-37
Pirolisis rápida	5	650	29-34	46-53	11-15
	3	800	14-19	65-72	14-20

El maíz es un alimento importante para muchas personas en el mundo, También es una buena fuente de productos industriales como; el almidón, vitamina (Zhang *et al.*, 2012), fibra (Pandya & Srinivasan, 2012), aceite (Comin *et al.*, 2012) y etanol (Lamsal *et al.*, 2011).

La producción global de maíz Incrementó de 599,35 a 867,52 millones de toneladas (44,74% de incremento) durante el período 2001-2011 (según datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), que es mucho mayor que el aumento del 12,34% de la población en el mundo durante el mismo período. El residuo que queda en la superficie del suelo después de que se ha cosechado el grano de maíz, es rastrojo de maíz y se compone de mazorca, hojas y fracciones del tallo (Shinners *et al.*, 2003), estas fracciones son importantes residuos de maíz para procesamiento y consumo. Por cada 1 kg de granos de maíz producido, alrededor de 0,15 kg se compone de mazorcas, 0,22 kg de hojas y 0,50 kg se producen tallos (Sokhansanj *et al.*, 2010). Esto se traduce en la producción de alrededor de 130,13, 190,85 y 433,76 millones de toneladas de mazorcas, hojas y tallos, en 2011, respectivamente. Actualmente, estos residuos tienen numerosas aplicaciones limitadas que incluyen: (a) uso de mazorcas de maíz como construcción material y carbón activado (Pinto *et al.*, 2012), (b) uso de hojas de maíz como materia prima para azúcares fermentables y fuente de fibra suplementaria para la pasta de papel (Su *et al.*, 2006) y (c) el uso de tallos de maíz como alimento para ganado y bio-fertilizante (Chen *et al.*, 2010).

El estudio comprendió el adecuamiento de las materias primas, la caracterización fisicoquímica de la misma mediante análisis próximo y último, determinación de grupos funcionales mediante análisis infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), determinación de la pérdida de peso en función de la temperatura con el análisis termo gravimétrico (TGA) empleando diferentes velocidades de calentamiento, obtención de una mezcla con composición 50% de residuos de maíz y coco respectivamente, determinación del poder calorífico de la mezcla de biomásas y se realizó el análisis termodinámico del proceso reactivo para cada una de las biomásas de partida empleando el Software Chemical Equilibrium with Application (CEA), desarrollado por la NASA. Una vez efectuada la pirolisis se cuantificó el poder calorífico del carbonizado obtenido, se determinó los grupos funcionales existentes en el producto sólido y se realizaron fotografías mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El material residual de la caña de maíz se obtuvo en la región de Ventaquemada, Boyacá, y la cáscara del coco en la Central Mayorista de Abastos, CORABASTOS en Bogotá. En el desarrollo de la caracterización de la biomasa antes de ser sometida a degradación térmica (pirólisis), se adecua la materia prima a un proceso de secado por 12 horas a 80°C, después de lo cual se realizó un proceso de molienda y tamizado en pequeñas partículas mediante la trituración, para trabajar con las fracciones que tuvieran el mismo tamaño de partícula para garantizar una mezcla de composición homogénea al 50%, se basó en normas para determinar algunas características. Se procede a realizar análisis y pruebas en laboratorio y así determinar los productos obtenidos. Para los análisis se

manejó un diámetro de partícula 0,0394 in con desviación estándar de 0,0112 in, realizado con la norma ASTM E11-Standard (Specification for wire cloth and Sieves for Testing Purposes), establece el tamaño de la malla que deben tener los tamices.

Las materias primas por separado se caracterizaron mediante análisis próximo, análisis elemental, poder calorífico superior y espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier FTIR. El interés principal de este trabajo se centra en la evaluación de la co-pirólisis de caña del maíz y cáscara de coco. El Análisis próximo de las biomásas se efectuó según normas ASTM (D3173, D3174, D3175 y D3172). Para la determinación de humedad, material volátil, cenizas y carbón fijo respectivamente.

Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier FTIR. Análisis infrarrojo se realizó con un equipo IR Prestige-21 SHIMATZU, según norma ASTM WK 24875.

El análisis último permite la determinación de los elementos constitutivos (C, H, O, N y S), se realizó en un analizador elemental CE440. El poder calorífico se cuantificó en una bomba Parr 1341 Plain Oxigen Bomb Calorimeter, de acuerdo a la norma DIN 51900. Análisis Termo gravimétrico se efectuó en un equipo STA 7200 Thermal Analysis System- HITACHI, según norma ASTM D 7582, evaluando el proceso de pirólisis en atmósfera de CO<sub>2</sub> con velocidades de calentamiento (5, 10 y 20 °C min<sup>-1</sup>), para establecer las condiciones experimentales adecuadas de operación en el reactor. El cual posee el control de todas las variables a utilizar: rampa de calentamiento, temperatura máxima, temperatura mínima y atmósfera inerte.

Análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM): se efectúa un análisis superficial, el cual consiste en obtener información morfológica, topográfica y composición de las muestras produciendo imágenes de alta resolución (de hasta 3nm). El cual fue desarrollado utilizando un JEOL JSM6490LV con un voltaje de aceleración de 20kv. Según norma ASTM E1588.

Según la literatura también se han determinado algunos efectos debidos a los principales componentes de la biomasa. Los tipos de biomasa de madera dura como lo es la cáscara del coco conformada por fracciones mayores de lignina. La mayor presencia de este componente está asociada con mayores rendimientos de la fracción de carbonizado durante la pirólisis (Gómez *et al.*, 2008) y es posible formular de acuerdo con ec. 1.

$$\%Lignina = \frac{(WLignina)}{(Wanhidroddamuestra)} * 100 \quad (1)$$

El reactor de pirólisis (Figura 4), consiste en un sistema de calentamiento controlado electrónicamente y con un sistema de alimentación regulado, además de un dispositivo de enfriamiento para la condensación de posibles materiales volátiles generados.

El análisis termo gravimétrico permitió la determinación de la energía de activación para la transformación principal, Biomasa → Volátiles.

Para esto se usó el método de Kissinger según (Slopiecka *et al.*, 2011), donde la cinética de las reacciones en estado sólido se formula de acuerdo con ec. 2.

$$k(T) * f(\alpha) = \frac{(d\alpha)}{(dt)} \quad (2)$$

Donde t representa el tiempo, T la temperatura y  $\alpha$  es la conversión normalizada de la biomasa según los datos de pérdida de peso de acuerdo a ec. 3.

1. Bala de CO<sub>2</sub>, 2. Horno, 3. Deposito materia prima, 4. Refrigerador, 5. Ambiente.

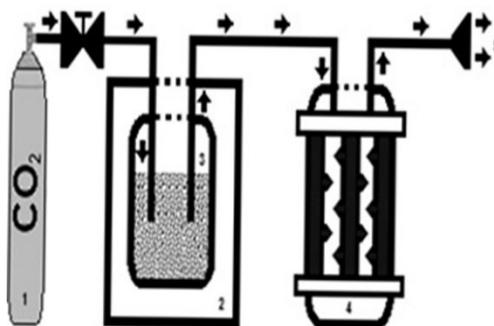


Fig. 4: Bosquejo reactor de lecho fijo (izquierda) y Reactor de lecho fijo piloto (derecha) (Fuente: elaboración propia)

$$\alpha = \frac{(m_i - m_a)}{(m_i - m_f)} \quad (3)$$

En la cual,  $m_i$  es la masa inicial de la muestra sometida al análisis termo gravimétrico (TGA),  $m_a$  es la masa en cualquier momento durante el análisis de TGA y  $m_f$  es la masa al final de la prueba. Con estas ecuaciones y recurriendo a la ecuación de Arrhenius se obtiene finalmente de acuerdo a ec. 4, que relaciona la conversión con la temperatura.

$$\frac{(d\alpha)}{(dT)} = \frac{(A)}{(\beta)} * e^{\frac{-EA}{RT}} * (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

Donde  $\beta$  es  $dT/dt$ ; esta ecuación permite calcular la energía de activación a partir de datos no isotérmicos de un análisis TGA.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización inicial mediante los análisis próximo y último se puede observar en la Tabla 2, en la cual los resultados se reportan en porcentajes máscicos.

Tabla 2: Análisis próximo y elemental de la biomasa (Caña de maíz y cáscara de coco).

	Análisis próximo. (%)				Análisis elemental. (%)				
	CF	MV	Cz	Hd	C	H	O	N	S
CM.	2,57	89,89	6,8	0,729	49,89	5,58	39,99	0,8	0,1
CC.	29,15	61,53	3,59	5,73	49,54	7,57	38,05	1,17	0,08

Estos resultados son similares a los que se reportan en otras investigaciones (Slopiecka *et al.*, 2011), con una relación atómica C/H de 7,5 y 6,5 para los residuos de maíz y coco. La relación atómica O/C es de 0,95 y 0,76 para los residuos de maíz y coco respectivamente. Estos resultados muestran que las condiciones para realizar pirólisis con solo cáscara de coco, requeriría mayores tiempos de reacción de acuerdo con lo citado por Kumar (2013) y Said *et al.* (2015) y temperatura con respecto a las que se presentarían si se realizara pirólisis con solo caña de maíz (Hernández *et al.*, 2016).

De lo reportado en los análisis últimos y empleando la metodología descrita en Gaojin & Shubin (2012), se puede generar la fórmula química para la reacción del compuesto de las biomásas que se reportan en la Tabla 3 de acuerdo con la ec. 3.

Tabla 3: Fórmula de los compuestos (fuente: elaboración propia).

Caña de Maíz.	<b>CH<sub>1.34</sub>O<sub>0.6</sub>N<sub>0.13</sub>S<sub>0.0007</sub></b>
Cáscara de Coco.	<b>CH<sub>1.83</sub>O<sub>0.57</sub>N<sub>0.026</sub>S<sub>0.0006</sub></b>

En la ec. 5, se evidencia la fórmula estequiométrica que le corresponde a la reacción que sufre cualquier biomasa sometida a transferencia de energía en forma de calor.



Para lograr una mezcla completamente homogénea se trabajó con un tamaño de partícula de malla 100 para ambos residuos. A las biomazas por separado y a la mezcla se les determinó poder calorífico y los resultados se registran en la Tabla 4.

Tabla 4: Poder calorífico de las biomazas.

PODER CALORÍFICO BIOMASAS (Kj/Kg)	
Caña de Maíz	17,965
Cáscara de coco	15,135
Mezcla residuos (50-50)	16,39
Residuo Carbonoso	26,062

Comparando los resultados obtenidos para el poder calorífico registrados en la Tabla 4 y porcentajes de lignina registrados en la Tabla 5, con la literatura, se puede evidenciar que son muy similares.

Tabla 5: Porcentaje de Lignina.

LIGNINA (%)	
Caña de Maíz	17,965
Cáscara de coco	15,135

Estos resultados muestran que el poder calorífico de la caña del Maíz es 15,75% mayor que el valor de la cáscara del Coco, el poder calorífico de la biomasa mezclada se encuentra con un 7,65% y el poder calorífico de los residuos carbonosos de la pirolisis incrementó un 41,92%, si se compara con la biomasa de la cáscara del coco.

La mezcla de biomazas se caracterizó también mediante el FTIR y el resultado se muestra en la Fig. 5, cuyos resultados se pueden resumir en la Tabla 6.

Tabla 6: Picos relevantes en las biomazas estudiadas.  
(Fuente: Adaptada de Gaojin & Shubin, 2012).

ANÁLISIS DEL ESPECTRO FTIR		
FRECUENCIA	GRUPO FUNCIONAL	ORIGEN
3000 - 3600	O - H Estiramiento	Acido, Fenol
2820 - 3000	C - Hn Estiramiento	Alquil, Alifático
1639 - 1570	C = O Estiramiento	Carbonilo, Carboxilo
1423 1514	C = C Estiramiento	Anillo Aromático
1407	O - H Vibración	Acido Uránico
1373	C-H Vibración	Alquil
1164	C-O-C Estiramiento	Estructura Arabinoxilanica
1123	C - H Deformación plano	Tipico Siringil
1044 - 900	C - O Vibración	Uniones Glucosidicas
750 - 900	C- H Deformación	Aromáticos Glucosidicos
400 - 750	C-C Estiramiento	

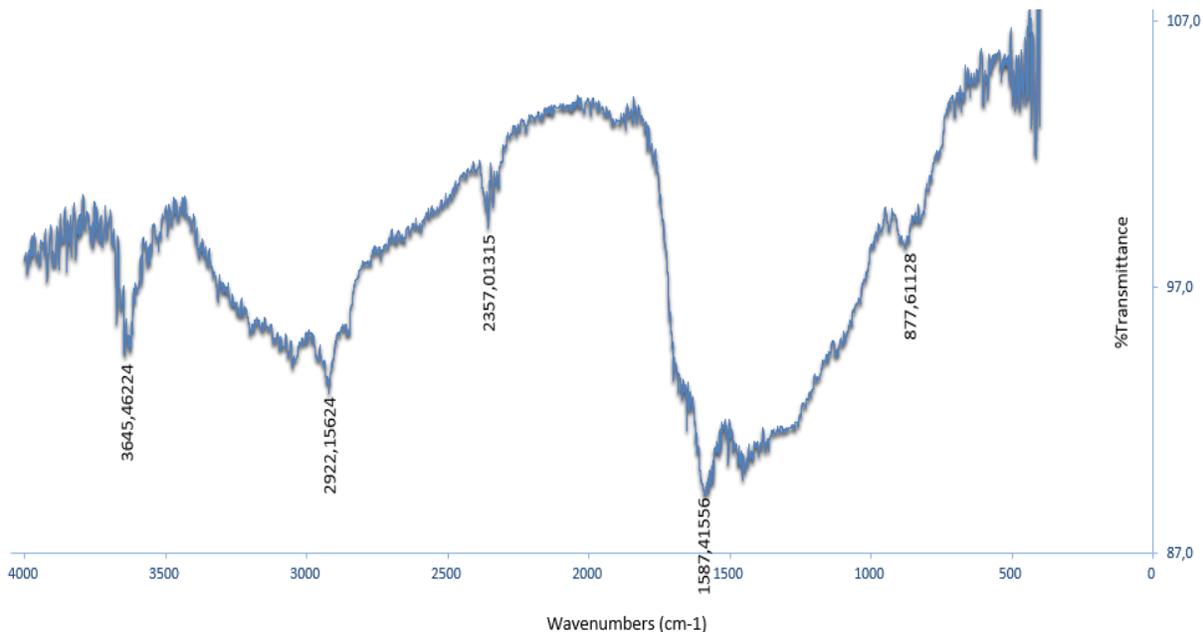


Fig. 5: FTIR de la mezcla entre cáscara de Coco y caña de Maíz

Se presentan alcoholes entre  $3500$  y  $3000\text{cm}^{-1}$  oxígeno-hidrogeno O – H tensión ( $3421,32$ ) absorción y estiramiento del enlace. Un pico intenso entre  $1000$  y  $1200\text{cm}^{-1}$  no es muy útil porque se encuentra en la región de huella dactilar donde se absorben las vibraciones de flexión de muchos grupos funcionales.

En las Figs. 6 y 7 se evidencian la razón de cambio de la pérdida de peso en función a la temperatura.

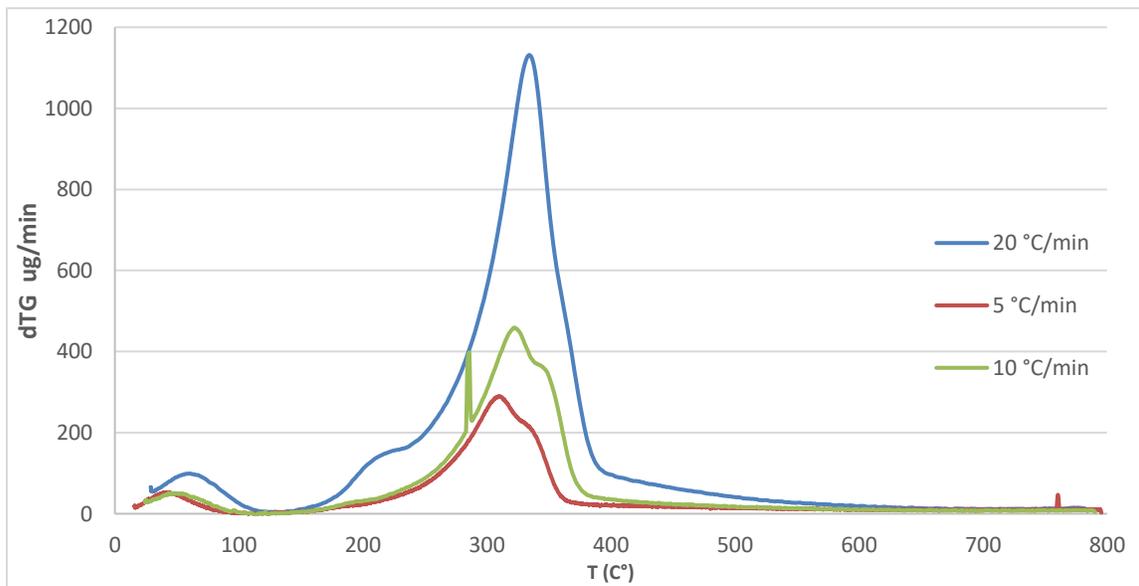


Fig. 6: Análisis (DTG) caña de Maíz.

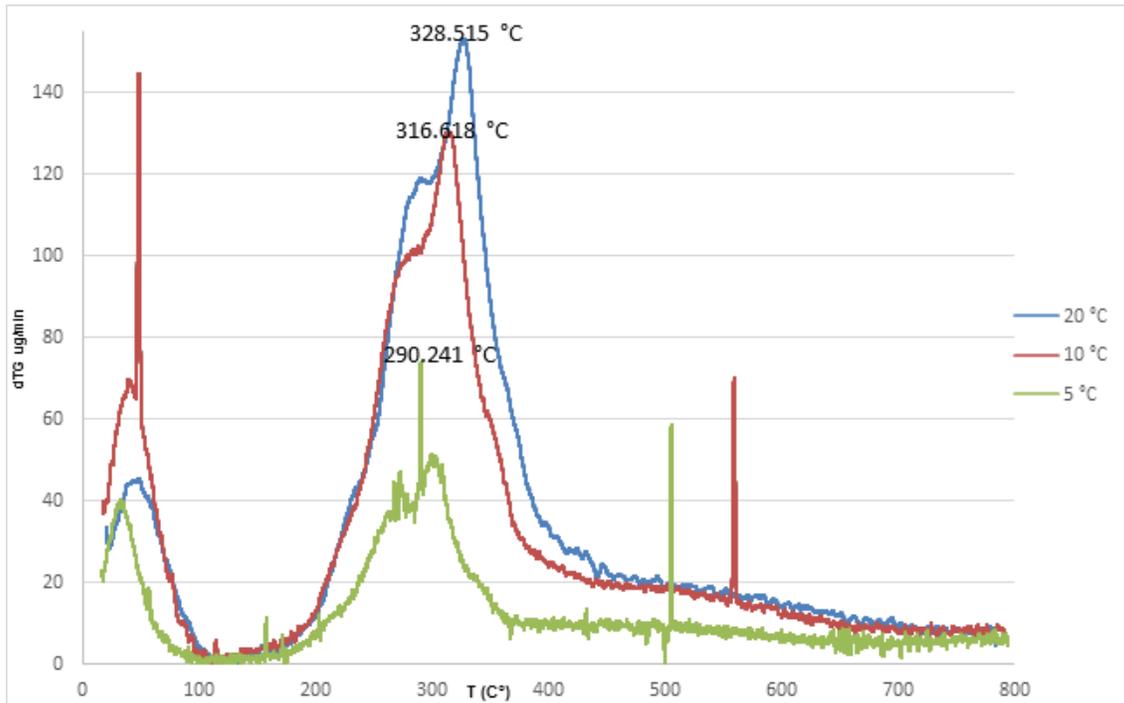


Fig. 7: Análisis (DTG) cáscara de Coco.

En la Fig. 8. Se observa la relación entre  $\ln(dX/dT)$  Vs  $1/T$  a diferentes velocidades de calentamiento 5, 10 y 20°C/MIN, usado la conversión del proceso a 70%. Se obtiene como resultando una línea recta con una pendiente.

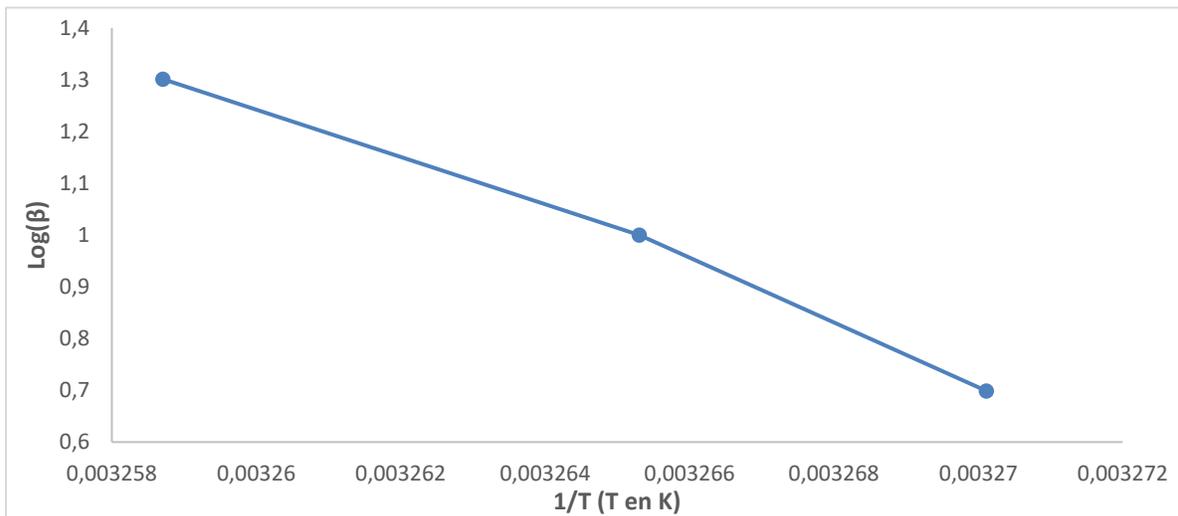


Fig. 8: Análisis  $\ln(dX/dt)$  y  $1/T$ .

En la Fig.9. Se observa el procedimiento para determinar la energía de activación según la norma ASTM E 1641-16, a partir de los datos obtenidos en el TGA.

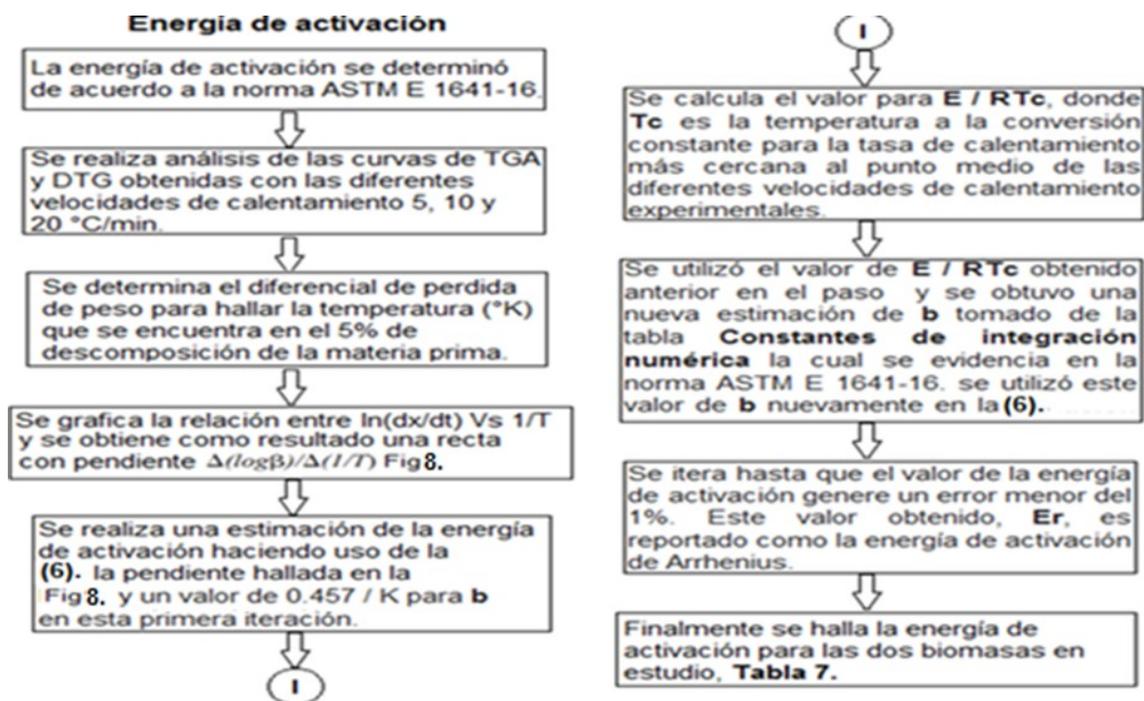


Fig. 9: Cuadro explicativo de energía de activación (Fuente: elaboración propia)

E = energía de activación de Arrhenius refinada J / mol;  
 R = constante de gas, 8.314 J / (mol • K);  
 $\Delta(\text{Log } \beta) / \Delta(1/T)$  = pendiente obtenida en la Fig. 8;  
 b = derivada de aproximación (use b = 0.457 / K en la primera iteración).

$$E = -\left(\frac{R}{b}\right) * \left(\frac{\Delta(\text{Log } \beta)}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}\right) \tag{6}$$

Tabla 7. Energía de activación.

Energía de activación. (Kj/mol)	
Caña de Maíz.	190
Cáscara de Coco.	195

En la Fig. 10, se muestra la imagen SEM correspondiente a las muestras de las mezclas sometidas al proceso de pirólisis, en la que se evidencia las diferencias morfológicas, los segmentos lineales corresponden a la cáscara de coco, mientras que los granulares son atribuibles a la caña del maíz (Fig. 10A). Se percibe también la distribución de tamaño dentro de las muestras a pesar de haber sido sometidas al proceso de molienda, tamizado y homogeneización, comprobándose una reducción aparente de volumen sufrida después del proceso de pirólisis (Fig. 10B).

Los resultados obtenidos concuerdan, en orden de magnitud con los referenciados para otras biomásas, en lo referente a los cambios presentados en los grupos funcionales presentes en el producto sólido, al igual que el aumento en el poder calorífico de la muestra pirolizada, la temperatura de trabajo seleccionada con base en los TGA permite establecer unas condiciones de pirólisis adecuada, para un análisis de los resultados acá presentados. La cinética de reacción corresponde a una de primer orden, típico de las transformaciones termoquímicas.

Los porcentajes de mezclas no presentan influencia significativa en el poder calorífico.

Las fórmulas empíricas de la materia prima son similares a las reportadas por diversos estudios.

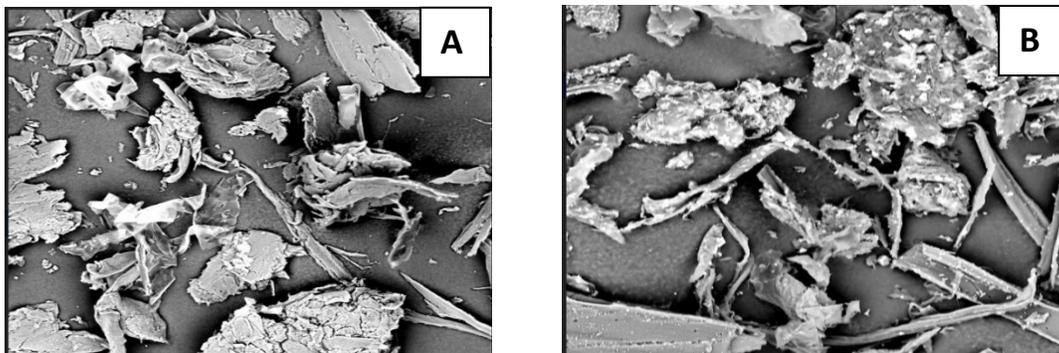


Fig. 10: A) imagen SEM antes del proceso de pirólisis, B) imagen SEM posterior al proceso de pirólisis.

## CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación se puede afirmar que el proceso de pirólisis de las materias residuales del coco y el maíz es prometedor en un país como Colombia, pues el poder calorífico del sólido obtenido después de la pirólisis es superior al de las materias primas originales. Y por poseer estos residuos una estructura con grupos funcionales como los determinados en el análisis infrarrojo de acuerdo al volumen de residuos producidos las mezclas de coco y maíz deben investigarse más a fondo.

En cuanto al proceso de pirólisis se puede concluir con base en los resultados del análisis termo gravimétrico, que la pirólisis se ve favorecida a temperaturas superiores a los 300 °C. La forma general del perfil termo gravimétrico no se ve afectado por la velocidad de calentamiento y la energía de activación determinada concuerda con los resultados disponibles en la literatura para biomazas similares.

El producto sólido obtenido después de la pirólisis posee un valor de poder calorífico mayor que el de las muestras de materias primas, aunque el porcentaje de mezcla no influye, de forma notoria en el poder calorífico final. El producto líquido obtenido presenta muestras de estructuras aromáticas con grupos funcionales OH presentes, por lo que se recomienda continuar con este tipo de investigaciones, pero centrando el interés en la fracción líquida.

## NOMENCLATURA

CM. Caña de Maíz  
CF. Carbono fijo  
Cz. Cenizas  
CC. Cáscara de Coco  
MV. Materia Volátil  
Hd. Humedad.

## REFERENCIAS

AENE Consultoría (2003). Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Documento ANC 631/03 Rev. 01. julio – 03., Bogotá: Upme. Descargado de: <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1287>

- Ali, I., Bahaitham, H. & Naibulharam, R. (2017). A comprehensive kinetics study of coconut shell waste pyrolysis. *Bioresource Technology*, 235, 1-11.
- Álvarez, J., López, G., Amutio, M., Bilbao, J. & Olazar, M. (2014). Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128, 162-169.
- Carrier, M., Auret, L., Bridgwater, A. & Knoetze, J.H. (2016). Using Apparent Activation Energy as a Reactivity Criterion for Biomass Pyrolysis. *Energy Fuels*, 30 (10), 7834–7841.
- Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X. & Luo, Y. (2010). Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production. *Waste Management*, 30 (10), 1834-1840.
- Comin, L.M., Temelli, F. & Saldaña, M.D.A. (2012). Impregnation of flax oil in pregelatinized corn starch using supercritical CO<sub>2</sub>. *The Journal of Supercritical Fluids*, 61, 221-228.
- Conesa, J.A, Urueña, A. & Díez, D. (2014). Corn stover thermal decomposition in pyrolytic and oxidant atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 106, 132-137.
- Delgado, R., Rosas, J.G., Gomez, N., Martinez, O., Sanchez, M.E. & Cara, J. (2013). Energy valorisation of crude glycerol and corn straw by means of slow co-pyrolysis: Production and characterisation of gas, char and bio-oil. *Fuel*, 112, 31-37.
- Díaz Caleño, F. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente*. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Departamento de Energética y Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente. Disponible en: <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/12340/5/T09200.pdf>
- Emeka, E.E., Charles, O.O. & Anthony, O.C. (2015). Utilization of cellulosic cassava waste for bio-ethanol production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 2797-2800.
- Escobar, M.A. (2020). *Valoración de productos sólidos en la pirólisis del PET*. Tesis de grado para Ingeniero Químico. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Colombia. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/45065/u831430.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gaojin, L. & Shubin, W. (2012). Analytical pyrolysis of corn stalk and its three main components by TG and Py – GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 11-18.
- García, R., Pizarro, C., Álvarez, A., Lavín, A.G. & Bueno, J.L. (2015). Study of biomass combustion wastes. *Fuel*, 148, 152-159.
- Gómez, A., Klose, W. & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de biomasa: cuesco de palma de aceite*. Kassel University press GmbH, 70-123.
- Hernández, W.D., Peña, F.Y. & Camargo, G. (2016). *Caracterización termoquímica de los residuos del maíz para el proceso de pirólisis*. Revista Semilleros Sembrando ciencias e Innovación nodo Bogotá, 1-7.
- Indian PNG Statistic (2020). *Indian Petroleum and Natural Gas Statistics 2018-19*. Government of India, Ministry of Petroleum and Natural Gas Economics & Statistics Division. Descargado de: <http://petroleum.nic.in/sites/default/files/arep2020.pdf>
- Iraola-Arregui, I., Van Der Gryp, P. & Görgens, J.F. (2018). A review on the demineralisation of pre and post pyrolysis biomass and tyre wastes. *Waste Management*, 79, 667-688.

- Kumar, T. (2013). *Pyrolysis of coconut Shell*. Master of Technology (Chemical Engineering) Thesis. Department of Chemical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5346/1/211CH1036.pdf>
- Lamsal, B.P., Wang, H. & Johnson, L.A. (2011). Effect of corn preparation methods on drygrind ethanol production by granular starch hydrolysis and partitioning of spent beer solids. *Bioresource Technology*, *102* (12), 6680-6686.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (Part I): overview of biomass. *Bioresource Technology*, *83* (1), 37-46.
- Meng, H., Wang, S., Chen, L., Wu, Z-a. & Zhao, J. (2015). Investigation on Synergistic Effects and Char Morphology during Copyrolysis of Poly(vinyl chloride) Blended with Different Rank Coals from Northern China. *Energy Fuels*, *29* (10), 6645–6655.
- Molinder, R., Sandstrom, L. & Wiinikka, H. (2016). Characteristics of Particles in Pyrolysis Oil. *Energy and Fuels*, *30* (11), 9456–9462.
- Nsafu, F., Collard, F-X., Carrier, M., Görgens, J.F. & Knoetze, J.H. (2015). Lignocellulose pyrolysis with condensable volatiles quantification by thermogravimetric analysis Thermal desorption/gas chromatography–mass spectrometry method. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *116*, 86-95.
- Nsimba, R.Y., Mullen, C.A., West, N.M. & Boateng, A.A. (2013). Structure–Property Characteristics of Pyrolytic Lignins Derived from Fast Pyrolysis of a Lignin Rich Biomass Extract. *ACS Sustainable chemistry & Engineering*, *1* (2), 260–267.
- Ozonoh, M., Aniokete, T.C., Oboirien, B.O. & Daramola, M.O. (2018). Techno-economic analysis of electricity and heat production by cogasification of coal, biomass and waste tyre in South Africa. *Journal of Cleaner Production*, *201*, 192-206.
- Pandya, T.S. & Srinivasan, R. (2012). Evaluation of Combination of Sieving and Air Classification for Fractionation of Grain Sorghum Flour. *Transactions of the ASABE*, *55*, 1873-1878.
- Pinto, J., Cruz, D., Paiva, A., Pereira, S., Tavares, P., Fernandes, L. *et al.* (2012). Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials*, *34*, 28-33.
- Polanco, D.L. (2019). *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de fuel oil a partir de residuos plásticos mediante un proceso pirolítico en Arequipa*. Tesis para optar al título profesional de Ingeniería Industrial, Escuela Profesional de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería y Computación, Universidad Católica San Pablo. Disponible en: [https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/16097/1/POLANCO\\_SUAREZ\\_DIA\\_RES.pdf](https://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/16097/1/POLANCO_SUAREZ_DIA_RES.pdf)
- Quintana, J.M., Barrera, A. & Moreno, M.G. (2017). Pirólisis catalítica de coco a productos de carbono. *Aristas*, *6* (11), 238-245.
- Rout, T., Pradhan, D., Singh, R.K. & Kumari, N. (2016). Exhaustive study of products obtained from coconut shell pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical*, *4* (3), 3696-3705.
- Said, M., John, G., Mhilu, C. & Manyele, S. (2015). *The Study of Kinetic Properties and Analytical Pyrolysis of Coconut Shells*. Academic Editor: Hasan Ferdi Gercel.
- Shinners K.J., Binversie, B.N. & Savoie, P. (2003). *Harvest and storage of wet and dry corn stover as a biomass feed-stock*. ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, 27-30. Society for Engineering in Agricultural, and Biological Systems.

- Slopiecka, K., Bartocci, P. & Fantozzi, F. (2011). Thermogravimetric analysis and Kinetic study of poplar wood pyrolysis. *Applied Energy*, *97*, 491-497.
- Sokhansanj S., Turhollow, A., Cushman, J. & Cundiff, J. (2002). Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy. *Biomass and Bio-energy*, *23*, 347-355.
- Sokhansanj S., Mani, S., Tagore, S. & Turhol-low, A.F. (2010). Techno-economic analysis of using corn stover to supply heat and power to a corn ethanol plant – Part 2: Cost of heat and power generation systems. *Biomass and Bioenergy*, *34* (3), 356-364.
- Su, D., Sun, J., Liu, P. & Lü, Y. (2006). Effects of Different Pretreatment Modes on the Enzymatic Digestibility of Corn Leaf and Corn Stalk. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *14* (6), 796-801.
- Van der Stelt, M.J.C., Gerhauser, H., Kiel, J.H.A. & Ptasinski, K.J. (2011). Biomass upgrading by torre-faction for the production of biofuels: A re-view. *Biomass and Bioenergy*, *35*, 3748-3762.
- Wang, J., Zhong, Z., Ding, K., Zhang, B., Deng, A., Min, M. *et al.* (2017). Co-pyrolysis of bamboo residual with waste tire over dual catalytic stage of CaO and co-modified HZSM-5. *Energy*, *133*, 90-98.
- Williams, P.T. (2013). Pyrolysis of waste tyres. *Waste Management*, *33*, 1714-1728.
- Zhang, Y., Ghaly, A.E. & Li, B. (2012). Physical properties of corn residues. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, *8* (2), 44-53.