

**OBTENCIÓN DE MATRICES CARBONADAS VEGETALES ACTIVADAS
MEDIANTE LA PIRÓLISIS DE HOJAS DE PALMA DE ACEITE**

**DIANA PAOLA CHAPARRO GUTIERREZ
WENDY MELISSA RODRÍGUEZ DÍAZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018**

**OBTENCIÓN DE MATRICES CARBONADAS VEGETALES ACTIVADAS
MEDIANTE LA PIRÓLISIS DE HOJAS DE PALMA DE ACEITE**

**DIANA PAOLA CHAPARRO GUTIERREZ
WENDY MELISSA RODRIGUEZ DÍAZ**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018**

Nota de aceptación

Firma Presidente Jurado
Diego Nicolás Rodríguez Serrano

Firma Docente Jurado 1
Nubia Liliana Becerra

Firma Docente Jurado 2
Oscar Libardo Lambana Charfuelan

Bogotá, D.C. Agosto, 2018.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero agradecerle a Dios que ha sido el creador del camino que hoy me lleva hasta la meta, dándome vida, salud y discernimiento para culminar este primer peldaño de mi vida como profesional, a mi madre y mejor amiga Martha Lucia quien durante toda mi vida se ha esmerado por ofrecerme la mejor educación, trabajando por ello arduamente y viéndose hoy reflejado al culminar con éxito este camino que un día emprendimos las dos, sin pasar por alto que esto no hubiese sido posible sin tenerla a mi lado, con sus palabras de amor y motivación constante que me dieron la fuerza y las ganas para ser persistente y darle frente a las dificultades que de alguna u otra forma querían entorpecer este propósito.

A mi mentor, mi tío Willy por ser la figura de padre más maravillosa que la vida me pudo dar, porque sin pedirlo tuve el dos por uno, dándome ternura, comprensión y apoyo durante el transcurrir de los años, privilegiándome con su amor paternal en todo momento y estando hoy aquí para recordarme como siempre mis capacidades como profesional.

A mi abuelita Ana Lucia, que durante su vida me inculco los mejores valores, me llevo siempre de su mano por el camino del amor, de la ternura y de la complicidad, acompañándome hoy y siempre desde la distancia y llevándola conmigo en el lugar más especial de mi corazón. Y a mi familia en general por brindarme siempre su apoyo incondicional en el transcurrir de los años.

A mi cómplice, Sebastian Ch por ser esa persona especial en mi vida, por estar a mi lado siempre, por apoyarme, ayudarme y brindarme palabras oportunas que hicieron parte de la motivación que me ayudo a llegar a la meta.

Y por último agradecer a las personas que conocí en este fascinante mundo de la Ingeniería Química, que me dio la oportunidad de consolidar mis conocimientos y cultivar amistades excepcionales.

Wendy Melissa Rodríguez Díaz

A Dios.

Ante todo debo agradecerle por darme la oportunidad de estudiar y formarme como profesional, porque sin su presencia, bondad y amor no hubiese sido posible llegar hasta este punto del camino.

A mis padres.

Quienes estuvieron conmigo en los momentos más difíciles de este proceso educativo dándome consejos y apoyándome siempre con buena vibra para seguir adelante, porque gracias a su dedicación y esfuerzo han sido el pilar de lo que soy; gracias a ustedes, más que un profesional soy una persona con grandes virtudes y humildad.

A mi familia.

En especial a mi tía Sandra Chaparro quien ha sido una luz en el camino, pues ella siempre ha estado alentándome con su amor para terminar esta carrera; por ponerme en sus oraciones y acogerme en sus brazos cuando lo he necesitado.

Al Ingeniero Oscar Ramírez.

Quien gracias a su conocimiento, paciencia y pedagogía, logró que pudiese ver un poco más allá de unos resultados, generándome la confianza en mí misma y la capacidad de análisis necesaria para atravesar las adversidades que se presentan a lo largo de esta formación académica.

Finalmente a mi esposo e hija.

A mi compañero de vida por ser constante y perseverante en mi vida, porque me ha motivado a cumplir mis sueños brindándome su apoyo y amor incondicional. Gracias a ti y a mi nena por darme alegrías cada día y ser el motivo más grande por el cual quiero seguir alcanzando metas.

Diana Paola Chaparro Gutierrez

AGRADECIMIENTOS

Nosotras Diana Paola Chaparro y Wendy Melissa Rodríguez autoras de este proyecto, queremos agradecer el apoyo que recibimos de nuestros padres tanto emocional como económicamente, ya que sin ellos este proyecto no hubiese podido ejecutarse ni culminarse de manera satisfactoria.

Agradecemos a nuestro director de proyecto Claudio Raúl Bernal Bustos, por su paciencia, sus palabras de apoyo, y por las instrucciones al momento de redactar y estructurar el documento ya que sus orientaciones nos permitió dar soporte a los argumentos presentados en esta investigación. También agradecemos a nuestro orientador el Ingeniero Diego Nicolás Rodríguez por su acompañamiento y constante exigencia que nos permitió adquirir la responsabilidad y compromiso frente a nuestro proyecto para desarrollarlo y culminarlo a tiempo.

Presentamos a la Universidad de América nuestra gratitud por habernos formado como profesionales mediante bases teóricas, éticas y morales que nos permitieron fortalecer nuestros conocimientos para poder desempeñarnos en el campo laboral, también agradecemos por brindarnos las herramientas, instalaciones y acompañamiento permanente para llevar a cabo nuestro proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	23
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	26
1. MARCO REFERENCIAL	27
1.1 BIOMASA	27
1.1.1 Clasificación de la biomasa.	28
1.1.2 Biomasa según su origen.	28
1.1.2.1 Biomasa natural.	28
1.1.2.2 Biomasa residual y/o industrial.	28
1.2 ESTRUCTURA DE LA BIOMASA	29
1.2.1 Celulosa.	29
1.2.2 Lignina.	30
1.2.3 Hemicelulosa.	30
1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA	31
1.3.1 Humedad.	31
1.3.2 Carbono fijo.	32
1.3.3 Contenido de cenizas.	32
1.3.4 Materia volátil.	32
1.4 APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA	32
1.5 CARBÓN ACTIVADO	33
1.5.1 Propiedades físicas del carbón activado.	33
1.5.1.1 Estructura física	33
1.5.1.1.1 Porosidad.	34
1.5.1.1.2 Área superficial	35
1.5.2 Propiedades químicas del carbón activado.	36
1.5.2.1 Composición	36
1.6 OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	36
1.6.1 La palma de aceite.	37

1.6.1.1	Proceso de extracción de aceite de palma	38
1.6.1.2	Subproductos del proceso de extracción	39
1.6.1.3	Propiedades físicas y químicas de los subproductos de palma de aceite	40
1.6.1.4	Aplicaciones energéticas de los subproductos	42
1.6.2	Tecnologías de conversión de biomasa.	44
1.6.2.1	Tipos de conversión termoquímica	45
1.6.2.1.1	Combustión directa	46
1.6.2.1.2	Gasificación	46
1.6.2.1.3	Pirólisis	46
1.6.3	Definición y clases de pirólisis.	46
1.6.4	Rendimiento de las fracciones de pirólisis.	47
1.7	METODOS DE ACTIVACIÓN	48
1.7.1	Activación física.	49
1.7.2	Activación química.	49
1.8	PROCESO DE ADSORCIÓN DE CARBON ACTIVADO	51
1.8.1	Adsorción física.	51
1.8.2	Adsorción química.	52
1.9	TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO Y SU APLICACIÓN	53
2.	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE PIROLISIS	54
2.1	METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	54
2.1.2	Descripción de criterios.	55
2.1.2.1	Criterios cualitativos	55
2.1.2.2	Criterios cuantitativos	58
2.2	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA MATRIZ DE SELECCIÓN	60
2.2.1	Método de Monte Carlo.	61
2.2.2	Descripción de las alternativas pirolíticas.	62
2.3	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
2.3.1	Análisis de histogramas para cada alternativa de pirólisis	63
2.3.2	Análisis de sensibilidad.	65
3.	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN	67
3.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PIROLISIS	67

3.1.1 Controladores de temperatura.	67
3.1.2 Condensador en húmedo.	68
3.1.3 Reactor <i>Batch</i> .	68
3.1.4 Quemador de gases.	69
3.1.5 Medidor de presión.	70
3.2 HOJAS DE PALMA DE ACEITE COMO PRECURSOR	71
3.2.1 Método de muestreo para las hojas de palma de aceite.	71
3.2.2 Recolección de las hojas de palma de aceite.	73
3.2.3 Preparación de la muestra.	74
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS HOJAS DE PALMA DE ACEITE	75
3.3.1 Determinación de pH.	75
3.3.2 Determinación de humedad.	75
3.3.3 Determinación de cenizas.	76
3.3.4 Determinación de materia volátil.	76
3.3.5 Determinación del carbono fijo.	77
3.3.6 Contraste del análisis inmediato de las hojas de palma de aceite.	79
3.3.7 Análisis elemental de las hojas de palma de aceite	80
3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL	80
3.4.1 Factores del diseño experimental.	81
3.4.2 Pre-experimentación.	82
3.4.3 Experimentación.	84
3.4.4 Nivel de significancia.	84
3.4.5 Hipótesis de experimentación.	85
3.4.5.1 Hipótesis nula (Ho)	85
3.4.5.2 Hipótesis alterna (Hi)	85
3.5 FRACCIONES OBTENIDAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS	86
3.6 RENDIMIENTO DE LA CARBONILLA EN EL PROCESO	88
3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MINITAB® 18	91
3.7.1 Análisis para un nivel de significancia de 0,05.	92
3.7.2 Análisis para un nivel de significancia de 0,25.	95
4. DETERMINAR LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES	99
4.1 ACTIVACIÓN QUÍMICA	99

4.2 METODOLOGÍA DE ACTIVACIÓN	100
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS	101
4.2.1 Índice de yodo.	101
4.2.2 Índice de azul de metileno.	105
4.3 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN	107
4.3.1 Isoterma de Freundlich.	109
4.3.2 Isoterma de Langmuir.	111
4.4 Modelo por Brunauer, Emmet y Teller (BET)	115
4.4.1 Análisis por adsorción / desorción de N ₂ (Área superficial BET)	116
4.5 Tamaño y distribución de poro	120
5. CONCLUSIONES	122
6.RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS	134

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Estructura química de la celulosa.	29
Ilustración 2. Unidades fenilpropanomonoméricas.	30
Ilustración 3. Estructura química de la hemicelulosa.	31
Ilustración 4. Arreglo estructural de las capas de grafito.	33
Ilustración 5. Estructura de las capas del carbón activado.	34
Ilustración 6. Estructura interna de un carbón activado.	35
Ilustración 7. Adsorción física.	52
Ilustración 8. Adsorción química.	53
Ilustración 10. Perfil térmico de la marmita.	69
Ilustración 11. Parte de la planta a muestrear.	72
Ilustración 12. Distribución muestral en el terreno.	74

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Racimo de fruta vacío (RFV).	42
Imagen 2. Fibras de mesocarpio.	43
Imagen 3. Cuesco de palma de aceite.	43
Imagen 4. Barra de menú Oracle Crystal Ball	62
Imagen 5. Reactor pirolítico Dr. Calderón Labs.	67
Imagen 6. Controladores de temperatura.	67
Imagen 7. Condensador en húmedo con conector de acero inoxidable.	68
Imagen 8. Reactor tipo Batch con chaqueta calefactora.	69
Imagen 9. Sistema Flame Arrester.	70
Imagen 10. Manómetro tipo U.	70
Imagen 11. Hojas de palma de aceite.	73
Imagen 12. Material empleado para el proceso pirolítico.	73
Imagen 13. Carbones obtenidos de las cuatro corridas pirolíticas	88
Imagen 14. Carbones obtenidos de las cuatro réplicas pirolíticas.	88
Imagen 15. Filtrado residual de la solución de yodo.	102
Imagen 16. Titulación del filtrado residual.	102
Imagen 17. Decoloración de la solución de azul de metileno.	105
Imagen 18. Saturación de la solución.	106
Imagen 19. Diluciones de azul de metileno	107
Imagen 20. Molino de martillos de la Universidad de América	135
Imagen 21. Tallos de hoja de palma de aceite de tamaño de 2-4 cm.	135
Imagen 22. Tallos de hoja de palma de aceite molido.	135
Imagen 23. Determinación de la humedad.	136
Imagen 24. Placa de calentamiento.	137
Imagen 25. Crisol con cenizas.	137
Imagen 26. Crisol con cenizas.	138

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Histograma para pirólisis lenta con Crystal Ball.	63
Gráfica 2. Histograma para pirólisis convencional con Crystal Ball.	64
Gráfica 3. Histograma para pirólisis rápida con Crystal Ball.	64
Gráfica 4. Sensibilidad de la alternativa 1 Pirolisis lenta.	65
Gráfica 5. Rendimiento de carbonilla en cuatro horas.	90
Gráfica 6. Diagrama de Pareto para $\alpha= 0,05$..	93
Gráfica 7. Interacción de factores para $\alpha= 0,05$.	94
Gráfica 8. Diagrama de Pareto para $\alpha= 0,25$.	97
Gráfica 9. Interacción de factores para $\alpha= 0,25$.	98
Gráfica 10. Curva de calibración absorbancia vs concentración	109
Gráfica 11. Isoterma de adsorción del azul de metileno sobre MACAVEAPAM3	111
Gráfica 12. Isoterma común del modelo de Langmuir	114
Gráfica 13. Isoterma linealizada del modelo de Langmuir	114
Gráfica 14. Isoterma de BET para la muestra no activada y activada de HPA	116
Gráfica 15 Clasificación de las isotermas de adsorción según la IUPAC.	117
Gráfica 16 Ciclos de histéresis según la IUPAC.	118
Gráfica 17. Isoterma de adsorción de N2 a 77 K.	119
Gráfica 18. Desorción acumulada del volumen de poro.	121

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Proceso simplificado de la extracción de aceite de palma.	39
Diagrama 2. Tecnologías de conversión de biomasa.	44
Diagrama 3. Tratamientos de conversión termoquímica.	45
Diagrama 4. Obtención de carbón activado.	100

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química de los subproductos de la palma de aceite.	41
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los subproductos de palma	41
Tabla 3. Parámetros de dispersión para las alternativas de pirólisis.	65
Tabla 4. Datos obtenidos por el pH-metro LAB 855.	75
Tabla 5. Análisis inmediato de las hojas de palma de aceite.	78
Tabla 6. Propiedades de las hojas de palma de aceite de Malasia.	79
Tabla 7. Composición elemental promedio para las hojas de palma de aceite	80
Tabla 8. Matriz experimental	84
Tabla 9. Desarrollo de las corridas pirolíticas en condición específicas.	86
Tabla 10. Productos obtenidos de la pirólisis de las hojas de palma de aceite.	86
Tabla 11. Tiempo meteorológico abril de 2018	88
Tabla 12. Rendimiento de las fracciones de pirolisis.	89
Tabla 13. Análisis ANOVA para $\alpha= 0,05$.	92
Tabla 14. Valor crítico para F (0,05).	92
Tabla 15. Interpretación del valor P (0,05).	93
Tabla 16. Efecto de interacción.	94
Tabla 17. Análisis ANOVA para $\alpha= 0,25$.	96
Tabla 18. Valor crítico para F ($\alpha=0,25$).	96
Tabla 19. Interpretación del valor P ($\alpha=0,25$).	97
Tabla 20. Volumen de tiosulfato implementado en la titulación.	103
Tabla 21. Resultados de índice de yodo.	104
Tabla 22. Índice de azul de metileno para MACAVEAPAM.	106
Tabla 23. Datos experimentales para la curva de calibración	108
Tabla 24. Parámetros para el modelo de Freundlich	110
Tabla 25. Parámetros para las isotermas de Freundlich y Langmuir	115
Tabla 26. Contraste de procesos termoquímicos aplicados a HPA	120

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de los tamaños de poro según la IUPAC	35
Cuadro 2. Tipos de pirólisis en función de sus variables operativas.	47
Cuadro 3. Rendimiento en las fracciones finales de la pirólisis.	48
Cuadro 4. Calificación según la selectividad en productos.	56
Cuadro 5. Calificación según el respaldo bibliográfico.	57
Cuadro 6. Matriz de selección diseñada en Excel.	61
Cuadro 8. Toma de muestra de las hojas de palma.	72
Cuadro 9. Definición de variables.	82
Cuadro 10. Rendimientos de los productos del proceso de pirólisis	83
Cuadro 11. Valores de decisión RL	113
Cuadro 12. Resultados para el análisis elemental de HPA.	139
Cuadro 13. Resultado duplicado para el análisis elemental de HPA	139
Cuadro 14. Distribución de Fisher para $\alpha = 0.05$	140
Cuadro 15. Distribución de Fisher para $\alpha = 0.25$	141
Cuadro 16. Marco normativo del proyecto.	142

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Relación del dato bibliográfico y el peso de la alternativa	60
Ecuación 2. Relación del dato bibliográfico y el peso de la alternativa	60
Ecuación 3. Determinación del tamaño muestral.	71
Ecuación 4. Determinación del porcentaje de humedad.	75
Ecuación 5. Determinación del porcentaje de cenizas.	76
Ecuación 6. Determinación del porcentaje de materia volátil.	77
Ecuación 7. Determinación del porcentaje de volatilidad.	77
Ecuación 8. Determinación del porcentaje de rendimiento	89
Ecuación 9. Miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado.	103
Ecuación 10. Normalidad residual del filtrado.	103
Ecuación 11. Cálculo del número de yodo para la muestra de carbón activado.	104
Ecuación 12. Ecuación lineal de la isoterma de Langmuir	112
Ecuación 13. Factor de separación adimensional	112
Ecuación 14. Ecuación BET.	116

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Preparación de la materia prima.	135
ANEXO B. Determinación de la humedad de la materia prima.	136
ANEXO C. Determinación de cenizas.	137
ANEXO D. Determinación materia volátil.	138
ANEXO E. Análisis elemental de las hojas de palma de aceite	139
ANEXO F. Distribución de Fisher	140
ANEXO G. Marco normativo	136
ANEXO H. Resultados Método BET y área y distribución de poros	137

GLOSARIO

BIOMASA: todo material biológico de origen vegetal, que es empleada con fines energéticos esto incluye la madera, hojas de árboles, cáscaras de frutos secos, restos de poda, residuos forestales, agrarios y silvícolas.

BIOCARBÓN: es el residuo carbonoso de la biomasa que queda tras ser aplicado un proceso de pirolisis a condiciones específicas.

CONDENSACIÓN CAPILAR: hace referencia a la presencia de mesoporos en el carbón activado, los cuales son identificados mediante la presencia de histéresis entre las ramas de adsorción y desorción de N_2 en la isoterma de BET.

ERROR TIPO I: rechazo de la hipótesis nula, aun cuando esta resulta ser verdadera.

ERROR TIPO II: aceptación de la hipótesis nula, aun cuando esta resulta ser falsa.

HISTÉRESIS: es la región de la gráfica en la cual se evidencian trayectorias diferentes para la adsorción y desorción, fenómeno dado por la diferencia de presiones de saturación para la condensación y evaporación en el interior de los poros.

MACAVEA: matrices carbonadas vegetales activadas, a partir de la conversión térmica (pirolisis) de residuos que genera la industria de la producción de aceite de palma, con el interés de maximizar su aprovechamiento y cuyo potencial se define alrededor del poder adsorbente luego de ser sometida a un proceso de activación.

MACAVEAPAM3-3R: matriz carbonada vegetal activada de la palma de aceite del departamento del Meta, correspondiente al promedio de la corrida tres con su respectiva replica, dada a las condiciones de 550°C y 4 horas.

NOMENCLATURA

- **ASTM:** american Society of Testing Materials.
- **C.A:** carbón activado
- **HPA:** hojas de palma de aceite
- **MACAVEA:** matriz carbonada vegetal activada.
- **NTC:** norma Técnica Colombiana.
- **IUPAC:** unión Internacional de Química Pura y Aplicada

RESUMEN

El presente trabajo consiste en aprovechar las hojas de palma de aceite provenientes del cultivo Camelios de Esperanza ubicado en el municipio de Granada en el departamento del Meta (Colombia) para la obtención de matrices carbonadas vegetales activadas (MACAVEA). Para ello se llevó a cabo una matriz de selección basada en el método de Monte Carlo con la que se eligió el tratamiento termoquímico de pirolisis lenta para ser aplicado a las hojas de palma de aceite, posterior a ello se realizó un diseño experimental 2^2 variando la temperatura y tiempo de residencia para analizar la influencia de ambas variables en el rendimiento de la carbonilla, con lo cual se comprobó que la temperatura es el factor que presenta mayor influencia en el proceso pirolítico, donde el mayor rendimiento del carbón fue del 35,86% en las condiciones de operación de 550°C y 4 horas. Posterior a su obtención, el carbón fue activado químicamente a partir de H_3PO_4 al 85% a 450°C y 15 horas para ser sometido a pruebas de adsorción de yodo y azul de metileno en soluciones acuosas, donde se estimó la presencia de microporos y mesoporos a través de la adsorción de moléculas de pequeño y gran tamaño. El número de yodo relacionó de manera indirecta el área superficial del MACAVEAPAM3-3R la cual fue de 298,25 mg de yodo/g de carbón activado; este valor fue corroborado mediante la técnica de adsorción/desorción de N_2 a 77K mediante el modelo de BET, el cual caracterizó la MACAVEAPAM3-3R como un sólido mesoporoso ajustándolo a una isoterma tipo IV según la clasificación de la IUPAC, este modelo arrojó un valor de área superficial de 217,42 m^2/g valor que es atribuido al volumen de microporos dispersos a lo largo de la matriz mesoporosa. A partir del análisis es aplicado el método BJH para caracterizar este sólido mesoporoso mediante la distribución del volumen de poro en función de su diámetro, siendo estos de 0.025 cm^3/g y 15nm respectivamente.

Mediante el método BET se evaluó la formación de multicapas de adsorbato a partir de la formación de la monocapa generada a bajas presiones relativas, hecho que fue evidenciado por medio del ajuste al modelo de Langmuir que describió el fenómeno de adsorción en monocapa por quimisorción, no obstante este modelo también permite la formación de segundas capas por fisorción; por lo que el carbón activado mesoporoso de hojas de palma de aceite actúa como material adsorbente de yodo, azul de metileno y N_2 en bajas proporciones.

Palabras Claves: Capacidad de adsorción, pirolisis, rendimiento, adsorción, isoterma, microporos, mesoporos, área superficial, quimisorción, fisorción.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años la biomasa residual proveniente de sectores urbanos, agrícolas, silvícolas y ganaderos era considerada como fuente de energía indispensable para la humanidad, puesto que de allí surgían todos los procesos de manufactura que satisfacían el sector industrial; pero con la aparición de los combustibles fósiles este material fue desplazado trayendo consigo problemas que surgieron a raíz de la creciente demanda energética que produjo el consumo masivo del hidrocarburo, momento en el cual se empezó la explotación desmesurada de los recursos no renovables de nuestro país con el fin de mantener la demanda que genera ganancias lucrativas para las empresas dedicadas a esta profesión. Sin embargo, esta actividad produjo afectaciones climáticas al entorno, ocasionando daños considerables en fuentes hídricas, suelo y atmosfera, a partir de esta situación, entidades han tratado de controlar esta actividad por lo que se ha incurrido en altos costos para la comercialización del combustible y este hecho ha causado que las industrias adopten nuevas estrategias que sustituyan de manera parcial o total el combustible fósil.

Las estrategias están basadas nuevamente en el aprovechamiento energético de la biomasa, puesto que la acumulación de residuos con el transcurso del tiempo se ha ido incrementando y por tanto ha llegado a convertirse en fuentes de contaminación ya que su tratamiento puede incurrir en altos costos. Material biomásico forestal y residual proveniente de industrias y cultivos energéticos poseen propiedades fisicoquímicas y características únicas que los hacen aptos para la generación de energía y la fabricación de productos químicos en forma líquida, sólida y gaseosa a partir de la transformación ya sea física, termoquímica o biológica. Procesos que son más fiables y limpios con el medio ambiente, que contribuyen a la mitigación de gases contaminantes que han sido perjudiciales para la capa de ozono y el medio.

Procesos de conversión de biomasa, en particular la termoconversión vía pirolisis de materiales lignocelulósicos, ha demostrado ser una opción viable para el aprovechamiento de biomasa residual, siendo una tecnología que se basa en la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno a temperaturas que oscilan alrededor de los 550°C, donde su finalidad es la de obtener fracciones de productos líquidos (bioaceites), material solido (carbón vegetal) y una mezcla de gases; donde el rendimiento en cada fracción depende esencialmente de las condiciones de operación del proceso como lo es el tiempo de residencia

humedad de la biomasa a pirolizar, temperatura de operación, tamaño de partícula y otros parámetros que influyen de manera directa sobre dicha variable.

Entre los residuos agrícolas que han sido aprovechados con mayor frecuencia, se encuentra el bagazo de caña, cáscara de arroz, cáscara de café, residuos de la industria tabaquera, residuos maderables, cáscaras de nueces, carozos de frutas, aserrín, cortezas y subproductos de palma de aceite como el cuesco, mesocarpio y racimo de fruta vacía, entre otros subproductos con la finalidad de conseguir un producto de mayor valor agregado por medio de procesos pirolíticos¹.

En este trabajo se estudia experimentalmente el potencial de actividad que puede llegar a tener la matriz carbonada vegetal activada tras la pirólisis de hojas de palma de aceite implementada como materia prima en el proceso termoquímico, esto mediante la caracterización de dicho material y posterior metodología que permitirá encontrar las variables influyentes en el proceso pirolítico que le atribuyen propiedades y características a la red porosa; con el objetivo de dar los primeros pasos para ser comparado con un carbón activado a partir de la distribución y tamaño de sus poros.

¹ PENEDO MEDINA, Margarita. SÁNCHEZ DEL CAMPO LAFITA, Ana. FALCÓN HERNÁNDEZ, José. Pirolisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. Parte 1: influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos. Cuba. Universidad de Oriente. Revista Tecnología Química. Vol. 28 No. 2. ISSN: 0041-8420. 2008. p. 3.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer el potencial de actividad de la matriz carbonada vegetal activada, mediante la pirólisis de hojas de palma de aceite.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar la alternativa de pirólisis a implementar con hojas de palma de aceite.
- Definir las variables de operación del reactor pirolítico a partir del desarrollo de un diseño experimental, con el fin de obtener MACAVEA con alto potencial de actividad.
- Determinar las propiedades superficiales que posee la matriz carbonada mediante técnicas analíticas.

1. MARCO REFERENCIAL

El consumo energético a base de combustibles fósiles se ha incrementado al transcurrir el tiempo, satisfacer la demanda energética se ha convertido en una problemática que ha conllevado a la explotación de los recursos no renovables del país ocasionando graves daños en fuentes hídricas, suelos, atmósfera, y del mismo modo ha ido acabando con la fauna y la flora; es por ello, que se ha recurrido a otras formas de energía para el sustento diario de las industrias y la población, aprovechando aquellos materiales residuales de origen agrícola, forestal, y agroindustrial que se encuentran disponibles y que son renovables para ser transformados en productos químicos, nuevos materiales, combustible y energía, gracias a las propiedades fisicoquímicas que estos poseen.

La biomasa para fines energéticos puede provenir de fuentes como las cosechas de plantaciones perennes, las herbáceas de cosecha anual, las gramíneas y las oleaginosas; también de los residuos de la agricultura, industria procesadora de alimentos, industria manufacturera de madera y residuos sólidos industriales y municipales. Los 32 departamentos que conforman el territorio colombiano, generan aproximadamente 21.000 ton/día de residuos sólidos procedentes de las actividades residenciales, comerciales e institucionales, con un porcentaje de material orgánico del 56,44%. Para los residuos agrícolas provenientes de cosecha se presenta un 75% de biomasa residual del total de la biomasa producida, mientras que el 25% es biomasa residual proveniente de residuos agrícolas industriales².

1.1 BIOMASA

El término biomasa hace referencia a todo material orgánico originado en un proceso biológico, espontáneo o provocado; el cual se emplea como fuente de energía renovable por el contenido energético que posee, siendo este un resultado del proceso de conversión de la energía lumínica en energía química, usada para la transformación de dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno, conocido como fotosíntesis³; y que a su vez esta energía se almacena en forma de materia orgánica para ser aprovechada como materia prima para la producción de una amplia variedad de productos ya sean líquidos (como el biodiesel o bioetanol), gaseosos (gas metano) o sólidos (leña).

² ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto; ORDUZ PRADA, Janneth; ZAPATA LESMES, Henry Josué; CARDONA RUIZ, María Cecilia; DUARTE ORTEGA, Martha. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Ministerio de minas y energía. República de Colombia. ISBN: 978-958-8504-59-9. 2010.

³ PATIÑO MARTÍNEZ, Pedro Elías. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Revista Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. Vol. 2 No.1, pp. 45-52. 2014.

1.1.1 Clasificación de la biomasa. Existen diversas clasificaciones para los tipos de biomasa, pueden realizarse con respecto a su procedencia u origen, en función del contenido de humedad puesto que es un parámetro determinante al momento de elegir el proceso de conversión más adecuado según el producto que desee obtenerse. Sin embargo, debe tenerse presente que los procesos de conversión termoquímica prefieren aquellas biomásas secas o de bajo contenido de humedad; mientras que los procesos de conversión bioquímica eligen biomásas con alto contenido de agua.

1.1.2 Biomasa según su origen.

1.1.2.1 Biomasa natural. Es aquella biomasa presente en bosques, árboles, plantas de cultivo, etc. Biomasa que actualmente es la más explotada con fines energéticos puesto que de allí se desprenden variedad de residuos y subproductos con gran contenido de energía como los cultivos forestales, pastos y cultivos de plantas herbáceas o gramíneas, que generan energía a partir de rutas de transformación térmica y biológica; y en su mayoría de veces son implementados para la producción de biocombustibles, conocidos como combustibles de primera generación.

Sin embargo, a raíz de la explotación masiva puede presentarse daños a la atmósfera como el aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico, que además favorece y fortalece el efecto invernadero que causa el calentamiento global, esto por la deficiencia de la fijación de nitrógeno y dióxido de carbono que estas biomásas aportan al medio ambiente para su sostenibilidad.

1.1.2.2 Biomasa residual y/o industrial. Es el subproducto o residuo que se genera como consecuencia del consumo de biomasa y de las explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, así como los residuos de origen orgánico generados en la industria agroalimentaria y en la industria de la transformación de la madera; así mismo aquellos residuos producidos en los núcleos urbanos⁴.

La biomasa es un recurso que puede aprovecharse de manera completa en todos sus ámbitos, es decir, que su uso abarca numerosas actividades ya sean de tipo doméstico como en chimeneas o estufas de leña, a un mediano nivel en calefacción para granjas, y un mayor grado en centrales térmicas para generar electricidad a una ciudad. Es por ello que su aplicación es versátil frente a otros

⁴ PATIÑO MARTÍNEZ, Pedro Elías. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Revista Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. Vol. 2 No.1, pp. 45-52. 2014.

materiales, por lo que puede generar ganancias para aquellos cultivadores que conviertan sus residuos en productos de mayor valor. Siendo estos los combustibles derivados de biomasa residual, denominados combustibles de segunda generación.

La biomasa puede también clasificarse con respecto a la proporción de agua que contiene las sustancias que conforman la biomasa, siendo un factor determinante para su aprovechamiento al momento de elegir la tecnología de conversión más adecuada para ser sometida.

1.1.2.3 Biomasa seca. Hace referencia a madera, plantas leñosas, residuos forestales, y subproductos de la industria maderera.

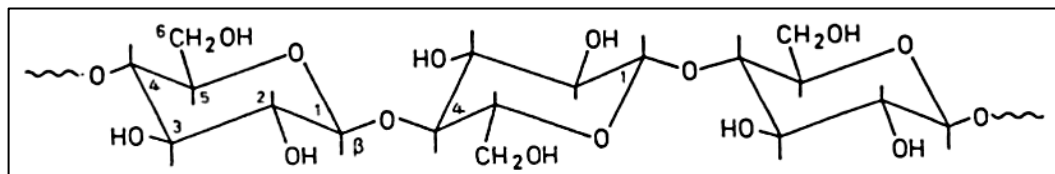
1.1.2.4 Biomasa húmeda. Se caracterizan por su gran contenido de agua aquellos abonos, purinas, lodos y residuos de la fabricación de aceites.

1.2 ESTRUCTURA DE LA BIOMASA

La biomasa abarca un gran cúmulo de materiales de diversos orígenes que tienen características variables, su composición depende en gran medida de la fuente de la cual esta provee; pero en general la biomasa está compuesta principalmente por celulosa (38 - 50%), lignina (15-25%) y hemicelulosa (23-32%) que corresponden a los compuestos estructurales de esta materia orgánica.

1.2.1 Celulosa. Es un polímero de la D-glucosa que se unen entre sí por enlaces β -1,4; disposición que la hace estable, esta posee cadenas lineales que se sitúan de forma antiparalela y ordenada formando microfibrillas las cuales favorecen la formación de enlaces de hidrogeno que otorgan las propiedades de rigidez y estabilidad térmica al material estructural de la pared celular⁵.

Ilustración 1. Estructura química de la celulosa.

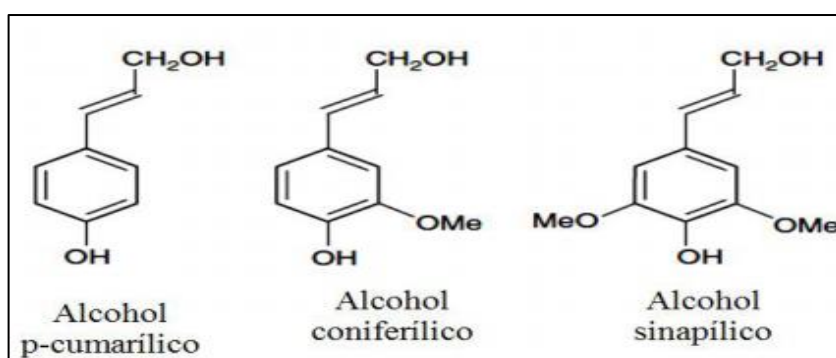


Fuente: Manual de química orgánica. Disponible en: https://books.google.com.co/books?id=Pm71NZzKlaoC&dq=Manual+de+qu%C3%ADmica+org%C3%A1nica&hl=es&source=gbs_navlinks_s.

⁵ ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Ana. PIZARRO GARCÍA, Consuelo. FOLGUERAZ DÍAZ, María Belén. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Gijón, España. Universidad de Oviedo, 2012.

1.2.2 Lignina. La lignina es un polímero aromático de estructura tridimensional, compleja, ramificada y amorfa, asociada directamente con la naturaleza de sus múltiples unidades estructurales, las cuales no suelen repetirse de forma regular, ya que esta varía dependiendo de su origen y el método de extracción o aislamiento utilizado. Este polímero está conformado por tres unidades de fenilpropano: siringil-propano (3,5-di metoxi-4-hidroxifenilpropano), guaiacil-propano (4-hidroxi-3-metoxifenilpropano) y 4-hidroxifenilpropano, resultantes de la polimerización enzimática de los alcoholes sinapílico, coniferílico, y p-cumarílico, respectivamente, que se encuentran unidas generalmente por enlaces carbono-carbono y enlaces tipo éter, en proporciones que varían entre especies vegetales⁶.

Ilustración 2. Unidades fenilpropanomonoméricas.



Fuente: Chávez Sifontes, Marvin. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Revista Avances en ciencias e ingeniería. Vol. 4 No. 4, pp. 15-46. ISSN: 0718-8706. 2013.

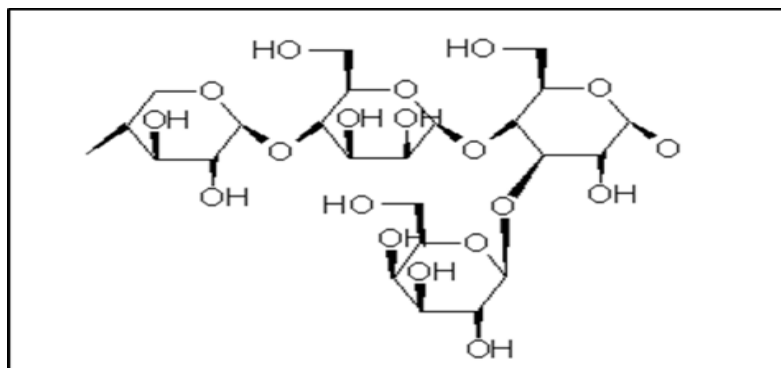
La lignina desempeña un papel importante en el transporte de agua, nutriente y metabolitos en el sistema vascular, atribuidos a las propiedades como estructura macromolecular que se le confiere; así como también juega el rol de defensa de las plantas frente a patógenos impidiendo la penetración de enzimas destructivas en la pared celular.⁷

1.2.3 Hemicelulosa. Es la unión de carbohidratos que forman una estructura polimérica compleja y ramificada que se compone de varias unidades de azúcares como las pentosas, hexosas y sus correspondientes ácidos úronicos que forman una estructura amorfa y constituyen una tercera parte de los carbohidratos en las partes maderosas de las plantas.

⁶ CHÁVEZ SIFONTES, Marvin, DOMINE, Marcelo E. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Revista Avances en ciencias e ingeniería. Vol. 4 No. 4, pp. 15-46. ISSN: 0718-8706. 2013.

⁷ KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

Ilustración 3. Estructura química de la hemicelulosa.



Fuente: Manual de química orgánica. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=Pm7INZzKlaoC&dq=Manual de+qu%C3%ADmica+org%C3%A1nica&hl=es&source=gbs_navlinks_s](https://books.google.com.co/books?id=Pm7INZzKlaoC&dq=Manual+de+qu%C3%ADmica+org%C3%A1nica&hl=es&source=gbs_navlinks_s).

Las proporciones de esta molécula varían dependiendo de la edad y especie de la biomasa.

1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BIOMASA

La biomasa posee propiedades fisicoquímicas que luego de ser aplicado un proceso posterior para su aprovechamiento permite caracterizar su eficiencia mediante los siguientes parámetros como herramientas de medida y control.

1.3.1 Humedad. Es el valor referente al contenido de agua que el material lignocelulósico presenta por kilogramo de material seco, esto expresado como un porcentaje en peso.

La importancia de este parámetro se ve reflejado en los sistemas de combustión de biomasa, ya que un elevado porcentaje de humedad produce una reducción de la eficiencia general del sistema y tiene una serie de consecuencias a niveles técnicos, medioambientales y económicos; es por ello que la humedad óptima para la transformar de biomasa en energía debe ser menor que el 30% de está⁸.

⁸ ISERN HIDALGO, Xavier. La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. Energética. Disponible en: www.energetica21.com. Última actualización 21 de octubre de 2017.

1.3.2 Carbono fijo. Es la fracción residual del carbono que permanece después de haberse desprendido todos los compuestos volátiles, y se calcula por diferencia con el contenido en cenizas, humedad y materias volátiles. Este parámetro indica que entre más alto sea este valor, más material sólido se tendrá para ser quemado; este valor es determinante para calcular la eficiencia en equipos de combustión⁹.

1.3.3 Contenido de cenizas. Es la fracción correspondiente al residuo sólido que persiste tras una combustión total, este valor está relacionado con el contenido energético del material, así como también es un factor importante en los costos de manipulación y proceso. Por esta razón altos contenidos de ceniza pueden influenciar negativamente en el tratamiento si corresponden a valores mayores al 10%.

1.3.4 Materia volátil. Corresponde al conjunto de constituyentes de la biomasa que se desprenden de las partículas cuando se calienta en ausencia de aire; estos materiales son procedentes tanto la materia orgánica e inorgánica de la biomasa, donde la finalidad de este parámetro es determinar la pérdida de peso que este material experimenta a una temperatura en un lapso determinado¹⁰.

1.4 APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA

La biomasa ha sido empleada como una alternativa prometedora para la generación de fuentes energéticas, ya que a partir de este material lignocelulósico procedentes del sector agrícola, forestal, ganadera y núcleos urbanos es posible obtener gran diversidad de productos, ya que el abandono de estos materiales supone un alto impacto ambiental, debido a que el elevado volumen de biomasa sobrante tiene una lenta descomposición permaneciendo largo tiempo en un mismo lugar. Así, mediante procesos específicos se puede obtener una amplia gama de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que son aplicados para cubrir necesidades energéticas en diferentes sectores e industrias.

En el grupo de los biocombustibles sólidos se encuentra el carbón vegetal, que resulta de un tratamiento térmico con bajo contenido en oxígeno; las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustibles son astillas, serrín, pellets y briquetas. También es común encontrar biocombustibles líquidos que son aplicados a una serie de productos de origen biológico y que son empleados como combustibles de sustitución de los derivados de petróleo. Por último, es posible

⁹ GUTIÉRREZ, Fernando. SAN MIGUEL, Guillermo. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 2015.

¹⁰ FERNÁNDEZ, Jesús. Energía de la biomasa. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=98>. Última actualización 14 de agosto de 2017.

obtener biocombustibles gaseosos como gas de gasógeno, biogás e hidrógeno mediante la transformación de biomasa, originando un balance en las emisiones de CO₂ y logrando transformar un residuo en un recurso de alto potencial¹¹.

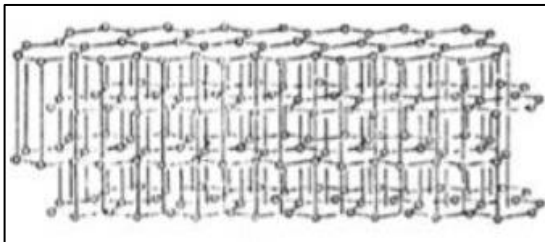
1.5 CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un sólido altamente poroso constituido principalmente por carbono, se origina de cualquier material orgánico proveniente de sectores agropecuarios e industriales tales como madera, carbón mineral, petróleo, residuos forestales, residuos agrícolas, entre otros; los cuales tienen un alto porcentaje de carbono que al ser sometido a un proceso de carbonización y posterior activación, le confieren propiedades particulares al material como una estructura desarrollada con un área superficial excepcionalmente alta que le permite ser un buen adsorbente, por ello el precursor es un factor que influye directamente sobre el producto final.

1.5.1 Propiedades físicas del carbón activado.

1.5.1.1 Estructura física. El carbón activado está compuesto principalmente por estructuras hexagonales similares a las del grafeno pero totalmente desordenadas, ya que se encuentran desplazadas unas con respecto a otras formando un solapamiento entre las capas, lo que genera una estructura altamente desordenada y por ende una mayor superficie interna como se muestra en la ilustración 4 y 5.

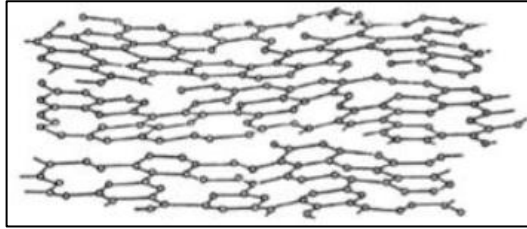
Ilustración 4. Arreglo estructural de las capas de grafito.



Fuente: AGUDELO ÁLVAREZ, Branda Lindsay. Estandarización de proceso de producción de carbón actividad por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2017.

¹¹ Ibid., p 1-20.

Ilustración 5. Estructura de las capas del carbón activado.



Fuente: AGUDELO ÁLVAREZ, Branda Lindsay. Estandarización de proceso de producción de carbón actividad por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2017.

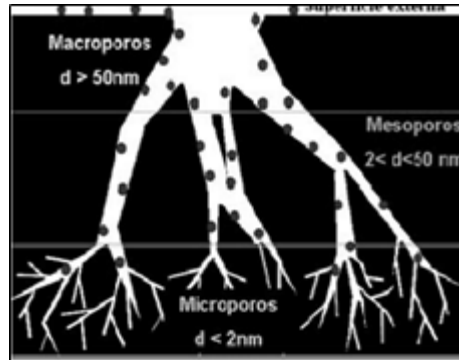
Estas formas irregulares producen canales y espacios con diferentes tamaños de pared a pared que se encuentran interconectados entre sí y son conocidos comúnmente como poros, los cuales le confieren la porosidad al carbón activado, donde los macroporos están poco relacionados con la adsorción, pero podrían afectar la velocidad de difusión de las sustancias en fase gaseosa y acuosa hacia los meso y microporos.¹²

➤ **Porosidad.** La porosidad y distribución de tamaño de poros está relacionada directamente con el área específica que presentan los materiales carbonosos, ya que estas cavidades pequeñas en las partículas del carbón, atrapan agentes moleculares actuando como mallas que poseen una alta especificidad logrando separar especies muy definidas molecularmente¹³, lo que le confiere buenas propiedades adsorptivas a este material.

¹² PADRÓN, Rolando. RODRÍGUEZ, Clara. GÓMEZ, Alaín. El carbón activado, un material adsorbente. Vía Blanca Km. 3, Matanzas, Cuba. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2013.

¹³ NAVARRO P. VARGAS C. Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. Revista de metalurgia, Vol. 46 No. 3, ISSN: 0034-8570. 2010.

Ilustración 6. Estructura interna de un carbón activado.



Fuente: ACEVEDO CORREDOR, Sergio Alberto. Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (*Elaeis Guineensis*) para adsorción de CO₂. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

Según la terminología de la IUPAC:

Cuadro 1. Clasificación de los tamaños de poro según la IUPAC

Tamaño de poro	Adsorción
Microporos <2 nm	Sustancias en fase líquida y gaseosa.
Mesoporos 2 ≤ 50 nm	
Macroporos > 50 nm	Compuestos clorados o sustancias húmicas.

Fuente: Elaboración propia

➤ **Área superficial.** El área superficial es la parte interna en la cual los poros se encuentran desarrollados y con la cual el material interactúa con el medio al cual sea expuesto, mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido mejor adsorbente podrá ser. Los carbones activados presentan elevadas áreas superficiales del orden de 500 a 1500 m²/g de carbón, e incluso llegar a desarrollar áreas mayores hasta los 3000 m²/g¹⁴.

Existen diversas metodologías para determinar experimentalmente el área superficial, como es el caso del índice de yodo, azul de metileno, área específica

¹⁴ AGUDELO ÁLVAREZ, Branda Lindsay. Estandarización de proceso de producción de carbón actividad por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2017.

BET y otros tantos métodos que de manera empírica logran determinar cuán grande es esta extensión de superficie.

1.5.2 Propiedades químicas del carbón activado.

1.5.2.1 Composición. La composición química del carbón activado por lo general es aproximadamente 75-80% en carbono, 5-10% en cenizas, 60% en oxígeno y 0.5% en hidrógeno.¹⁵ La química de superficie de este carbón activado depende además de la presencia de heteroátomos, principalmente oxígeno, que forma grupos funcionales orgánicos, como ácidos carboxílicos, lactonas, fenoles, carbonilos, quinonas, aldehídos, éteres, anhídridos entre otros, que pueden ser tanto ácidos como básicos y, dependiendo del pH de la solución, afectan la capacidad de adsorción de este material. Así mismo el alto contenido de cenizas, humedad y material volátil presentes en el carbón activado son factores influyentes que disminuyen su capacidad efectiva como adsorbente.¹⁶

1.6 OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

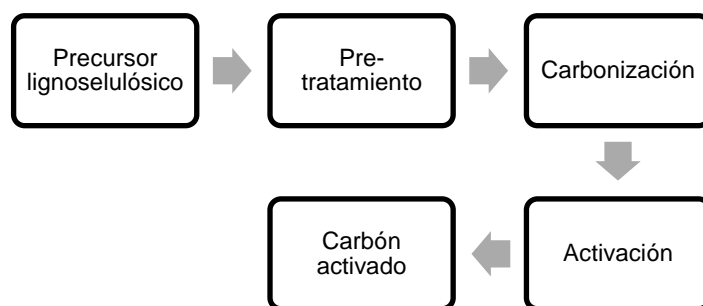
Para obtener carbón activado, inicialmente las hojas de palma de aceite como precursor deben ser sometidas a pre tratamientos que incluye la etapa de secado, esto con el fin de mejorar la transferencia de calor dentro del material y minimizar gastos de energía, posteriormente debe ser llevado a un proceso de molienda, ya que con esta condición se obtienen mayores rendimientos en las fracciones finales de la pirólisis y finalmente el tamizado para homogeneizar su tamaño antes de someterse al proceso térmico.

Luego se somete a carbonización con el objetivo de eliminar el oxígeno, nitrógeno y material volátil mediante la descomposición térmica del material en una atmósfera ausente de oxígeno y cualquier otro reactante; generando un carbón con estructura irregular la cual produce huecos intersticiales libres que pueden verse obstruidos por alquitranes y residuos de la carbonización presentando una baja capacidad de adsorción.

¹⁵ MANUAL DE CARBÓN ACTIVADO. Provincia de Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>. Última actualización 12 de febrero de 2018.

¹⁶ CASTELAR ORTEGA, Grey Cecilia. VILORIA C. Carlos Andrés. MORRINSON B. Carlos Andrés. ANGULO M. Edgardo Ramón. ZAMBRANO A. Alejandra María. Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2. Universidad de Sucre. Revista colombiana de ciencia animal. Vol. 9 No. 2. ISSN: 2027-4297. 2017.

Diagrama 1. Producción de carbón activado



Fuente: Elaboración propia

Finalmente el proceso de activación determina la propiedad adsorbente de este carbón, el cual incrementa su área superficial hasta 3000 m²/g, debido a la formación de poros internos de diferente tamaño, cantidad y distribución a lo largo de la matriz carbonada, los cuales capturan diferentes especies moleculares desde la fase gaseosa hasta la fase líquida.

1.6.1 La palma de aceite. La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar, su origen se ubica en el golfo de guinea en el África occidental de ahí su denominación palma africana de aceite¹⁷. Su vida productiva abarca los 50 años, sin embargo, bajo cultivo solo se le permite alcanzar una altura aproximada de 12 metros a sus 25 años aproximadamente, puesto que dificulta la recolección de racimo de fruta. Según Fedepalma, actualmente Colombia es el cuarto productor de palma de aceite en América y el primero en Latinoamérica, cuenta con más de 483.733 hectáreas sembradas de palma de aceite distribuidas en la zona norte (Magdalena y Cesar); zona centro (Santander y Norte de Santander); zonal occidental (Nariño y Valle del Cauca) y zona oriental (Meta, Casanare, Cundinamarca y Caquetá)¹⁸. La función principal de la palma radica en la extracción del aceite de palma y el aceite de palmiste como productos principales implementados en la elaboración de grasas, aceites vegetales, margarinas, y mantecas de uso industrial, alimentario y en la fabricación de productos oleoquímicos¹⁹.

¹⁷ SERRANO BALLESTEROS, Javier Darío. Evaluación de la responsabilidad social empresarial en la agroindustria, caso de la palma africana de aceite. María la baja, Bolívar. Cartagena de Indias D.T.C; Colombia. 2011.

¹⁸ FEDEPALMA. La Palma de Aceite en Colombia. Disponible en: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>. Última actualización 16 de mayo de 2018.

¹⁹ GARCÉS, Isabel Cristina. CUÉLLAR SÁNCHEZ, Mónica. Productos derivados de la industria de la palma de aceite. Usos. Revista Palmas, Vol. 18 No. 1, ISSN: 0121-2923. 1997.

1.6.1.1 Proceso de extracción de aceite de palma. El proceso de extracción del aceite crudo de palma y aceite de palmiste se lleva a cabo en la planta extractora e inicia con la esterilización de los racimos de fruta, el cual consiste en someterlos a la acción de vapor de agua en autoclaves en un periodo de tiempo de 65 a 90 minutos, con el fin de inactivar la enzima lipasa que causa el incremento del porcentaje de ácidos grasos libres y acelera el proceso de ablandamiento de la unión de los frutos al racimo²⁰. Previamente se procede a realizar el desfrutado, donde se separa el fruto del racimo a través de un tambor rotatorio, los frutos son conducidos por un elevador al digestor y el racimo vacío residual es conducido por bandas transportadoras a remolques para ser llevados al campo donde se distribuyen en las plantaciones de palma e inicia su descomposición, luego estos son absorbidos como nutrientes por la planta y como mejorador de suelo.

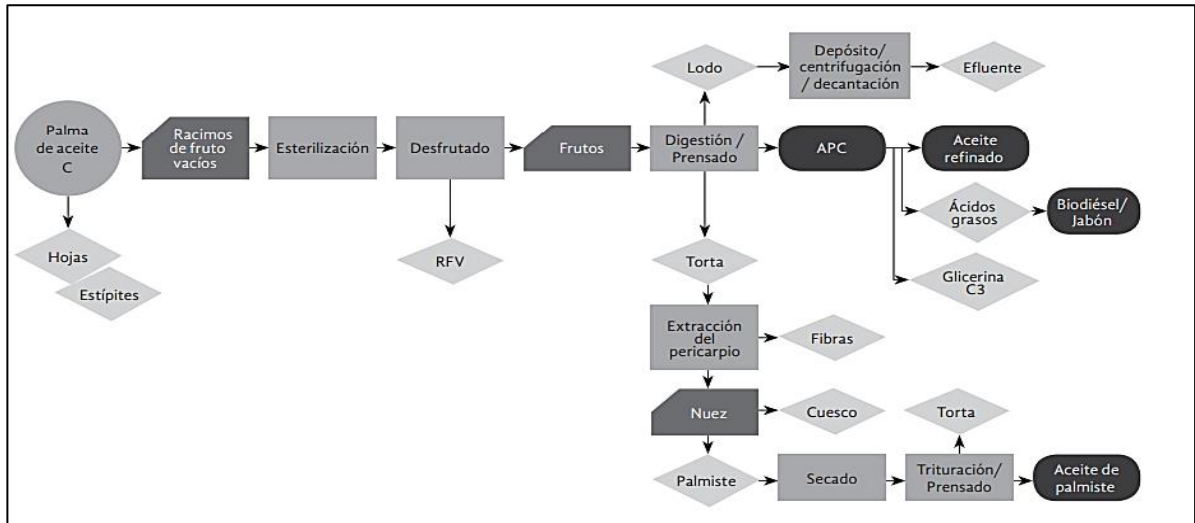
Por consiguiente, el cilindro digestor contiene paletas o hélices con las que macera el fruto por medio de agitación circular, hasta formar una masa homogénea y blanda de la cual se obtiene como producto el aceite crudo de palma por medio del prensado con un tornillo sinfín, este es clarificado para retirar sus impurezas. En la etapa de prensado se produce la torta compuesta esencialmente de 6% de nueces enteras (4% de almendras y 2% de cáscaras rotas) y 9% de fibras, pero también un efluente compuesto por una mezcla de aceite, agua y lodos que representa el 60 % sobre fruta²¹. Las fibras se separan de las nueces en una columna de desfibración neumática que trabaja con aire para ser usadas como combustible en las calderas del proceso; la nuez es clasificada por tamaño y enviada a los quebradores para separar la almendra de la cáscara por medio de un ciclón, generando un nuevo subproducto del proceso que de igual manera es usado como combustible. La almendra producida se seca y se prensa extrayendo el 40% de aceite sobre la almendra (aceite de palmiste)²².

²⁰ INDUAGRO S.A. Proceso productivo de aceites de palma. Disponible en: <http://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html#sthash.bjSipfbl.d>. Última actualización 23 de marzo de 2018.

²¹ ALFARO, Marcos. ORTIZ, Elvin. Procesos de producción del aceite de palma 2006. Descripción del proceso de producción de aceite de palma africana. Ministerio de agricultura, Gerencia de Palma. Consejo Nacional de producción, servicio de información de mercados. Disponible en: www.mercanet.cnp.go.cr. 2006.

²² Ibid.,p.1-3.

Diagrama 1. Proceso simplificado de la extracción de aceite de palma.



Fuente: VAN DAM, Jan. Oil palm by-products as biomass commodities. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, Tomo II, pp. 149-156, ISSN: 0121-2923. 2016.

1.6.1.2 Subproductos del proceso de extracción. Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de extracción de aceite se genera biomasa lignocelulósica residual, la cual se define como aquellos subproductos que se obtienen por la transformación natural o industrial de materia orgánica, como lo es aquellos residuos provenientes de las cosechas, efluentes ganaderos, podas y demás procesos²³. Esta materia residual es adquirida en las etapas de desfrutamiento y prensado; a raíz de la separación de los frutos de su soporte, este queda como subproducto y es conocido como racimo de fruta vacía, posteriormente el proceso de prensado de la semilla genera fibras como segundo subproducto y cáscara de la almendra como tercero. Por lo general los residuos anteriormente nombrados no tienen una función en específico y son vistos como materiales que promueven la acumulación de desechos y contaminación, por tal razón, la función más común de estos materiales es como combustible para calderas, fertilizantes para el suelo, fuentes de energía para diversos equipos o se disponen en el suelo del cultivo esperando su descomposición²⁴.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que a razón de la actividad de recolección de los racimos de la palma de aceite, las hojas de palma pueden caer por acción de la fuerza que se realiza para conseguir el fruto con una vara; siendo estas

²³ ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto; ORDUZ PRADA, Janneth; ZAPATA LESMES, Henry Josué; CARDONA RUIZ, María Cecilia; DUARTE ORTEGA, Martha. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Ministerio de minas y energía. República de Colombia. ISBN: 978-958-8504-59-9. 2010.

²⁴ GARCÍA PÉREZ, Manuel. Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. Revista Palmas, Vol. 34 No. Especial, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2013.

también consideradas como un subproducto de la planta, sin embargo, las hojas no son recolectadas ya que no tienen ningún uso en la operación rentable del cultivo, por lo que son desechadas en el cultivo para proporcionarle sus nutrientes al suelo mientras se van degradando²⁵. Algunas hojas quedan disponibles durante las actividades de poda y reforestación, que consiste en cortar aquellas hojas secas, enfermas o que funcionalmente no son útiles a la planta; con la finalidad de contribuir al crecimiento adecuado del racimo y la penetración de la luz solar a este; por lo que la disposición de hojas es considerable.

Se estima que el tronco de la palma puede sostener entre 40 y 56 hojas aun cuando son podadas o cortadas durante la cosecha y actividades de mantenimiento, teniendo en cuenta que se producen entre 20 a 30 hojas por año y que usualmente se obtiene una proporción de 3 hojas por cada racimo producido²⁶. Tanto racimo de fruta vacía, fibras del mesocarpio y cascara de almendra han sido sometidos a tratamientos termoquímicos, ya sea pirólisis, gasificación, combustión, y otros con el fin de obtener biocombustibles, energía eléctrica, biocarbón, briquetas o pellets; mientras que las hojas de palma son un campo poco estudiado debido a que su relevancia al igual que los demás subproductos radica en la cantidad disponible de estas para ser tratadas; puesto que por cada tonelada de racimo de fruta procesada en la planta de beneficio se generan residuos sólidos de alrededor de 5,5 % de la cáscara de palma, 13,5 % de las fibras del mesocarpio y, 22 % del racimo de fruta.

1.6.1.3 Propiedades físicas y químicas de los subproductos de palma de aceite. La biomasa residual está compuesta principalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina que expresadas en porcentaje en peso representan un 15-30%, 40-60% y 10-30% respectivamente y este varía en función del subproducto de palma a tratar. Estos componentes se entrelazan para formar la pared celular de las células que componen la biomasa por lo que su estructura y composición depende de ellas, así como su rendimiento y descomposición térmica.²⁷

²⁵ ANCHIQUE CRUZ, Johann Ricardo. Estudio de factibilidad técnica y financiera, de la implementación de una planta gasificadora de generación eléctrica, a base de biomasa residual, en la empresa Palma de Aceite del Meta (PAM). Bogotá, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. 2014.

²⁶ QUESADA HERRERA, German. Tecnología de palma aceitera, cultivo e industria de la palma, palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Disponible en:

²⁷ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

Tabla 1. Composición química de los subproductos de la palma de aceite.

Composición Química	Hoja de palma aceite (OPF)	Racimos de fruta vacíos (EFB)	Estípites de la palma de aceite (OPT)	Cuesco de palma
Lignina	20,50 ± 2,20	19,67 ± 6,80	20,51 ± 4,01	50,7
Homocelulosa	80,3 ± 3,18	78,00 ± 8,70	75,00 ± 5,02	43,5
α-Celulosa	40,10 ± 9,70	46,17 ± 11,17	42,32 ± 5,18	0 20,8
Hemicelulosa	37,05 ± 3,35	32,30 ± 7,82	32,35 ± 1,65	22,7

Fuente: KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

Por otro lado los subproductos de palma de aceite pueden ser empleados como materia prima en la producción de fertilizantes, así como también una fuente prometedora en la producción de energía, debido a que esta biomasa cuenta con nutrientes que le confieren propiedades para nuevos usos y posibles combustibles bioenergéticos; es por ello que todos los residuos provenientes del proceso de extracción deben contener altos porcentajes en el poder calorífico y material volátil si se desea proyectar como fuente energética, y así mismo debe presentar bajos contenidos de humedad y ceniza.

A continuación, se presentan las propiedades físicas y químicas de los subproductos de la palma de aceite:

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los subproductos de la palma de aceite.

Muestra de biomasa de palma de aceite	Poder calorífico (Mj/kg)	Contenido de humedad (%)	Contenido de ceniza (%)	Contenido de materias volátiles (%)
Racimos de fruta vacíos	18,88	66 - 69	4,60	87,0
Hojas de palma de aceite	15,72	62-77	3,37	85,1
Fibra del mesocarpio	19,06	35 - 48	6,10	84,9
Cuesco	20,09	11 - 13	3,00	83,4
Palmiste	17,47	67 - 81	3,35	86,7
Efluente de las plantas de beneficio	16,99	90 - 95	15,20	77,0

Fuente: KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016

1.6.1.4 Aplicaciones energéticas de los subproductos

Racimos de fruto vacío. Es una biomasa voluminosa y fibrosa con alto contenido de humedad, que debe ser sometida a un tratamiento térmico previo para obtener materiales de valor agregado. Aproximadamente en Colombia se genera 400.000 ton anuales²⁸.

Imagen 1. Racimo de fruta vacío (RFV).



Fuente: VAN DAM, Jan. Oil palm by-products as biomass commodities. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, Tomo II, pp. 149-156, ISSN: 0121-2923. 2016.

Las tecnologías que se han investigado abarcan las áreas de biorefinamiento y conversión termoquímica, estas son:

- Desmenuzado orgánico para suplementos de carbono para suelos y retorno de nutrientes.
- Producción de aceite a partir de pirólisis rápida que se puede emplear como alternativa al aceite crudo.
- Conversión en pellets prensados con alto poder calorífico para co-combustión.

Fibra de mesocarpio. Aproximadamente 400.000 de toneladas al año en Colombia se produce de fibras de mesocarpio provenientes de la palma de aceite que son empleadas por lo general como combustible para calderas²⁹.

²⁸ VAN DAM J. Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa*. En: Palmas. vol. II, no. 37, p. 149-156

²⁹ VAN DAM, Jan. Oil palm by-products as biomass commodities. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, Tomo II, pp. 149-156, ISSN: 0121-2923. 2016.

Imagen 2. Fibras de mesocarpio.



Fuente: ORTIZ VEGA, Rubén Alberto. FERNÁNDEZ HERRERA, Olman. Cultivo de la palma aceitera. San José, Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia. 1994.

Tras un proceso termoquímico previo es posible obtener:

- Pellets prensados con alto poder calorífico para la co-combustion.
- Implementación en biorrefinación en bioetanol de segunda generación.
- Producción de biocrudo por conversión hidrotérmica.
- Despulpado para la producción de pulpa de papel de celulosa.

Cuesco de palma. Es un material lignocelulósico duro y compacto que rodea las almendras de los frutos del aceite, actualmente en Colombia hay aproximadamente 300.000 toneladas anuales de este material³⁰.

Imagen 3. Cuesco de palma de aceite.



Fuente: ORTIZ VEGA, Rubén Alberto. FERNÁNDEZ HERRERA, Olman. Cultivo de la palma aceitera. San José, Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia. 1994.

³⁰ Ibid., p. 151-153

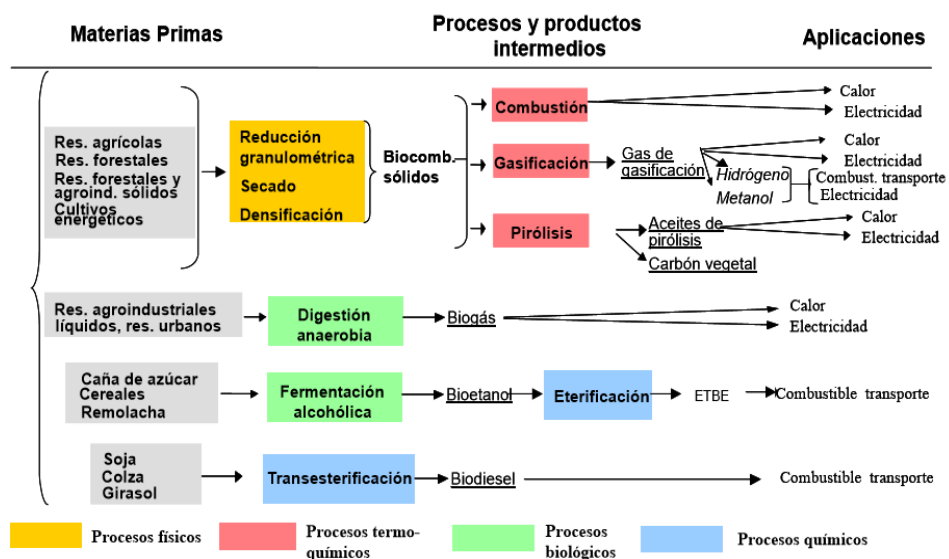
Existen variedad de alternativas económicas en las cuales el cuesco de palma es empleado, algunas de estas son:

- Carbón activado/ carbón orgánico.
- Agregado liviano para cementos.
- Desmenuzado orgánico para suplementos de carbono para suelos.
- Implementación de la pirólisis rápida para la producción de aceite de alta densidad energética que puede ser empleado como aceite crudo.

1.6.2 Tecnologías de conversión de biomasa.

La biomasa debe ser sometida a procesos de conversión para generar productos de mayor valor comercial, para ello, se encuentran diversidad de tecnologías basadas en condiciones variables que permitirán la obtención de productos sólidos, líquidos o gaseosos con mayor aporte energético.

Diagrama 2. Tecnologías de conversión de biomasa.



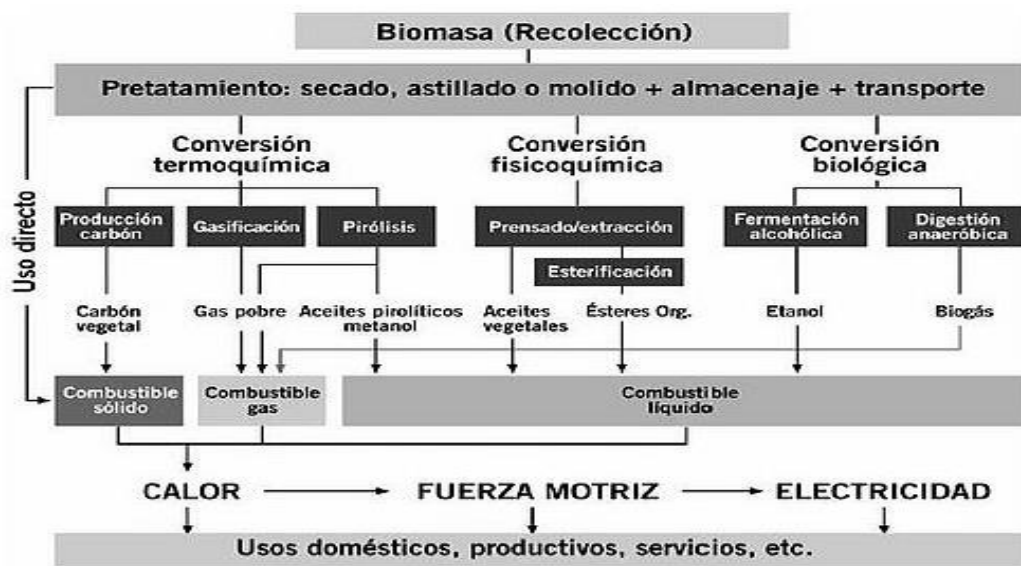
Fuente: CARRASCO GARCÍA, Juan E. Combustión directa de la biomasa. Escuela de negocios, Escuela de Organización Industrial (EOI). Madrid, España. 2007.

Como se muestra en el diagrama 2, existen cuatro tipos de tratamiento físico, químico, termoquímico y biológico para la transformación de biomasa; sin embargo, actualmente los procesos que han tenido mayor aplicabilidad son los procesos termoquímicos, puesto que permite la versatilidad de productos en diferentes fases y características propias, a ciertas condiciones de operación con un mayor rendimiento en el producto deseado.

1.6.2.1 Tipos de conversión termoquímica. Las tecnologías de transformación a las que se somete la materia orgánica, implican reacciones químicas e irreversibles, a elevadas temperaturas y en condiciones variables de oxidación³¹. La finalidad de estos procesos es la de convertir la energía acumulada en forma de carbón e hidrógeno en combustibles o directamente en electricidad.

Esta técnica permite obtener productos de diferentes características y en diferentes estados de la materia por medio del tratamiento térmico de una materia inicial. Se identifican cuatro tipos de tratamiento termoquímico que son dependientes de los parámetros de operación.

Diagrama 3. Tratamientos de conversión termoquímica.



Fuente: Base de datos CONSTRUMÁTICA. Introducción al aprovechamiento energético de la biomasa. Disponible en: http://www.construmatica.com/construpedia/Introducci%C3%B3n._Aprovechamiento_Energ%C3%A9tico_de_la_Biomasa. Última actualización 6 de octubre de 2017.

³¹ MÍGUEZ TABARÉZ, José Luis. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis). Disponible en: <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMICOS+PARA+OB+TENCION+DE+BIOMASA.pdf>. Última actualización 28 de octubre de 2017.

- **Combustión directa.** Es la transformación de biomasa en presencia de oxígeno a elevadas temperaturas (800-1000°C), esta reacción exotérmica produce agua, cenizas, gas carbónico y calor usado para la generación de energía a nivel industrial. La conversión de la materia prima es posible cuando se posee una humedad menor al 50%; no obstante, es un proceso de poco interés puesto que no puede generar biocombustibles que puedan proveer ganancias lucrativas al proceso.

- **Gasificación.** Es un proceso de combustión incompleta de la biomasa, es decir una oxidación parcial de esta en presencia de aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas (800-900 °C) pero inferiores a las temperaturas de combustión directa. Como producto se obtiene un gas combustible compuesto por hidrógeno, metano, y monóxido de carbono. El poder calorífico del gas producido es de aproximadamente 4 MJ/Nm³ y puede ser quemado directamente o utilizado como combustible para motores de gas y turbinas³².

- **Pirólisis.** La pirólisis es la conversión termoquímica de la biomasa a una temperatura aproximada de 500°C en condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno). Produce tres productos: líquido (bioaceites), gas (biogás) y residuo carbonoso (biocarbón), los cuales pueden obtenerse a partir de reacciones químicas complejas a altas temperaturas y de procesos de transferencia de materia y calor que tiene como finalidad la obtención en mayor rendimiento de las fracciones pirolíticas de interés.

1.6.3 Clases de pirolisis.

La pirolisis depende de variables operativas como la temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia, así como de las características de la biomasa; composición química, humedad, cenizas, tamaño de partícula, etc., y finalmente del diseño del reactor. Estos parámetros se ajustan con respecto al producto de interés, puesto que influyen en el rendimiento y en las propiedades combustibles de cada una de las fracciones finales, por ello cada alternativa pirolítica establece los siguientes valores para su operación:

³² Base de datos ENERGIZA. Procesos de conversión de biomasa en energía. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>. Última actualización 6 de octubre de 2018.

Cuadro 2. Tipos de pirólisis en función de sus variables operativas.

Pirólisis	Tiempo Residencia	Velocidad de calentamiento	Presión (BAR)	TEMP (°C Max)	Producto mayoritario
Lenta	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	10-30 seg	Baja	1	600	Gas, líquido y sólido
Rápida	1 seg	Muy alta	1	650	Líquido
Torrefacción lenta	30 min	Baja	1	290	Sólido y gas

Fuente: UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Biblioteca de ingeniería. Capítulo II, fundamentos teóricos de gasificación de biomasa. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20250/fichero/Capitulos%252F04++CAPITULO+II++Fundamentos+te%C3%B3ricos.pdf>. Última actualización 4 de agosto de 2017. Modificado.

A partir del proceso de pirólisis se generan los tres productos principales antes nombrados sin importar las condiciones a las cuales se opere el proceso; pero su influencia se evidencia en el producto mayoritario que se obtiene con las condiciones dadas por cada variable

1.6.4 Rendimiento de las fracciones de pirólisis. Las moléculas de hemicelulosa, celulosa y lignina que componen la biomasa; contribuyen de manera directa al rendimiento y composición de las fracciones finales del proceso de pirólisis, debido a que a elevadas temperaturas ocurre la descomposición térmica de cada uno de estas moléculas, siendo la celulosa aquella que se degrada de manera rápida afectando el rendimiento del biocarbón; por lo que un mayor contenido de lignina hará el efecto contrario ya que es una molécula más estable térmicamente³³.

El rendimiento de las fracciones de pirólisis depende esencialmente de las variables operativas en el proceso, donde la más influyente es la temperatura de reacción, que también puede modificar las propiedades fisicoquímicas de los productos finales de la pirólisis. Según el producto que desee obtenerse del proceso, es indispensable elegir el método adecuado de pirólisis a llevar cabo y así mismo tener en cuenta los rangos de operación en los que puede moverse cada variable como se ve en la siguiente tabla:

³³ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

Cuadro 3. Rendimiento en las fracciones finales de la pirólisis.

Tipo de pirolisis	Líquido	Carbón	Gas
Lenta	30%	35%	35%
Convencional	50%	25%	25%
Rápida	75 %	12%	13%
Torrefacción lenta	-----	82%	18%

Fuente: KLUG, Michael. Pirolisis, un proceso para derretir la biomasa. Pontificia Universidad Católica del Perú. Revista de química PUCP. Vol. 26 No. 1. ISSN: 1012-3946. 2012.Modificado

Para maximizar el rendimiento de los productos finales, es necesario tener presente la composición de la biomasa, los parámetros de operación, el tipo de reactor y finalmente la humedad presente en el material de partida. Esto debido a que una mayor presencia de agua en la biomasa requiere de un aumento de temperatura disminuyendo la transferencia de calor en el proceso, lo que lo hace menos eficiente aumentando el consumo energético que este requiere para su operación. Por ello es necesario que la humedad en la biomasa a pirolizar sea menor a un 10%.

El rendimiento en peso del biocarbón depende esencialmente de la temperatura final, puesto que disminuye con el aumento de esta y un aumento en la velocidad de calentamiento, favoreciendo la generación de la fracción gaseosa. Finalmente, puede observarse que la producción de líquidos se mejora a temperaturas entre 450 y 550°C³⁴.

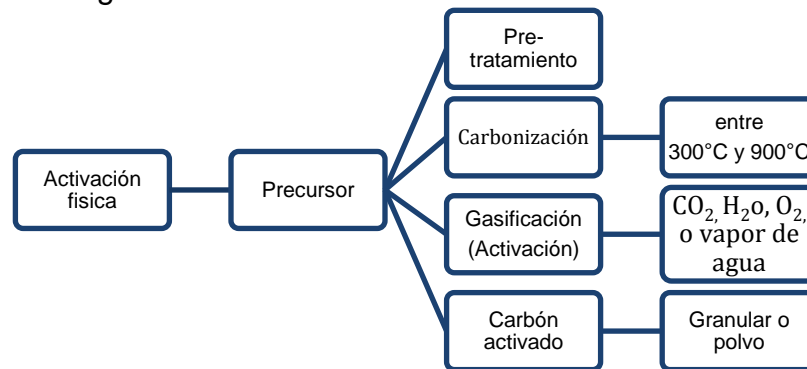
1.7 METODOS DE ACTIVACIÓN

Estos tienen como finalidad mejorar la capacidad de adsorción del producto carbonizado de la pirólisis, evitando la obstrucción de los poros mediante la eliminación de los alquitranes producidos en el proceso termoquímico; contribuyendo al aumento de la superficie interna del material, así como el aumento del volumen de poro y micro poros de los carbones.

³⁴ Ibid., p 12-15

1.7.1 Activación física. Es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas, por lo que puede realizarse en diferentes tipos de reactor por lo general en hornos verticales y hornos rotatorios que son los más utilizados a nivel industrial para la fabricación de carbón activado por medio de gases de reacción³⁵. Inicialmente se parte con una carbonización del material en una atmosfera inerte donde es producido un carbón de poros muy pequeños el cual se considera como un material no adsorbente, por ello es llevado el material a un proceso de gasificación con el fin de alargar la estructura porosa y generar una superficie interna accesible mediante una atmosfera oxidante.³⁶

Diagrama 2. Activación física de la matriz carbonada



Fuente: Elaboración propia

Durante la etapa de activación, se genera una reacción entre el gas y los átomos de carbono más reactivos eliminándolos como monóxido de carbono, provocando un ensanchamiento de la porosidad, por lo que hace accesible las sustancias en fase líquida y gaseosa.³⁷

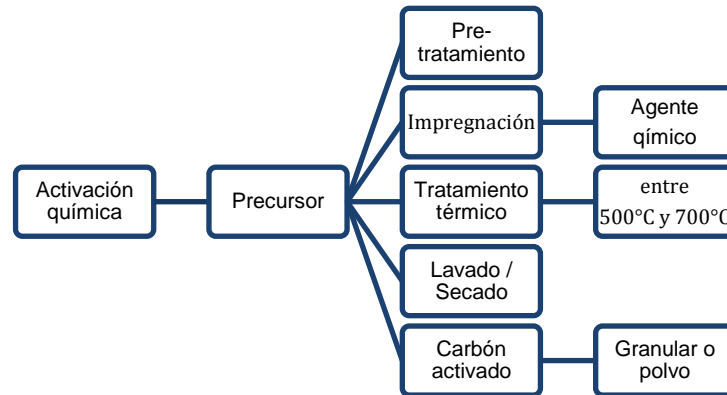
1.7.2 Activación química. La obtención de carbón activado se da en una sola etapa por activación química, la metodología consiste en adicionar un agente activante al precursor antes de llevar a cabo la carbonización; con el propósito de reducir el material volátil y la formación de alquitranes que taponan los poros, de esta manera es posible obtener mayores rendimientos en el carbono producido.

³⁵ GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCÓN, Sonia L. WIEST, Wolfgang. Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. Revista Palmas, Vol. 25 No. Especial, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2004.

³⁶ PADRÓN, Rolando. RODRÍGUEZ, Clara. GÓMEZ, Alaín. El carbón activado, un material adsorbente. Vía Blanca Km. 3, Matanzas, Cuba. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2013.

³⁷ MARTINEZ DE YUSO ARIZA, Alicia. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. Villanueva de Gállego. Universidad San Jorge. Instituto de investigación del medio ambiente y la sostenibilidad. 2012.

Diagrama 3. Activación química de la matriz carbonada



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se mezcla el precursor con el agente activante durante varias horas por medio de agitación mecánica, los agentes más empleados son reactivos químicos como ácido fosfórico, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y cloruro de zinc principalmente³⁸; cada uno de ellos actúa sobre el carbón proporcionándoles alta microporosidad a partir de un reordenamiento estructural.

El material impregnado con el agente activante a temperatura ambiente, se lleva al horno a un tiempo determinado; en la mayoría de casos se realiza en una atmósfera inerte haciendo pasar una corriente de nitrógeno a través de la mezcla, pero puede utilizarse una atmósfera oxidante, donde el material resultante se lava con agua destilada para eliminar los restos de agente activante mediante soxhlet o filtración al vacío. Los parámetros que influyen en el proceso de carbonización-activación son la relación en peso entre el agente activante y el precursor, la temperatura de activación, el tiempo de activación y la atmósfera de activación.

Los agentes activantes poseen características propias que le confieren a los carbones propiedades específicas en su estructura, los más empleados son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), hidróxido de potasio (KOH), y el ácido fosfórico (H_3PO_4), cada uno de ellos actúa como un agente deshidratante, sin embargo el cloruro de zinc y el ácido fosfórico generan grupos funcionales ácidos, lo que se traduce a la aparición de sitios ácidos en la superficie del carbón, además cabe resaltar que el ácido fosfórico crea un tamaño de poro heterogéneo mientras que el hidróxido de potasio favorece el tamaño de microporos y el cloruro de zinc produce una microporosidad uniforme.³⁹

³⁸ ACEVEDO CORREDOR, Sergio Alberto. Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (*Elaeis Guineensis*) para adsorción de CO_2 . Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

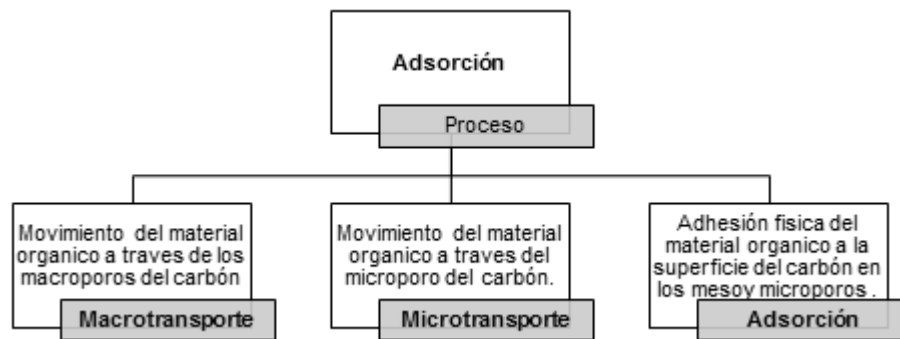
³⁹ SILVA MUÑOZ, Juan Diego. Producción y caracterización de carbón activado a partir de residuos residuales (fibra de nopal) para la remoción de arsénico en agua. México. Instituto Politécnico Nacional, unidad profesional interdisciplinaria de ingeniería. 2017.

La activación química ha sido el método más empleado cuando el precursor con el que se trabaja es un material lignocelulósico, esto debido a las altas áreas superficiales que se obtienen generalmente.⁴⁰

1.8 PROCESO DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

El proceso de adsorción hace referencia a la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución a través de la matriz carbonada, donde dicha interfaz puede constituirse entre un líquido y un gas, un líquido y un sólido, un gas y un sólido, o entre dos líquidos.⁴¹ La capacidad teórica de adsorción de un determinado material puede ser calculada cuando se presenta el equilibrio entre las tasas de sorción y desorción, que hacen referencia al límite de adsorción del carbón activado; esta propiedad puede calcularse a partir de isothermas de adsorción.

Diagrama 4. Proceso de adsorción.



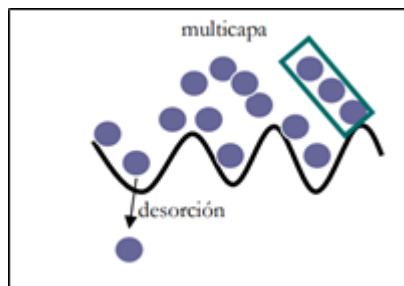
Fuente: Elaboración propia

1.8.1 Adsorción física. También conocida como fisisorción, en esta se presentan interacciones débiles adsorbato-adsorbente de tipo Van der Waals, esta adsorción es de tipo reversible, donde ocurre la formación de monocapas y multicapas.

⁴⁰ Ibid., MARTINEZ DE YUSO ARIZA, Alicia.

⁴¹ MANUAL DE CARBÓN ACTIVADO. Provincia de Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>. Última actualización 12 de febrero de 2018.

Ilustración 7. Adsorción física.



Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Unidad 3. Fenómenos de superficie. Adsorción. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf. Última actualización 27 de septiembre de 2017.

1.8.2 Adsorción química. La obtención de carbón activado se da en una sola etapa por activación química, la metodología consiste en adicionar un agente activante al precursor antes de llevar a cabo la carbonización; con el propósito de reducir el material volátil y la formación de alquitranes que taponan los poros, de esta manera es posible obtener mayores rendimientos en el carbono producido.

Inicialmente se mezcla el precursor con el agente activante durante varias horas por medio de agitación mecánica, los agentes más empleados son reactivos químicos como ácido fosfórico, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y cloruro de zinc principalmente⁴²; cada uno de ellos actúa sobre el carbón proporcionándoles alta microporosidad a partir de un reordenamiento estructural.

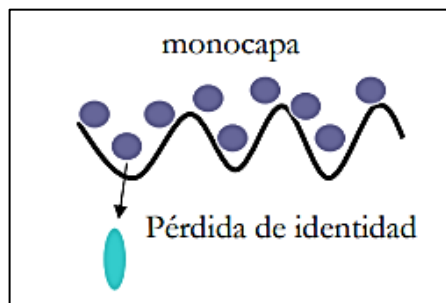
El material impregnado con el agente activante a temperatura ambiente, se lleva al horno a temperaturas entre 500 y 700°C durante un tiempo determinado; en la mayoría de casos se realiza en una atmósfera inerte haciendo pasar una corriente de nitrógeno a través de la mezcla, pero puede utilizarse una atmósfera oxidante. El material resultante se lava con agua destilada para eliminar los restos de agente activante mediante soxhlet o filtración al vacío.

Los parámetros que influyen el proceso de carbonización-activación son la relación en peso entre el agente activante y el precursor, la temperatura de activación, el tiempo de activación y la atmósfera de activación. La activación química ha sido el método más puesto en práctica cuando el precursor con el que

⁴² ACEVEDO CORREDOR, Sergio Alberto. Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (*Elaeis Guineensis*) para adsorción de CO₂. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

se trabaja es un material lignocelulósico, esto debido a las altas áreas superficiales que se obtienen generalmente.⁴³

Ilustración 8. Adsorción química.



Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Unidad 3. Fenómenos de superficie. Adsorción. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivo/Unidad3Adsorcion_19664.pdf. Última actualización 27 de septiembre de 2017.

1.9 TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO Y SU APLICACIÓN

De acuerdo al tamaño de las partículas del carbón activado, este se clasifica en dos tipos⁴⁴:

- Carbón activado en polvo: carbones activados que presentan un diámetro de partícula menor o igual a 0,25 mm.
- Carbón activado granular: carbones activados con un tamaño de partícula superior a 0,25 mm, por lo general entre 1 y 5 mm.

El carbón activado en polvo y granular tiene diversas aplicaciones en la industria, por ejemplo, en el tratamiento de aguas potables y residuales, en la remoción de impurezas y contaminantes orgánicos, así mismo en la industria alimenticia en la remoción de grasas, sabores indeseables, aldehídos y fenoles; en la industria química en la recuperación de solventes orgánicos y como soporte catalítico, en la industria de las pinturas en la decoloración de soluciones, etc.⁴⁵

⁴³ Ibid., MARTINEZ DE YUSO ARIZA, Alicia.

⁴⁴ BURGOS CAPUZANO, Gabriela Elizabeth; JARAMILLO QUIROZ, Jomayra Lorena. Aprovechamiento de los residuos de cacao y coco para la obtención de carbón activado. Cantón Milagro, provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil, 2015.

⁴⁵ Ibid., p 17

2. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE PIROLISIS A IMPLEMENTAR CON HOJAS DE PALMA DE ACEITE

2.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Se plantearon tres alternativas con respecto a los diferentes tipos de pirólisis en los cuales es posible obtener el producto sólido de interés (biocarbón), por consiguiente, se establecieron criterios que son influyentes en el proceso pirolítico, donde cada uno de estos según su valor, da lugar a la selección de la alternativa. Para ello se realiza una matriz de selección que contiene las tres alternativas con respecto al tipo de pirólisis a llevar a cabo, criterios cualitativos y cuantitativos, los cuales son selectividad en productos, respaldo bibliográfico, rendimiento del sólido, humedad de la biomasa y tamaño de partícula de la biomasa; estos propuestos según los valores registrados en la bibliografía consultada. Esta matriz de selección será evaluada mediante el complemento de Excel (Crystal Ball), el cual se fundamenta a través del método de Monte Carlo.

2.1.2 Descripción de las alternativas pirolíticas.

- **Alternativa 1 - Pirolisis Lenta.** Este método permite maximizar la producción de carbón vegetal con un rendimiento del 35% de material sólido, el cual puede verse afectado por variables como temperatura final, presión absoluta, tiempos de residencia de la fase vapor y contenido de humedad⁴⁶. La biomasa inicial es sometida a bajas velocidades de calentamiento menores a 1°C/s y tiempos de residencia prolongados con el fin de favorecer la difusión térmica dentro de las partículas, puede variar de horas a días según el tipo y tamaño de biomasa a pirolizar. Así mismo debe tenerse en cuenta el efecto de la temperatura ya que determina la fracción líquida, gaseosa o sólida dependiendo de los intervalos a la cual sea sometida la biomasa, puesto que esta favorece la descomposición y transformación en productos condensables y volátiles cuando esta es mayor a 600°C, y esta contribuye a la formación de carbón a temperaturas entre 400 y 600°C⁴⁷.
- **Alternativa 2 - Pirólisis Convencional.** Este proceso es más eficiente que la pirólisis lenta puesto que necesita de temperaturas moderadas entre 600 - 800 °C y menores tiempos de residencia que definen el tiempo promedio

⁴⁶ MANYÁ CERVELLÓ, Joan Josep. Efecto de las condiciones de operación de la pirolisis lenta (temperatura final y presión) en la estabilidad potencial del biochar obtenido a partir de alpurrejo. Zaragoza, España. Universidad de Zaragoza. 2013.

⁴⁷ AGRO WASTE. Pirolisis. Base de datos studylib. Disponible en: <http://studylib.es/doc/4696675/pir%C3%B3lisis---agrowaste>. Última actualización 15 de septiembre de 2017.

que una molécula permanece en el reactor, su efecto favorece la obtención de productos líquidos cuando este es menor a 2 segundos⁴⁸ y favorece la obtención de productos sólidos y gaseosos al aumentar el tiempo de residencia entre 5 a 30 minutos para convertir la biomasa en aceites, bio carbón y gas de síntesis, sin embargo, se obtiene un rendimiento del 25% en el producto sólido de interés bajo estas condiciones y a una velocidad de calentamiento mayor a 10°C/s.⁴⁹

- **Alternativa 3 - Pirólisis Rápida.** Este proceso se caracteriza por una alta velocidad de transferencia de calor a la biomasa alimentada y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción⁵⁰, es un proceso de importancia puesto que permite la producción de bioaceites y biocarbón donde su finalidad es obtener el mayor rendimiento de bio oil, sin embargo, se puede llegar a obtener una pequeña proporción de sólido del 12%. Este método opera a temperaturas altas comprendidas entre 800 - 1000 °C.⁵¹ Velocidades de calentamiento altas correspondiente al tiempo necesario para que las partículas se calientan desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de transformación requerida.⁵²

2.1.3 Descripción de criterios.

2.1.3.1 Criterios cualitativos

- **Selectividad en productos.** La tecnología de pirólisis permite transformar la biomasa lignocelulósica en tres productos: un sólido carbonizado (biocarbón), bioaceites (mezcla de compuestos orgánicos volátiles) y mezcla de gases combustibles, cada fracción depende de las condiciones del proceso, características de la biomasa y diseño del reactor. Este criterio se plantea con base al uso de todos los productos generados por la pirólisis, pero en especial al porcentaje más alto de productos mayoritarios que se obtiene al aplicar el proceso pirolítico.

⁴⁸ Base de datos UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y ECOPETROL. Pirólisis rápida de biomasa. Revista indexada, ISBN: 978-958-761-774-0. 2013.

⁴⁹ GUTIÉRREZ, Fernando. SAN MIGUEL, Guillermo. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 2015.

⁵⁰ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

⁵¹ AGRO WASTE. Pirólisis. Base de datos studylib. Disponible en: <http://studylib.es/doc/4696675/pir%C3%B3lisis---agrowaste>. Última actualización 15 de septiembre de 2017.

⁵² OBANDO, Gabriel Andrés. Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS). Manizales, Colombia. Universidad de Manizales. 2015.

Cuadro 4. Calificación según la selectividad en productos.

Calificación	Observación	Valor
Alta	Hace referencia a aquella alternativa que produce en mayor proporción uno de los productos generados por la pirólisis.	5
Media	Hace referencia a aquella alternativa que produce en mayor proporción dos de los productos generados por la pirólisis.	3
Baja	Hace referencia a aquella alternativa que produce fracciones similares en todos los productos generados por la pirólisis.	1

- **Respaldo bibliográfico** Según los tipos de procesos pirolíticos reportados en la bibliografía tales como lenta, convencional, rápida, flash líquido, flash gas, ultrarrápida, vacío, hidropirólisis y metanopirólisis⁵³, se tomaron para este análisis los procesos de pirólisis lenta, convencional y rápida, ya que a determinadas condiciones de operación, estas rutas pirolíticas permiten evidenciar rendimientos en las fracciones sólidas finales del proceso (biocarbón) que para este caso es el objetivo de estudio, como se muestra en el cuadro 2 y 3.

Cabe aclarar que no se tomó en cuenta el proceso de torrefacción lenta el cual es un proceso de tostado de biomasa que es pirolizado en un ambiente libre de oxígeno con el cual es posible obtener el 82% de producto sólido, ya que es una tecnología poco disponible debido a que ofrece una solución en la implantación de la bioenergía a gran escala, así mismo esta es una metodología recién llegada que se ha presentado como una alternativa a la combustión de carbón pulverizado⁵⁴, por ello su implementación requiere de la disponibilidad de la tecnología adecuada con la que se busca conseguir un proceso realmente eficiente, consumo energético aceptable y bajo desgaste de las herramientas empleadas para dicho alcance. Por lo que para este estudio resulta ser una opción de bajo alcance para ser implementado en la pirólisis de hojas de palma de aceite.

⁵³ Ibid., p. 6-13

⁵⁴ PORTAL DE INGENIEROS ESPAÑOLES. La torrefacción, calentamiento de la biomasa en ausencia de oxígeno para mejorar su contenido energético [en línea]. <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/la-torrefaccion-calentamiento-de-la-biomasa-en-ausencia-de-oxigeno-para-mejorar-su-contenido-energetico/4688> >[citado el 3 de agosto de 2018]

Para la búsqueda de información se acudió a las principales bases de datos que dispone la Universidad de América tales como Celsius, Scopus y SCImago Journal & Country Rank, y otras bases de datos libres como Google Académico, con el fin de obtener información documentada de carácter científico a través de búsquedas especializadas presentadas en tesis, trabajos de grado y postgrado. Se utilizó métodos de búsqueda avanzado con operadores booleanos y palabras clave como: pirolisis+lenta; pirólisis+rápida; pirólisis+convencional.

A partir de lo mencionado anteriormente, se establecen tres calificaciones para el criterio cualitativo:

Cuadro 5. Calificación según el respaldo bibliográfico.

Calificación	Observación	Valor
Bueno	Corresponde a la amplia disponibilidad de información con respecto a su metodología de implementación, equipos, requerimientos y aplicaciones según su finalidad.	5
Regular	Corresponde a la información habitual con respecto a los requerimientos para su implementación.	3
Malo	Referente a la escasez de información acerca del proceso realizado, sin detalle de su metodología de implementación, equipos, requerimientos y aplicaciones según su finalidad.	1

Fuente: Elaboración propia

2.1.3.2 Criterios cuantitativos

- **Rendimiento del sólido.** La pirólisis es un proceso flexible, que permite mediante el uso de la tecnología adecuada favorecer el rendimiento en la producción de gases, líquidos o aceites y biocarbones. Es decir, que este depende de las condiciones y parámetros de operación del proceso pirolítico, de la temperatura final, composición de la biomasa, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y atmósfera de reacción. La alternativa seleccionada debe presentar el mayor rendimiento del producto sólido de interés.

Según la bibliografía, el rendimiento del material sólido producido a través de las tres alternativas de pirólisis aplicado a diferentes tipos de biomasa es:^{55 56}

- Pirólisis Lenta: 35%
 - Pirólisis Convencional: 20%
 - Pirólisis Rápida: 12%
-
- **Humedad de biomasa.** La humedad es representada como la cantidad de agua por unidad de masa de sólido seco. Normalmente la conversión termoquímica es el proceso más adecuado para biomásas con bajo contenido de humedad, por lo que se requiere que la materia prima presente una humedad menor al 20%⁵⁷. En la biomasa, la humedad es una propiedad fisicoquímica propia de sí, al igual que el poder calorífico, carbono fijo, materia volátil, contenido de cenizas y otros son los factores que tienen mayor influencia en la composición y el rendimiento de las fracciones obtenidas durante el proceso de conversión térmica⁵⁸.

La biomasa lignocelulósica residual presenta diferentes rangos de humedad, que depende de la condición climática a la cual estuvo sometida, el contacto directo con el agua y la zona en donde se encuentra situado el material. Sin embargo, la biomasa debe ser acondicionada en una etapa previa a la pirólisis, puesto que cada tipo de proceso requiere que esta cumpla con un valor específico de humedad.

- **Pirólisis Lenta.** Según Loh Soh Kheang (2016) la humedad adecuada para para llevar a cabo una pirólisis lenta debe estar entre un 10 - 15% para la producción de pellets y briquetas. Del mismo modo, Sergio Laguarda

⁵⁵ Base de datos BIOREFINERIES AND GREEN CHEMICAL ENGINEERING BLOG. Rendimiento del material biomasa. Disponible en: <https://biorrefineria.blogspot.com.co/2014/03/2014-06bio-oil-1-parte.html>. Última actualización 23 de septiembre de 2017.

⁵⁶ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

⁵⁷ Base de datos UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y ECOPETROL. Pirólisis rápida de biomasa. Revista indexada, ISBN: 978-958-761-774-0. 2013.

⁵⁸ KLUG, Michael. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Pontificia Universidad Católica del Perú. Revista de química PUCP. Vol. 26 No. 1. ISSN: 1012-3946. 2012.

Velicias⁵⁹, indica que para este tipo de tratamiento termoquímico puede tenerse una humedad hasta del 40%.

- **Pirólisis Convencional.** Según Urien (2013), quien obtuvo biocarbones y biocombustibles mediante la pirólisis de biomasa residual, planteó un modelo conocido como Grauthermic-bio, el cual hace referencia a una pirólisis convencional; donde la muestra de madera de abeto presentaba una humedad del 14,4% con el cual se desarrolló el proceso a condiciones establecidas⁶⁰.
- **Pirólisis Rápida.** La humedad ideal para llevar a cabo este tipo de pirólisis debe ser menor a un 10%, este criterio es propuesto debido a los parámetros de operación planteados por la metodología, concuerda con el desarrollo procedimental descrito por Tabarez (2017)⁶¹.

El contenido de humedad se determina con los protocolos dados en la norma ASTM D3173.

- **Tamaño de partícula de biomasa.** Este criterio condiciona de forma considerable la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia, debido a la baja conductividad térmica de la biomasa y las dificultades para la difusión térmica desde el interior de la partícula. Los productos líquidos se ven favorecidos por la pirólisis de partículas pequeñas, mientras que el carbonizado se ve favorecido por la pirólisis de partículas de mayor tamaño, siendo este un factor influyente en las bajas tasas de calentamiento. Con este criterio se busca mejorar las propiedades físicas y químicas del carbón producido.

Por lo tanto, el valor del tamaño de partícula correspondiente a cada tipo de pirólisis es el siguiente:⁶²

- Pirólisis Lenta: 5-50 mm.
- Pirólisis Convencional: <1 mm.
- Pirólisis Rápida: < 0,2 mm.

⁵⁹ MANYÁ CERVELLÓ, Joan Josep. Efecto de las condiciones de operación de la pirólisis lenta (temperatura final y presión) en la estabilidad potencial del biochar obtenido a partir de alpurejo. Zaragoza, España. Universidad de Zaragoza. 2013.

⁶⁰ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

⁶¹ MÍGUEZ TABARÉZ, José Luis. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis). Disponible en: <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMICOS+PARA+OB+TENCION+DE+BIOMASA.pdf>. Última actualización 28 de octubre de 2017.

⁶² Base de datos BIOREFINERIES AND GREEN CHEMICAL ENGINEERING BLOG. Rendimiento del material biomasa. Disponible en: <https://biorrefineria.blogspot.com.co/2014/03/2014-06bio-oil-1-parte.html>. Última actualización 23 de septiembre de 2017.

2.2 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LA MATRIZ DE SELECCIÓN

Posteriormente, se realiza la matriz en relación a las alternativas y criterios anteriormente mencionados en microsoft excel, donde se le asigna a cada criterio un porcentaje en peso de forma aleatoria (a), sin importar el orden y relevancia de este criterio, hasta obtener un valor de 100% en la sumatoria, luego son colocados en las celdas los valores correspondientes a los registros bibliográficos (b) de cada criterio en relación con las alternativas, posterior a ello se determina el peso para cada alternativa a partir de la ecuación 1 que hace referencia a la relación directa que hay entre el peso de la alternativa y el dato bibliográfico, es decir que si uno de los dos aumenta el otro también lo hará, y la ecuación 2, donde su relación es inversamente proporcional, a mayor dato bibliográfico menor será el peso de la alternativa; estos valores obtenidos reflejan la influencia de los criterios sobre las alternativas en el proceso pirolítico. Los pesos obtenidos luego de ser aplicadas las ecuaciones respectivas serán representados en color amarillo en la matriz de selección. Finalmente se realiza la sumatoria de los pesos por cada alternativa; donde este valor arrojado evidencia la alternativa más conveniente a implementar.

Ecuación 1. Relación del dato bibliográfico y el peso de la alternativa siendo directamente proporcional.

$$\left(\frac{\text{dato teórico de la alternativa} - \text{dato mínimo teórico de las alternativas}}{\text{rango de datos teóricos de la alternativa}} \right) \% \text{ criterio}$$

Ecuación 2. Relación del dato bibliográfico y el peso de la alternativa siendo inversamente proporcional.

$$- \left(\frac{\text{dato teórico de la alternativa} - \text{dato mínimo teórico de las alternativas}}{\text{rango de datos teóricos de la alternativa}} \right) \% \text{ criterio}$$

Cuadro 6. Matriz de selección diseñada en Excel.

			TIPO DE PIRÓLISIS		
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
			Pirólisis lenta	Pirólisis convencional	Pirólisis Rápida
critério 1	Humedad en biomasa (%)	20	15	14,4	10
critério 2	Respaldo bibliográfico	15	Bueno	Malo	Regular
critério 3	Tamaño de partícula de biomasa (mm)	10	50	1	0,2
critério 4	Selectividad de productos	25	Baja	Media	Alta
critério 5	Rendimiento del sólido (%)	30	0,35	0,25	0,12
TOTAL		100	54,839	32,017	52,500

Fuente: Elaboración propia

Luego de ser aplicado el procedimiento anteriormente descrito, los resultados arrojan a simple vista que la mejor alternativa es el número 1, que corresponde a pirólisis lenta con un valor total de 54,839 dado que los valores de mayor significancia se evidencian en los criterios de respaldo bibliográfico, tamaño de partícula y rendimiento de sólido. Respuesta que concuerda con el interés planteado por el mayor rendimiento del producto sólido. No obstante, puede verse que la pirólisis rápida también presenta un valor significativo frente a los criterios como humedad de la biomasa y selectividad de productos; con un valor de 52,500, no alejado de la alternativa escogida. Por esta razón se llevarán a cabo análisis estadísticos y de sensibilidad de los datos que permitirán decidir con mayor certeza la alternativa a realizar, esto mediante el método de Monte Carlo con ayuda del complemento de Excel Oracle Crystal Ball.

2.2.1 Método de Monte Carlo.

Es una técnica de simulación que permite construir múltiples escenarios aleatorios que sean consistentes con la información y los supuestos del analista, esto con el fin de describir de forma cuantitativa la incertidumbre que caracteriza las variables importantes del proyecto las cuales son inciertas y en ocasiones pueden referirse a varios valores, de este modo podrá calcularse el impacto que presentan frente a las alternativas propuestas; a partir de un modelo probabilístico que se emplea para evidenciar las relaciones causa y efecto, y realizar predicciones.

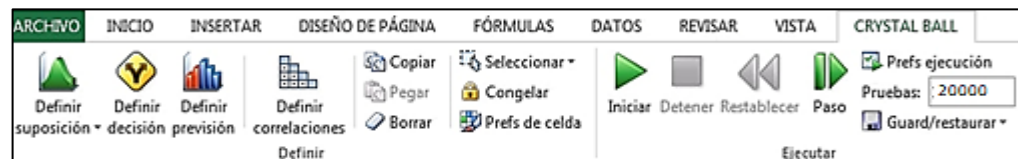
Existen varios programas informáticos que facilitan la implementación de la metodología de Monte Carlo, para este caso las simulaciones de Oracle Crystal Ball permiten realizar tantas pruebas o escenarios como se deseen. El objetivo principal de esta herramienta de Excel, es la de cuantificar los factores de riesgo

para tomar decisiones con base en un número determinado de simulaciones, lo que facilita que se llegue a mejores aproximaciones acerca del nivel de riesgo de las variables aleatorias que se analizan en el modelo⁶³.

Al tener la matriz de selección con los datos diligenciados se procede a aplicar el método de Monte Carlo, en el que este tipo de simulación permite pasar de un método determinístico a un método probabilístico, en donde se asignan para cada criterio pesos de manera aleatoria, buscando que la calificación asignada corresponda a la subjetividad del estudio, con una cantidad de interacciones definidas en el simulador de forma libre por el investigador, de manera que la alternativa que arroje mayor peso pueda ser comparada con su comportamiento estadístico, verificando de este modo que tan desviados están los datos con respecto a la media y pueda concluirse que tan asertivo es el método probabilístico.

Inicialmente se selecciona cada celda correspondiente al peso del criterio que se define como la suposición en la barra de menú, posterior a la selección cada peso quedará señalado en color verde, a continuación se selecciona distribución normal, esto dado que es una distribución continua y asume que hay un número infinito de valores entre dos puntos de la distribución, por lo que su media hará referencia al peso del criterio seleccionado y la desviación estándar será el valor de cuánto se desvían los datos de su media, es decir, el rango en el que se quiere que varíen. Así mismo como es una distribución uniforme todos los valores entre mínimos y máximos tienen probabilidad de ocurrir, por ello resulta ser una distribución adecuada para determinar la alternativa a implementar en las hojas de palma de aceite determinando el valor medio al cual tiende esta ruta pirolítica, con una variabilidad inherente al proceso reflejado estadísticamente por la desviación estándar.

Imagen 4. Barra de menú Oracle Crystal Ball



Fuente: Microsoft Excel 2010

Por consiguiente, se definen las previsiones que será el valor de la suma total en cada alternativa, donde se establece 100 unidades puesto que es el valor total de la suma de los pesos de los criterios; estas quedarán señaladas de color azul. Finalmente se define la cantidad de veces que se desea ejecutar la simulación con

⁶³ BARRERA RODRÍGUEZ, Olga Lucía. Modelo de rentabilidad financiera para los modelos de distribución de una empresa panificadora de consumo masivo. Bogotá, Colombia. Pontifica Universidad Javeriana. 2010.

el número de pruebas especificadas en la barra de menú para dar inicio a la simulación.

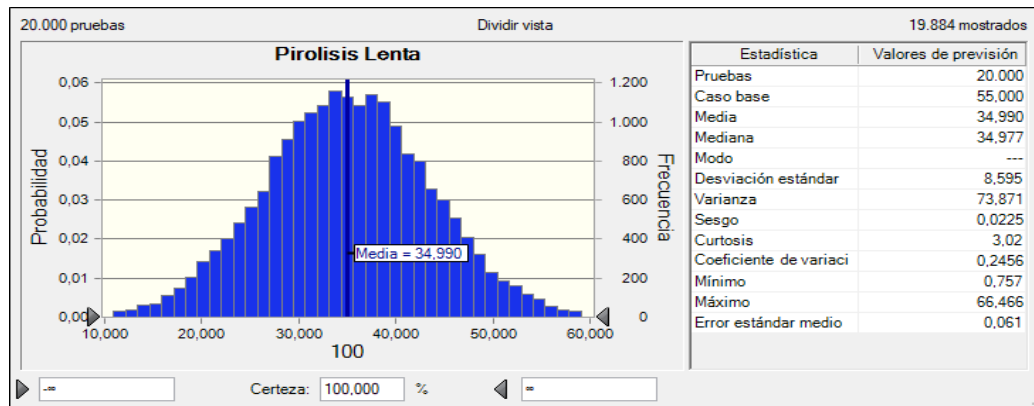
Fueron seleccionadas tres alternativas en las cuales se incluye el objetivo al que se pretende llegar, para ello se tienen en cuenta tres tipos de pirólisis (lenta, convencional y rápida) donde se logra obtener el producto sólido de interés en diferentes proporciones a ciertas condiciones de operación.

2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para este estudio se da inicio a la simulación con 20000 iteraciones, donde se obtienen los siguientes histogramas de resultados para cada alternativa propuesta, junto al gráfico se presenta una ficha estadística que representa la desviación estándar, varianza, y otros parámetros que son indispensable para su análisis.

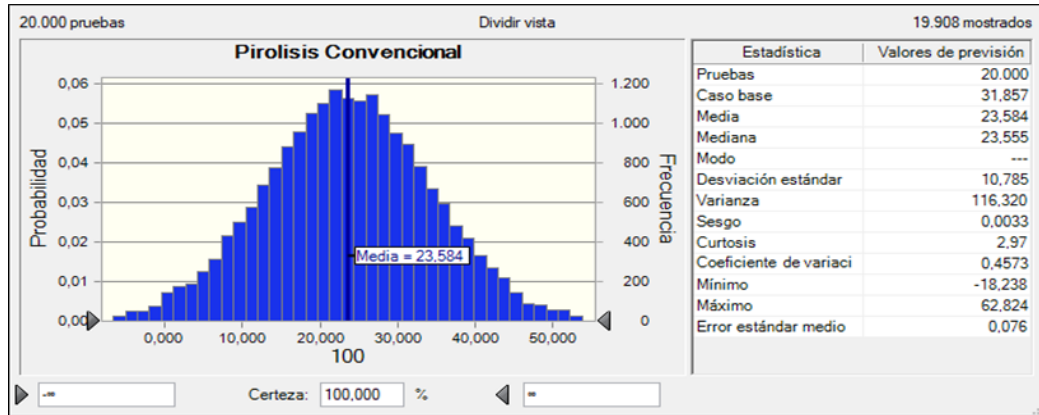
2.3.1 Análisis de histogramas para cada alternativa

Gráfica 1. Histograma para pirolisis lenta con Crystal Ball.



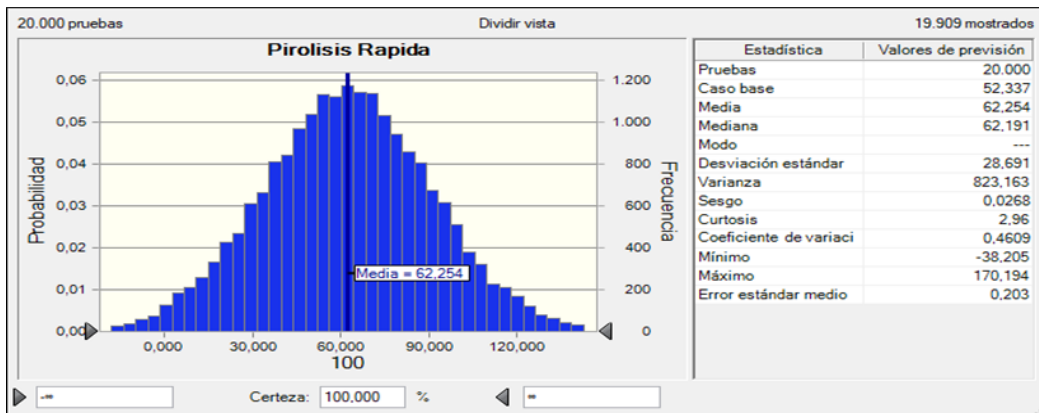
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2. Histograma para pirólisis convencional con Crystal Ball.



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Histograma para pirólisis rápida con Crystal Ball.



Fuente: Elaboración propia

Mediante el modelo estadístico de distribución normal, puede evidenciarse que tanto la media aritmética, la mediana y la moda poseen el mismo valor y se localizan en el pico o campana de Gauss como es comúnmente conocida. Así el área bajo la curva se distribuye tanto a la derecha como a la izquierda del punto central, siendo esta de manera simétrica con respecto a la media, lo que permite a la variable tomar cualquier valor a lo largo del eje horizontal sea $-\infty$ o $+\infty$, lo que es teóricamente posible. Es decir que una distribución depende de parámetros como lo son la media aritmética y la desviación estándar, puesto que la media indica la posición de la campana, la cual puede variar a diferentes valores de μ desplazando la gráfica a lo largo del eje horizontal, y la desviación determina el grado de apuntamiento de la curva; lo que significa que a un mayor valor de la desviación se evidenciará una mayor dispersión de los datos en torno a la media y la curva será menos prolongada, y un valor más reducido en este parámetro indica

una mayor probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución.

Conforme a lo anteriormente descrito, se realiza un análisis con respecto al valor obtenido por la desviación estándar y el coeficiente de variación debido a que son parámetros numéricos que relacionan la dispersión y variabilidad de los datos como se evidencia a continuación:

Tabla 3. Parámetros de dispersión para las alternativas de pirólisis.

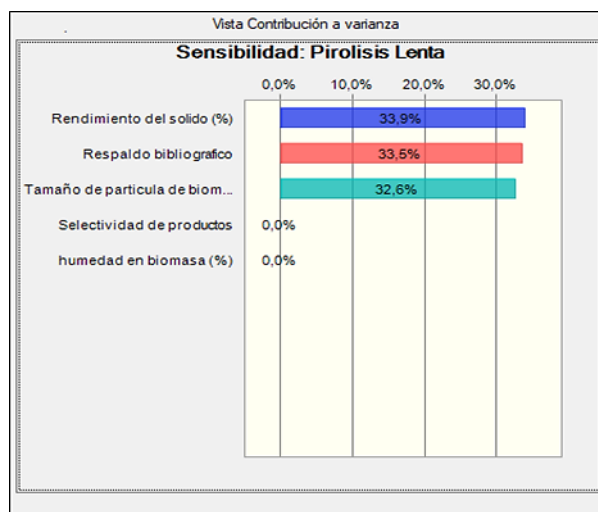
Alternativa	Desviación estándar	Coefficiente de variación
1.Pirólisis Lenta	8,595	0.2456
2.Pirólisis Convencional	10,785	0.4573
3.Pirólisis Rápida	28,691	0,4609

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 3 se identifica que la alternativa 1. Pirólisis lenta, es aquella que presenta la menor desviación estándar y por ende un menor coeficiente de variación, lo que indica que es la alternativa que expone una menor dispersión y variabilidad en los datos eliminando las posibles distorsiones de las medias del conjunto de datos, esto se ve reflejado en el error estándar medio con un valor de 0,061. Haciendo un contraste de la información, se observa que la alternativa 3 manifiesta una mayor desviación de los datos con respecto a la alternativa 2, a pesar que sus coeficientes de variación no se encuentran lejanos entre sí.

2.3.2 Análisis de sensibilidad

Gráfica 4. Sensibilidad de la alternativa 1 Pirolisis lenta.



Fuente: Elaboración propia

La gráfica de sensibilidad correspondiente a la alternativa 1, muestra que tres de cinco suposiciones tienen efecto dominante en la incertidumbre de la previsión, donde se evidencia que el rendimiento del sólido es responsable de un 33.9% aproximadamente de la varianza, seguido del criterio de respaldo bibliográfico y tamaño de partícula de la biomasa con un 33.5% y 32.6% respectivamente. Con base a lo anterior se concluye que estos tres criterios son de importancia a la hora de la ejecución del proceso y por lo tanto analizar el efecto que estas tienen en la previsión del objetivo, permitiendo confirmar los factores influyentes de variabilidad.

También puede observarse que las suposiciones de rendimiento en productos y humedad presentan 0% en los resultados de sensibilidad para la alternativa de pirolisis lenta. Es decir, que podría pensarse que no presentan influencia a la hora de la selección de la ruta pirolítica; sin embargo, en contraste con la bibliografía estos criterios son importantes ya que la humedad va ligada de manera directa con la velocidad de transferencia de masa del vapor de agua al interior de las partículas de tamaños aproximados de 5-50mm para pirolisis lenta, lo que genera la disminución de velocidad en las reacciones de condensación que dan lugar a la selectividad en los productos y por ende conduce a la obtención de mayor carbón siendo este el producto de interés. Es por esto que la humedad de biomasa es un criterio que debe ser analizado y tomado como variable controlada en el desarrollo del proceso termoquímico, esta interpretación tendrá respuesta mediante el diseño experimental desarrollado en el siguiente capítulo.

Los resultados obtenidos por los histogramas son coherentes y concuerdan con la alternativa seleccionada anteriormente por criterios de peso en la matriz de selección, en este caso la alternativa 1 correspondiente a pirolisis lenta es la alternativa seleccionada a través del programa y será implementada para la pirolisis de hojas de palma de aceite.

3. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL REACTOR PIROLÍTICO

El equipo empleado para el desarrollo de las corridas pirolíticas fue suministrado por la empresa Dr. Calderón Laboratorios Asistencia Técnica Agrícola ubicado en la AK 20 N 87- 81 de Bogotá.

Imagen 5. Reactor pirolítico Dr. Calderón Labs.



Fuente: Elaboración propia

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PIRÓLISIS

3.1.2 Controladores de temperatura. El equipo cuenta con dos termocuplas tipo k; la primera (PX7) funciona como controlador y está ubicada en la parte superior indicando la temperatura externa del reactor, mientras que la segunda (PCY4) es un medidor ubicado en la parte inferior que indica la temperatura superior que alcanza el reactor por medio de los vapores que emergen hacia el condensador en húmedo a lo largo del tratamiento.

Imagen 6. Controladores de temperatura.



Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Condensador en húmedo. Este condensador de vidrio recibe los gases generados por el reactor *batch* a partir del conector de gases de acero inoxidable que une la parte superior de ambos mecanismos, permitiendo de esta manera el flujo de gases.

Este condensador es alimentado inicialmente con 2500 ml de agua a temperatura ambiente la cual permite la condensación en húmedo del aceite pirolítico generado por la materia prima suministrada.

Imagen 7. Condensador en húmedo con conector de acero inoxidable.



Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Reactor Batch. El reactor consiste en un tubo vertical de acero inoxidable de profundidad aproximada de 380 mm con capacidad de 4 L, el cual es ingresado dentro de una chaqueta calefactora la cual está compuesta por lana de cerámica, que tiene como función aislar la pared metálica del calor proveniente de las resistencias y del mismo modo conservar el calor al interior del sistema junto con una capa de ladrillo que sostiene las resistencias y funciona como refractario para soportar el calor transferido.

Las resistencias eléctricas abarcan la mitad de longitud del reactor, con el fin de transferir el calor por conducción al material que se encuentra cercano a la pared del reactor y por radiación al material ubicado en el centro del cilindro.

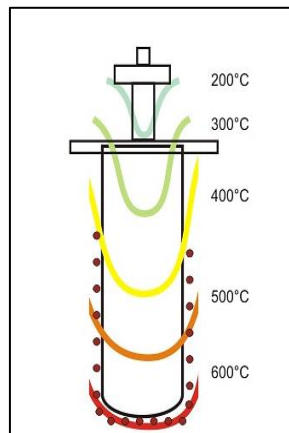
Imagen 8. Reactor tipo Batch con chaqueta calefactora.



Fuente: Elaboración propia

La temperatura que se distribuye a lo largo del reactor es de manera diferencial puesto que en la parte inferior está presente el sistema de calentamiento siendo esta zona la más caliente del sistema; mientras que la parte superior del tubo resulta ser la zona con menor temperatura por la ausencia de las resistencias y por ende el calor proveniente de los gases que se desprenden del proceso son aquellos que calientan esta zona.

Ilustración 9. Perfil térmico de la marmita.



Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Quemador de gases. El montaje cuenta con una tea la cual está situada en la parte superior izquierda del sistema, conectada con el condensador de vidrio la cual recibe los gases no condensables como monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, etano, etileno, propano, butileno e hidrogeno que este proceso de pirólisis genera expulsándolos a la atmósfera.

Es también conocido como un supresor de llama, compuesto por un recipiente de acero que contiene agua, donde su nivel es medido a través de una manguera que sale por la parte inferior de este y se posiciona a la misma altura del cilindro para

determinar la cantidad de agua que posee en el instante, esto con el fin de evitar que el oxígeno entre por la tea y forme una atmósfera explosiva.

Imagen 9. Sistema Flame Arrester.



Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Medidor de presión. El medidor consta de una tabla de madera y una manguera colocada en esta que hace alusión a un esquema del manómetro de tubo U, la manguera contiene agua de manera equilibrada con un valor inicial de cero a ambos lados, donde uno de sus extremos está libre a la atmósfera y el otro extremo se encuentra conectado a la parte superior del reactor *batch*, de ahí se determina la presión del sistema en milímetros de la columna de agua (mm.c.a).

Imagen 10. Manómetro tipo U.



Fuente: Elaboración propia

3.2 HOJAS DE PALMA DE ACEITE COMO PRECURSOR

Las investigaciones basadas en el estudio del aprovechamiento de hojas de palma de aceite ha sido un campo poco estudiado a pesar de que su disponibilidad es alta y su cuantía es considerable a raíz de las actividades de poda y extracción del aceite de la planta, la acumulación de este material por lo general es empleada para el propio beneficio de la palma a partir de la espera de su descomposición natural en el suelo y como ruta alterna para la generación de energía en calderas.

Por esta razón, se escoge como precursor para la obtención de carbón vegetal a partir del proceso de pirólisis y de este modo poder determinar si de este puede obtenerse productos de mayor valor que puedan contribuir al medio y a su aprovechamiento energético. Para ello es indispensable evaluar sus propiedades antes de iniciar con este proceso termoquímico y determinar si es provechoso trabajar con las condiciones naturales de la planta para ser de este un proceso eficaz.

3.2.1 Método de muestreo para las hojas de palma de aceite. Teniendo como premisa que la muestra a estudiar es un conjunto de elementos variables y que cada unidad tiene asociado propiedades que pueden influir en las variables de interés, se debe seleccionar una muestra representativa de la población a estudiar. En este sentido cabe aclarar que según Palella y Martins⁶⁴, señalan que una muestra de 10%, 20%, 30% o 40% puede ser representativa de la población, con un conjunto de factores tales como: amplitud de la población total y de la muestra (tamaño); nivel de confianza adoptado (el cual puede oscilar entre 90% al 99%); error de estimación (entre 1% a 15%) y variabilidad de la población (desviación típica).

El tamaño de la muestra se determina a partir de la ecuación⁶⁵, cuando es desconocido el tamaño de la población o es estadísticamente infinita:

Ecuación 3. Determinación del tamaño muestral.

$$n = \frac{(Z\alpha)^2 pq}{e^2}$$

Dónde:

n= Tamaño de la muestra

⁶⁴ CORRAL, Yadira. CORRAL, Itzama. FRANCO, Angi. Procedimiento de muestreo. Revista ciencias de la educación. Vol. 26 No. 46, pp. 151-167. ISSN: 316-5917. 2015.

⁶⁵ MESA UPEGUI, Maria Paula. ORTÍZ RODRIGUEZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirolisis para la producción de diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2016.

e = error máximo de estimación (se recomienda entre 1% y 15%; o su determinación por el comportamiento probabilístico)

$Z\alpha$ = nivel de confianza seleccionado por el investigador. (Para 99% equivale a 2,58. Para 95% es igual a 1,96)

p = probabilidad de éxito (0,5 en caso de desconocerse)

q = probabilidad de fracaso (1-p)

Teniendo en cuenta la población a estudiar se selecciona un error máximo de estimación del 5%, teniendo en cuenta que a mayor valor de error este corresponderá a un valor menor en el número muestral. El nivel seleccionado de confianza es del 0.95 equivalente a $Z\alpha=1,96$

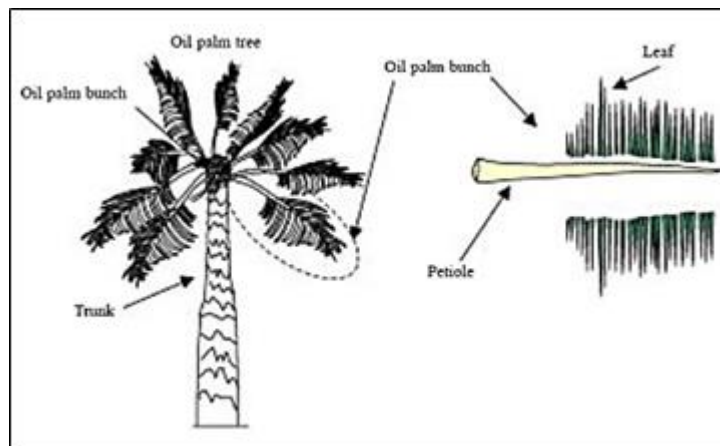
$$n = 384,16 \text{ kg}$$

Cuadro 7. Toma de muestra de las hojas de palma.

Cultivo	Época de muestreo	Parte de la planta a muestrear	Cantidad de muestra	Método de muestreo
Palma africana de aceite	Estación seca, mes de marzo (23°C)	Tallo con foliolos	400 kg (100 hojas Aprox.)	Aleatorio (2 hojas por palma)

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 10. Parte de la planta a muestrear.



Fuente: SULAIMAN, S. BALAMOHAN, S. MONI, Z. ATNAW S. MOHAMED A. Feasibility study of gasification of palm oil fronds. Revista Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES). Vol. 9, pp. 1744-1757. ISSN: 2289-4659. 2015.

La biomasa correspondiente a las hojas de palma de aceite empleada en la investigación es recolectada desde las plantaciones de palma de aceite del cultivo Camelios de Esperanza (trocha5), ubicado en el municipio de Granada en el departamento del Meta Colombia, a inicios del mes de marzo del año en curso, teniendo en cuenta la distribución de las lluvias en la región, siendo esta la época apropiada para su recogida. La colecta se llevó a cabo después de realizar la poda de las plantas, esto con el fin de procurar que sus propiedades permanecieran constantes y no fuesen alteradas al contacto con el suelo durante el transcurso del tiempo.

Imagen 11. Hojas de palma de aceite.



Fuente: Elaboración propia

Imagen 12. Material empleado para el proceso pirolítico.

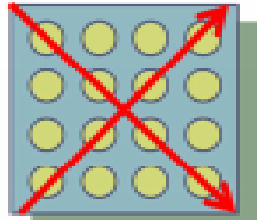


Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Recolección de las hojas de palma de aceite. Se seleccionó la cantidad determinada de biomasa de manera aleatoria que a simple vista presentaban una humedad intermedia, es decir, aquellas que aún retenían agua en su interior, así como también se procuró que todas tuviesen aspectos similares con respecto a su tamaño y color, pretendiendo de esta manera delimitar las características de las unidades a estudiar y del mismo modo evitar posibles variaciones en el momento de llevar la materia prima al proceso pirolítico.

Este muestreo se llevó a cabo a partir del patrón reflejado en la ilustración 12, la cual consiste en tomar direcciones ascendentes y descendentes realizando un recorrido en forma de X en el terreno del cultivo, donde se realiza la toma de muestras de manera aleatoria correspondiente a dos hojas por palma, para un total de cincuenta palmas en el área equivalentes a 400 kg aproximadamente esto para cumplir con el tamaño de la muestra requerido para el estudio.

Ilustración 11. Distribución muestral en el terreno.



Fuente: CENTRO DE BIOSISTEMAS. Guía para la toma de muestra foliar. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. 2010.

Se tomaron criterios para definir la toma de las muestras, buscando que dentro de esta área hubiese homogeneidad en parámetros como el uso y manejo del cultivo, color del suelo, apariencia y color superficial de las hojas de palma. Finalmente, las muestras recolectadas de la plantación son embaladas en lonas para su respectivo transporte a Bogotá.

3.2.3 Preparación de la muestra. Para realizar las pruebas preliminares de caracterización fisicoquímica de la biomasa a pirolizar, fue necesario reducir el tamaño de partícula de los tallos aproximadamente de 2 a 4 cm; esto con el fin de facilitar la manipulación del material y llevarlo al molino de martillos de 2 caballos de potencia (hp) disponible en los laboratorios de operación con sólidos de la Universidad de América para homogeneizar su tamaño para llevar a cabo la determinación de pH. (Ver Anexo A)

La alimentación al molino se realizó de manera pausada y en pequeñas cantidades suministradas a la tolva del molino, para evitar el estancamiento del material en la malla y por tanto el sobrecalentamiento del motor; esto debido a que el material trabajado es altamente fibroso.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS HOJAS DE PALMA DE ACEITE

3.3.1 Determinación de pH. Se estableció el pH de la muestra sólida a partir del pH-metro de mesa LAB 855 marca Schott, con electrodo de vidrio combinado del tipo trío con sensor de temperatura incorporado, disponible en el laboratorio de química de la Universidad de América calibrado con tres soluciones reguladoras de pH4, pH7 y pH 10 respectivamente.

Tabla 4. Datos obtenidos por el pH-metro LAB 855.

Propiedades	Resultados
Temperatura de la muestra (°C)	16,60
pH de la muestra	4,01

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realizaron las siguientes pruebas con el material sólido a un tamaño de partícula menor a 4cm; esto por ser las condiciones iniciales con las que ingresara al reactor en el momento de ejecutar la pirólisis.

3.3.2 Determinación de humedad. Se determina la humedad de la muestra a partir de lo establecido en la norma ASTM D3173. La biomasa es sometida a una temperatura de 105 ± 5 , por un tiempo aproximado de una hora, esto con el fin de determinar la cantidad de agua presente en la muestra de hojas de palma de aceite. Aplicando la ecuación 4:

Ecuación 4. Determinación del porcentaje de humedad.

$$\%H = \frac{W - B}{W} * 100$$

Dónde:

W: Peso de muestra analizada (g)

B: Peso de la muestra después de secado (g)

$$\%H = 42.66$$

Conforme al resultado obtenido y basándose en la bibliografía consultada, la biomasa proveniente de la palma de aceite para la producción de biocarbón debe contener una humedad menor al 15%, y con base al resultado obtenido existe la necesidad de un pre tratamiento a la biomasa para reducir el contenido de humedad.⁶⁶

⁶⁶ KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

Para ello la biomasa de palma de aceite puede ser cortada o rallada con el fin de reducir su humedad, sometiéndose a un calentamiento forzado en un horno a 80°C durante 5 horas aproximadamente⁶⁷, para lo cual se obtiene un nuevo resultado de humedad correspondiente a:

$$\%H = 2.43$$

Ahora el nuevo porcentaje de humedad resulta ser favorable para dar inicio al proceso pirolítico.

3.3.3 Determinación de cenizas. Se determinó el contenido de cenizas mediante la norma ASTM D3174, para determinar la cantidad de materia orgánica que queda en el material vegetal, luego de ser quemado por determinado tiempo, aplicando la fórmula:

Ecuación 5. Determinación del porcentaje de cenizas.

$$\%Cenizas = \frac{D}{W} * 100$$

Donde

D: Peso del material resultante (g)

W: Peso inicial de muestra (g)

$$\%Cenizas = 1.50$$

Siendo este un resultado favorable para las hojas de palma de aceite, puesto que se requiere que este valor sea pequeño para asegurar la combustión de la cantidad máxima del material vegetal el cual se refleja posteriormente en el desarrollo de la porosidad de la matriz vegetal.

3.3.4 Determinación de materia volátil. Se determinó el material volátil según la norma ASTM D3175, con una muestra inicial de 3 g que fue depositada en un crisol, que se pesó previamente y se introdujo en una mufla durante 1 hora a 550°C. Trascurrido el tiempo se retiró el crisol con ayuda de las pinzas para su posterior enfriamiento en el desecador, luego se determinó su masa pesándose en la balanza analítica.

El porcentaje de materia volátil se calculó de acuerdo a la siguiente expresión:

⁶⁷ MUNEVAR MARTINEZ, Fernando. FRANCO BAUTISTA, Pedro Nel. Guía general para el muestro foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite. Centro de investigación en palma de aceite CENIPALMA. Boletín técnico No. 12, ISBN: 96153-1-7. 1998.

Ecuación 6. Determinación del porcentaje de materia volátil.

$$\% Mp = \frac{(Mi - Mf)}{Mi} * 100$$

$$\% Mp = 78,00\%$$

Dónde:

Mp= Masa perdida (%)

Mi = Masa inicial (g)

Mf= Masa final (g)

Con base a lo anterior, se calcula el porcentaje de volatilidad de la muestra vegetal así:

Ecuación 7. Determinación del porcentaje de volatilidad.

$$\% Volatilidad = \%Mp - \%Humedad$$

- Porcentaje de materia volátil con la humedad inicialmente calculada:

$$\% Volatilidad\% = 35.20$$

- Porcentaje de materia volátil con la humedad nueva calculada:

$$\% Volatilidad = 75.57$$

3.3.5 Determinación del carbono fijo. Corresponde a la materia orgánica combustible que queda luego de liberarse la humedad y el contenido de materia volátil y cenizas, expresado en tanto por ciento y no existe una norma para hallarlo de manera directa.

$$\% \text{Carbono fijo} = [100 - (\% \text{Humedad} + \% \text{Cenizas} + \% \text{Materia volátil})]$$

$$\% \text{Carbono fijo} = 20,52$$

En la tabla 5 se recopilan los valores del análisis inmediato de la muestra de biomasa obtenidos a partir de los procedimientos anteriormente descritos:

Tabla 5. Análisis inmediato de las hojas de palma de aceite.

Tipo de Biomasa	Humedad (%)		Materia Volátil (%peso)		Cenizas (%)	Carbono fijo (%)
	Inicial	Final	Inicial	Final		
Hojas de palma de aceite	42,80	2,41	35,20	75,57	1,50	20,52

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con otros residuos biomásicos que han sido estudiados y caracterizados como el orujo de uva, orujo de aceituna, cascara de café, eucalipto, entre otros, los cuales presentan valores de humedad en un rango de 8,33% al 62,70% , esto debido a su origen y zona geográfica en la cual se encuentran⁶⁸, por lo que un valor de 42,80% para las hojas de palma de aceite es coherente, sin embargo como se mencionó anteriormente este valor debe ser lo más bajo posible para no afectar el rendimiento de las fracciones en el proceso pirolítico.

Así mismo el porcentaje de materia volátil de las hojas de palma de aceite se encuentra en el rango del 24,85% al 82,00% que presentan las biomásas mencionadas, cumpliendo con el parámetro de materia volátil para la biomasa lignocelulósica el cual debe estar entre el 40% al 80%.⁶⁹

En cuanto al porcentaje de cenizas en relación con la materia seca conviene que este sea el menor valor posible ya que se garantiza que la biomasa será convertida eficientemente en combustible.⁷⁰ Finalmente el contenido de carbono fijo correspondiente al 20,52% referente a la fracción residual de carbono sobre la masa seca, siendo este útil para ser aprovechado en la obtención de combustibles sólidos.

⁶⁸ AL-KASSIR AL-KARANY, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Leiria, Portugal. Escola Superior de Tecnologia e Gestao. 2013.

⁶⁹ MONTOYA ARBELÁEZ, Jorge Iván. Pirólisis rápida de biomasa. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Ecopetrol. Última actualización 24 de marzo de 2018.
Visto en:
<https://books.google.com.co/books?id=GHYRAwAAQBAJ&pg=PA30&dq=humedad+en+pirolisis&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiZoYesrrXbAhViv1kKHYYIOB7EQ6AEIJAA#v=onepage&q=humedad%20en%20pirolisis&f=false>

⁷⁰ BUSTAMANTE GARCÍA, Verónica. CARRILLO PARRA, Artemio. PRIETO RUÍZ, José Ángel. CORRAL RIVAS, José Javier. HERNÁNDEZ DÍAZ, José Ciro. Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. Vol. 7 No. 38, pp. 5-24. ISSN: 2007-1132. 2016.

3.3.5 Contraste del análisis inmediato de las hojas de palma de aceite.

Con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente, se realiza un análisis comparativo con el documento propuesto por Loh Soh quien realizó el análisis inmediato para los diferentes subproductos de la palma de aceite,⁷¹ esto con el fin de evaluar la calidad de los biocombustibles de segunda generación para dar origen a nuevas fuentes de energía.

Tabla 6. Propiedades de las hojas de palma de aceite de Malasia.

Muestra de biomasa de palma de aceite	Poder calorífico (CV) promedio (MJ/kg)	Contenido de humedad (%)	Contenido de ceniza (%)	Contenido de materias volátiles (%)
Racimos de fruta vacíos	18,88	66 - 69	4,60	87,0
Fibra del mesocarpio	19,06	35 - 48	6,10	84,9
Cuesco	20,09	11 - 13	3,00	83,4
Hojas de la palma de aceite	15,72	62 - 77	3,37	85,1
Palmiste	17,47	67 - 81	3,35	86,7
Efluente de las plantas de beneficio	16,99	90 - 95	15,20	77,0

Fuente: KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

Se realiza el contraste para comparar las propiedades de las hojas de palma de aceite de Malasia y las hojas de Granada Meta, dado que este documento encontrado en las bases de datos disponibles permitió obtener información verídica acerca del estudio de este subproducto dando a conocer sus propiedades físicas y químicas, reconociendo la importancia de los valores obtenidos para cada uno de los parámetros con el fin de ser implementadas como materia prima en procesos termoquímicos, siendo este un material lignocelulósico poco estudiado y por ende un campo desconocido para esta investigación. Adicional a esto se puede diferenciar los datos obtenidos dando un estimado de las propiedades que presentan las hojas de palma en uno de los cultivos de Colombia para posteriores investigaciones, validando con ello su uso en la generación de nuevos productos de valor agregado.

Se observa que los valores experimentales presentan una diferencia del 19,2% con respecto a la humedad, 1,9% para el contenido de cenizas y 9,53% para la materia volátil. Valores que tuvieron variabilidad a causa del origen de la biomasa, zona geográfica, época anual y actividades relacionadas con el mantenimiento del cultivo. Además, también pudo verse afectado por el pre tratamiento que se le aplicó a la biomasa para determinar dichas propiedades, los instrumentos que emplearon y metodologías aplicadas.

⁷¹ KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

3.3.6 Análisis elemental de las hojas de palma de aceite. El análisis elemental de la muestra de biomasa tiene como finalidad evaluar los principales elementos orgánicos que la constituyen siendo estos el carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno. El análisis se llevó a cabo a partir del analizador elemental Thermo Scientific™ FlashSmart™ disponible en la Universidad de los Andes, donde se realizaron dos pruebas alrededor de 1,24 g de biomasa obteniendo el promedio en porcentaje de cada elemento (Ver anexo E).

Tabla 7. Composición elemental promedio para las hojas de palma de aceite

<u>Elemento</u>	<u>Porcentaje (%)</u>
Carbono	46,77
Hidrógeno	5,41
Oxígeno ^(a)	43,13
Nitrógeno	4,69

(a) estimado por diferencia

La composición elemental de las hojas de palma de aceite presentadas en la tabla 7, expone un contenido de carbono de 46.77%, valor que es acorde con otros tipos de biomasa que se encuentran alrededor del 50%⁷², así mismo esta magnitud fue contrastada con hojas de palma de aceite gasificadas que presentaron un contenido de carbono de 42.65% siendo estos muy cercanos entre sí⁷³. Los valores para el nitrógeno y azufre deben ser bajos con respecto a los combustibles fósiles debido a que minimizan los efectos negativos sobre el medio ambiente. A partir de este informe se valida el uso de esta biomasa como fuente de energía para procesos de pirolisis por su alto contenido de carbono el cual lo hace apreciable frente a otras biomásas.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El planteamiento del diseño experimental se realiza con base a la fracción sólida obtenida en el proceso de pirolisis, es decir, la matriz carbonada vegetal que es el producto de interés y objeto de estudio de este proyecto.

Inicialmente se quiere observar el efecto que tiene la temperatura y tiempo de residencia frente al rendimiento del carbón vegetal; ya que se ha comprobado que

⁷² PAIPA RIOS, Nathaly Aseneth; TRIANA GÓMEZ, Max Alejandro. Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá D.C, Volumen 9, pp.18-29, enero-Julio 2018.

⁷³ S.A. Sulaiman , S. Balamohan , M.N.Z. Moni1 , S.M. Atnaw , A.O. Mohamed. Feasibility study of gasification of oil palm fronds. Department of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia, Volume 9, pp. 1744-1757, December 2015

estos dos factores pueden influir de manera directa sobre la variable respuesta como se ha visto en estudios realizados previamente.⁷⁴

3.4.1 Factores del diseño experimental. Basándose en la bibliografía, se seleccionaron dos factores cuantitativos A y B, donde el factor A hace referencia a la temperatura a la cual se somete la biomasa a pirolizar y el factor B corresponde al tiempo que la biomasa reside en el reactor.

Estos factores fueron seleccionados dado a que afectan de manera directa el proceso de pirolisis, siendo la temperatura la variable de operación que influye en los rendimientos y las características físicas y químicas de las fracciones finales del proceso pirolítico, por esto es importante definir los rangos de temperatura del sistema, ya que al aumentar este factor se favorece la descomposición térmica del material el cual ocurre a través de reacciones que describen el proceso gradual de degradación, descomposición y carbonización a bajas temperaturas y por otro lado la formación de gases y compuestos volátiles cuando se aumenta este factor. Así mismo, se presenta la formación de CO, CO₂ e H₂ y otro tipo de compuestos, favoreciendo la generación de gases y por ende disminuyendo el rendimiento en peso del biocarbon⁷⁵. Por otro lado, el tiempo de residencia es otro de los factores a tener en cuenta, ya que este afecta el grado de conversión de la biomasa, siendo este referente al tiempo requerido para que las partículas del material se calienten desde la temperatura ambiente hasta la temperatura completa de descomposición⁷⁶, de igual manera, el efecto de tiempos cortos favorece la obtención de productos líquidos y el efecto al aumentar de manera progresiva este factor se ve reflejado por presentar reacciones secundarias entre los productos generados dando origen a mayores rendimientos de sólidos y gases. Estos tiempos están directamente ligados con las condiciones de operación y la tecnología empleada en el proceso de pirolisis⁷⁷.

Existe una clasificación para definir las variables que pueden ser dependientes, independientes, incontroladas y controladas en el proceso, estas son definidas en el siguiente cuadro:

⁷⁴ BURGOS CAPUZANO, Gabriela Elizabeth; JARAMILLO QUIROZ, Jomayra Lorena. Aprovechamiento de los residuos de cacao y coco para la obtención de carbón activado. Cantón Milagro, provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil, 2015.

⁷⁵ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

⁷⁶ GARCIA CORTES, Angela. Estudio termoquímico y cinético de la pirolisis de residuos sólidos urbanos. Alicante, España. Universidad de Alicante, 1993

⁷⁷ MONTOYA ARBELÁEZ, Jorge Iván. Pirolisis rápida de biomasa. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Ecopetrol. Última actualización 24 de marzo de 2018. Visto en:

<https://books.google.com.co/books?id=GHYRAwAAQBAJ&pg=PA30&dq=humedad+en+pirolisis&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiZoYesrrXbAhViv1kKHYYIOB7EQ6AEIJjAA#v=onepage&q=humedad%20en%20pirolisis&f=false>.

Cuadro 8. Definición de variables.

Variables Independientes	Variables dependientes	Variables controladas (fijas)
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del sistema. 	Rendimiento del producto sólido.	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad de la biomasa ingresada.
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de residencia. 		<ul style="list-style-type: none"> • Masa ingresada al reactor.

Fuente: Elaboración propia.

Las variables independientes son aquellas que pueden ser manipuladas y afectan directamente los resultados de la variable dependiente, es decir que esta variable depende de las modificaciones que se le realicen a la variable independiente y es aquella que refleja los resultados de un estudio de investigación. De igual manera, existen las variables controladas que se mantienen constantes puesto que pueden afectar el experimento, esto con el fin de poder evaluar el efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente (variable respuesta).

3.4.2 Pre-experimentación.

Cabe aclarar que la temperatura y el tiempo propuesto para la pre-experimentación se establecieron de forma bibliográfica puesto que es necesario tener claro las condiciones planteadas por diferentes autores para una pirólisis lenta, como también de manera práctica será posible establecer los niveles para cada factor.

Inicialmente se pesaron 500 gramos de hojas de palma de aceite que fueron reducidas a un tamaño de partícula de 4 cm aproximadamente, biomasa que presenta una humedad del 3% siendo un factor importante con respecto al consumo energético requerido para evaporar el agua contenida en el material; con estas características la biomasa fue sometida inicialmente a una temperatura de 500°C por un tiempo de residencia de 4 horas para su respectiva carbonización. Finalizado el proceso y una vez obtenido los productos de pirólisis, se registran los resultados obtenidos en unidades de masa y en porcentaje de rendimiento como se evidencia en el siguiente cuadro:

Cuadro 9. Rendimientos de los productos del proceso de pirólisis a T: 500°C y t: 4h

Muestra	Productos	Unidades en masa (g)	Rendimiento (%)
	Carbonilla	92,30	18,46
	Material no pirolizado	120,20	24,04
	Aceite de pirólisis	4,1	0,82
	Gas de pirólisis	-	50,68
	Agua	150 ml	6,00

Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia en la tabla anterior parte del material ingresado al reactor fue pirolizado parcialmente donde este fue mayor al producto carbonizado, por lo que se obtuvo un bajo rendimiento de carbonilla favoreciendo a la producción de gas de pirólisis. De esta manera, se exceptúa las condiciones de temperatura y tiempo de residencia planteada, ya que no cumplen con el objetivo propuesto con respecto a la obtención de carbón en mayor rendimiento.

A partir de la pre- experimentación se modifican las condiciones de temperatura y tiempo de residencia establecidas, y se plantean nuevos niveles teniendo como premisa que el reactor *batch* disponible no es el más efectivo, ya que cuenta con un sistema de resistencias eléctricas que abarcan solo la mitad de longitud del reactor, donde la transferencia de calor se da por conducción al material que se encuentra cercano a la pared del reactor y por radiación al material ubicado en el centro del cilindro dando como resultado una pirólisis parcial de la biomasa como se observó anteriormente, por lo cual se opta por seguir la metodología de Mesa⁷⁸, Correa⁷⁹, Calderon⁸⁰, las cuales se consideraron como parte de referencia para someter las hojas de palma de aceite, verificando que las condiciones a las cuales fueron desarrollados estos procesos estuviesen dentro de los parámetros

⁷⁸ MESA UPEGUI, María; ORTIZ RODRIGUEZ, Carol Ivonne Evaluación del proceso de pirólisis para la producción de diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industria de alimentos, Bogotá D.C, Fundación Universidad de América, 2016.

⁷⁹ CORREA L, María Lorena; VELÁSQUEZ J, Jorge. Optimización de la producción de carbón activado de cáscara de coco mediante steam explosión. Medellín, Colombia.2009.

⁸⁰ CALDERON SAENZ, Felipe; CAMELO SALCEDO, Ángela. Pirólisis del raquis del racimo de palma de aceite (efb) para la producción de biochar. Bogotá, Colombia. 2013.

de una pirolisis lenta y de esta manera poder mejorar la calidad de los biocarbones al reducir la cantidad de compuestos volátiles y aumentar la concentración de carbono siguiendo los parámetros de la bibliografía consultada.

3.4.3 Experimentación. Para cada factor se asignó dos niveles cuantitativos los cuales pueden tomar valores máximos y mínimos con la notación + y - respectivamente, cada uno de ellos comprende dos niveles delimitados por los rangos de experimentación; esto conocido como dominio experimental.

Tabla 8. Matriz experimental

Factores	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Temperatura (°C)	550	600
Tiempo de residencia (horas)	4	5

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Nivel de significancia. El nivel de significancia o error aleatorio hace alusión a la verificación de una hipótesis que da lugar a la generación de errores tipo I y tipo II si no se seleccionan de manera acertada. Es simbolizado como alfa (α) y puede tomar valores de 0.25, 0.1, 0.05, y 0.01.

Para el análisis debe examinarse el valor P de la prueba, si este valor es inferior al nivel de significancia especificado, puede concluirse que la diferencia es significativa y así se rechaza la hipótesis nula, los valores de P que sean menores a este nivel de confianza representan el efecto individual o grupal frente a la variable respuesta.

Sin embargo, para esta investigación se debe tener en cuenta que el proyecto a desarrollar es de forma exploratoria debido a que el tipo de material biomásico trabajado (hojas de palma de aceite), no ha sido un campo de investigación abordado con profundidad; por esta razón, se realiza un análisis estadístico con base a las hipótesis donde se busca establecer dos niveles de confianza en los que se pueda observar la influencia de los factores al obtener un error tipo II en el experimento, y así mismo, observar como los factores no presentan efecto sobre la variable respuesta mediante el error tipo I, este par de errores hacen referencia a un error aleatorio debido a que se plantean factores con dominio experimental bajo y alto los cuales son controlables y están basados en la bibliografía para procesos de pirolisis lenta que se han desarrollado con diferentes variables operativas y que han sido aplicados a biomásas con diversas características físicas y químicas, así como también se presentan variables ambientales y sistemáticas incontrolables; por lo que hace referencia a la variabilidad natural del proceso.

Para este estudio se toma un valor de significancia del 5% y 25% de probabilidad de que los resultados y las tendencias contempladas en el experimento se produjeran por casualidad, del mismo modo, se determina la confiabilidad de los datos obtenidos por el diseño experimental.

3.4.5 Hipótesis de experimentación. Las hipótesis son el medio por el cual se intenta demostrar una suposición o afirmación que ha sido formulada conforme a investigaciones científicas previas acerca de la relación entre los parámetros de una distribución. Por otro lado, las hipótesis buscan demostrar la relación causa y efecto que puede presentarse entre las variables independientes y las variables dependientes del diseño experimental.

3.4.5.1 Hipótesis nula (Ho): Es aquella que confirma la inexistencia de efectos significativos en las variables y confirma que la relación entre la variable independiente sobre la variable dependiente presentan medias iguales y por tanto la varianza de los promedios es igual a cero.⁸¹ Por tanto, es la hipótesis que se formula antes de iniciar el experimento y aquella que se busca rechazar.

3.4.5.2 Hipótesis alterna (Hi). Es la hipótesis contraria a la nula, afirma que si existen diferencias y relación entre los resultados al inicio del experimento y al final del mismo en las variables independientes y la variable dependiente. Toma el valor del parámetro al final del experimento, por tanto, es aquella que se busca demostrar.

Las hipótesis planteadas son:

- Ho= No hay efecto de la temperatura en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \alpha = 0$$

- Hi= Hay efecto de la temperatura en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \alpha \neq 0$$

- Ho= No hay efecto del tiempo de residencia en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \beta = 0$$

- Hi= Hay efecto del tiempo de residencia en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \beta \neq 0$$

⁸¹ MESA UPEGUI, Maria Paula. ORTÍZ RODRIGUEZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirolisis para la producción de diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2016.

- Ho= No hay efecto de la interacción entre la temperatura y tiempo de residencia en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \alpha\beta = 0$$

- Hi= Hay efecto de la interacción entre la temperatura y tiempo de residencia en el rendimiento del producto sólido carbonoso.

$$H_0: \alpha\beta \neq 0$$

3.5 FRACCIONES OBTENIDAS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS

El diseño experimental se realizó en el orden de menor a mayor tiempo y de menor a mayor temperatura, sin tener ningún criterio de desarrollo determinado; completando así un total de 8 corridas pirolíticas con sus respectivas repeticiones como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Desarrollo de las corridas pirolíticas en condición específicas.

Corridas	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
1	550	4
2	600	4
3	550	5
4	600	5
Réplica	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)
5	550	4
6	600	4
7	550	5
8	600	5

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta la tabla 10, la cual registra las fracciones obtenidas en las ocho corridas pirolíticas correspondientes a 500 g de biomasa inicial y 2500 ml de agua suministrada al condensador de vidrio.

Tabla 10. Productos obtenidos de la pirólisis de las hojas de palma de aceite.

Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Agua (ml)	Aceite de pirólisis (g)	Carbonilla (g)
Corridas				
550	4	200	4,2	181,1
600	4	150	2,1	166,4
550	5	100	3,2	184,8
600	5	170	3,4	162,0
Repeticiones				
550	4	210	3,6	175,5
600	4	170	2,8	168,6
550	5	120	3,7	155,8
600	5	200	2,6	138,1

Fuente: Elaboración propia.

La fracción gaseosa en el proceso de pirólisis, no se evidencia en la tabla 10 debido a que no es posible realizar su medición en masa a causa de la falta de disponibilidad de los instrumentos apropiados para registrar este valor, a pesar de ello, esta magnitud puede ser estimada a partir la diferencia entre los rendimientos obtenidos por los productos finales de la pirólisis.

Así mismo, en la tabla puede observarse el cambio de las fracciones obtenidas en gramos de carbonilla en contraste con la corrida y su respectiva replica, efecto que puede ser justificado debido a la granulometría trabajada, puesto que se cortaron los tallos en proporciones similares procurando que estos cortes presentaran tamaños aproximados de 4 cm y la transferencia de calor al interior del material pudo verse afectado por dicha variación; por otro lado, cabe aclarar que los ensayos fueron desarrollados en días diferentes y esto pudo ocasionar cambios en el material, ya que las propiedades químicas y físicas de las muestras pudieron ser alteradas debido a la disposición de las muestras de biomasa en el laboratorio y verse afectados los resultados de carbonilla en relación con el cambio climático presente del mes de abril y la falla en la conservación de la muestra, ya que esta biomasa se dispuso en lonas y según la *Guía general para el muestreo foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite*⁸², cada muestra debe ser envuelta en papel o plástico colocándose en embalajes limpios y fuertes, donde cada empaque debe ser sellado herméticamente para conservarse seco y prever de tal manera la condensación de humedad en el interior de cada muestra.

⁸² MUNEVAR MARTINEZ, Fernando. FRANCO BAUTISTA, Pedro Nel. Guía general para el muestro foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite. Centro de investigación en palma de aceite CENIPALMA. Boletín técnico No. 12, ISBN: 96153-1-7. 1998.

Tabla 11. Tiempo meteorológico abril de 2018

Condición	Corridas	Replicas
550°/4h	MI. 11-04-18 Temp.real 17°	JU. 19-04-18 Temp.real 18°
600°/4h	JU. 12-04-18 Temp.real 17°	VI. 20-04-18 Temp.real 17°
550°/5h	LU. 16-04-18 Temp.real 17°	MA. 20-04-18 Temp.real 20°
600°/5h	MI. 18-04-18 Temp.real 17°	MI. 20-04-18 Temp.real 20°

Fuente: AccuWeather[en línea],6 de julio de 2018.Disponible en Internet:
<https://www.accuweather.com/es/co/colombia-weather>

La imagen 12 y 13 presenta las fracciones finales de biocarbón en las cuatro corridas pirolíticas con sus respectivas réplicas, a las cuales se les determinó el porcentaje en peso de rendimiento con el fin de determinar en qué condiciones se obtiene en mayor proporción.

Imagen 13. Carbones obtenidos de las cuatro corridas pirolíticas



Fuente: Elaboración propia

Imagen 14. Carbones obtenidos de las cuatro réplicas pirolíticas.



Fuente: Elaboración propia

3.6 RENDIMIENTO DE LA CARBONILLA EN EL PROCESO DE PIROLISIS LENTA.

El rendimiento de los productos de pirólisis se calcula mediante la siguiente ecuación propuesta por M. Albuja,⁸³ ecuación que relaciona la biomasa ingresada al reactor y la cantidad de masa obtenida posteriormente a la pirólisis:

⁸³ MORA, M. ALBUJA, M. PROAÑA, O. Evaluación de la pirólisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch. Revista EPN, Vol. 33 No. 2. 2014.

Ecuación 8. Determinación del porcentaje de rendimiento

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{masa del carbón obtenido en la salida}(g)}{\text{masa total de materia prima ingresado}(g)} * 100$$

En la tabla 12 se registran los promedios porcentuales de rendimiento de las fracciones finales generadas a partir de la combinación de cada uno de los niveles y factores establecidos en el diseño experimental, además de presentarse los rendimientos obtenidos en el pre-experimento con el fin de evaluar la transición de cada uno de estos productos a medida que aumenta la temperatura.

Tabla 12. Rendimiento de las fracciones de pirólisis.

Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Rendimiento carbonilla (%)	Rendimiento Aceite pirolítico (%)	Rendimiento Agua (%)	Rendimiento Gases no condensables (%)
Pre-experimento					
500	4	18,46	0,82	6,00	50,68
Promedio					
550	4	35,86	0,86	8,16	55,16
600	4	33,50	0,89	5,49	60,12
550	5	34,06	0,69	4,40	52,45
600	5	30,02	0,70	7,29	61,99

Fuente: Elaboración propia

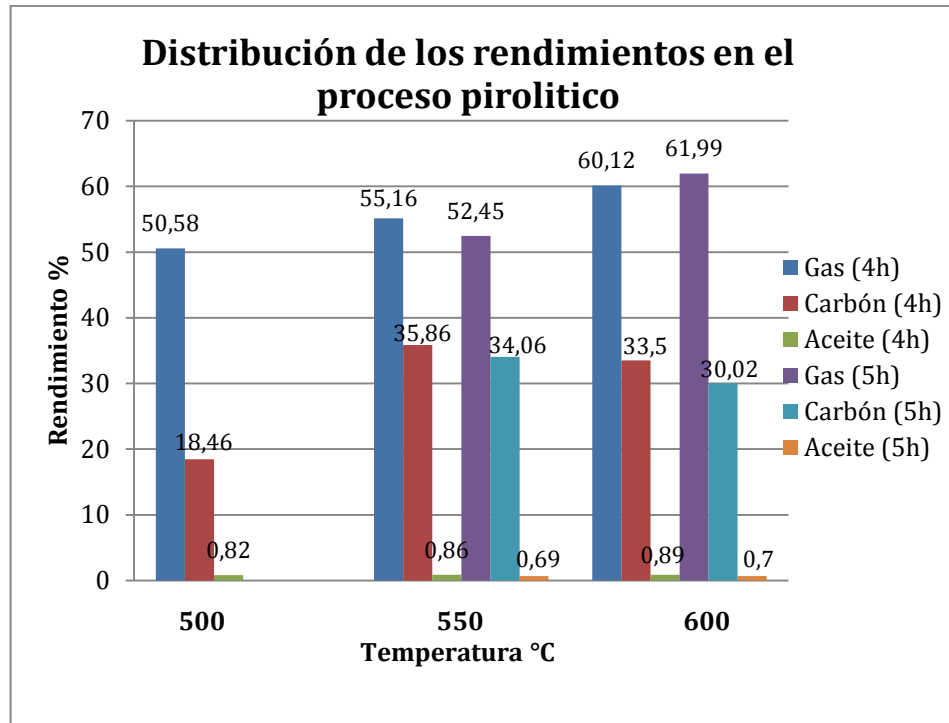
Los resultados obtenidos en la tabla 12 muestran un descenso en el rendimiento de biocarbón cuando se aumenta la temperatura del proceso de pirólisis, lo que genera un aumento en la fracción gaseosa del proceso y determina que la temperatura es un factor que afecta el rendimiento y por tanto la magnitud de los productos obtenidos.

Adicional a esto la variabilidad presentada en los rendimientos pirolíticos fueron producto del tamaño de partícula con el cual fue ingresada la biomasa al reactor, ya que al aumentar ligeramente la granulometría aumenta la fracción gaseosa, este resultado puede explicarse por las limitaciones de transferencia de calor y masa que surgen cuando las partículas de biomasa aumentan de tamaño. Partículas de mayor tamaño tendrán una menor velocidad de transferencia de calor y por lo tanto se calentarán más lentamente; esto brinda las condiciones para que las partículas de biomasa se descompongan no solo en sus productos primarios (gas y bioaceite), sino que ofrece la posibilidad de que el bioaceite

reacción hacia el gas y carbón⁸⁴. Así mismo, las diferencias en el modo de contacto entre los diversos tipos de reactores generan cambios en las velocidades de transferencia y por ende en los productos finales.

Es bien conocido que las diferencias de modo de contacto en los reactores generan diferencias significativas en las velocidades de transferencia.

Gráfica 5. Rendimiento de carbonilla en cuatro horas.



Fuente: Elaboración propia

A partir del gráfico anterior, se observa mayor rendimiento de carbonilla a una temperatura de 550°C con un tiempo de residencia de 4 horas correspondiente a un 35,86% de biocarbón, lo cual indica que a este nivel de temperatura y tiempo trabajado es posible obtener el mayor rendimiento en el producto sólido de la pirólisis lenta de hojas de palma de aceite, siendo este el porcentaje máximo que se esperaría obtener de carbonilla en un proceso de pirólisis lenta conforme a la literatura, es decir que es conveniente mantener estos límites como valores máximos para conseguir dicho objetivo.

⁸⁴ HOYOS, L.J. Efecto del tamaño de partícula y de la temperatura de secado en la pirólisis a velocidad media de aserrín. Bucaramanga, Colombia. Instituto Colombiano del Petróleo, 2009.

Además puede determinarse que un incremento de la temperatura acelera la descomposición térmica del biocarbón, resultados que acorde con la bibliografía consultada son coherentes con Urien Pinedo Andrea⁸⁵ donde afirma que el rendimiento en peso del biocarbón depende de las condiciones de operación del proceso como la temperatura final, donde el rendimiento del carbonizado disminuye rápidamente con el aumento de este parámetro favoreciendo la formación de gases como se evidencia en el gráfico. Así mismo, puede evidenciarse que la biomasa implementada puede no ser beneficiosa para la obtención de aceite pirolítico, puesto que la fracción aumenta con la temperatura, pero no en mayor proporción.

Dado que para este estudio fue implementado un diseño factorial con solo dos factores y dos niveles, los resultados arrojados en la distribución de los rendimientos son coherentes a los que aparecen en la literatura referidos a procesos de pirolisis de biomasa. A pesar de que no fueron estudiados otros rangos de temperatura para la pirolisis lenta de hojas de palma de aceite, se podría considerar los resultados obtenidos del estudio de la pirolisis de madera de pino realizado por J.J.M Orfão⁸⁶, en el que se estudió un amplio rango de temperatura de 400 a 900°C con lo cual se pudo evidenciar el efecto que se presenta al aumentar la temperatura en el reactor, generando un incremento en el rendimiento de las fracciones gaseosas y una disminución progresiva de las fracciones solidas; donde se concluye que a temperaturas mayores de 600°C se estabilizan los rendimientos del proceso pirolitico y a medida que el proceso continúe las fracciones de gas tenderán a aumentar debido al craqueo de los compuestos presentes en los líquidos y la volatilización de los compuestos presentes en la carbonilla, generando con ello una tendencia creciente para el producto gaseoso y una tendencia decreciente para el producto líquido y sólido.

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MINITAB® 18

Los resultados arrojados por el diseño de experimentos son ingresados a la herramienta estadística Minitab ®18, la cual permite realizar un análisis de varianza *ANOVA* que evalúa la importancia de los factores al comparar las medias resultantes de la variable dependiente, permitiendo determinar si existen diferencias significativas o por el contrario no proporciona ningún efecto.

⁸⁵ URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

⁸⁶ Orfao, J., Antunes, F., Figueiredo, J. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model. Laboratory of Catalysis and Materials, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal. 1999

3.7.1 Análisis para un nivel de significancia de 0,05. El ANOVA a ejecutarse tiene como variable respuesta el porcentaje en peso del rendimiento del producto sólido, y dos factores, temperatura y tiempo de residencia con dos niveles cada uno. A partir del uso de esta herramienta se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 13. Análisis ANOVA para $\alpha = 0,05$.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	35,964	11,988	1,68	0,308
Lineal	2	34,536	17,268	2,42	0,205
Temperatura	1	20,544	20,544	2,87	0,165
Tiempo	1	13,992	13,992	1,96	0,234
Interacciones de 2 términos	1	1,428	1,428	0,20	0,678
Temperatura*Tiempo	1	1,428	1,428	0,20	0,678
Error	4	28,600	7,150		
Total	7	64,564			

Fuente: Minitab ® 18.

Con el fin de poner a prueba las hipótesis planteadas para ser aceptadas o rechazadas, se realiza un contraste de los valores F calculados en el ANOVA con respecto al valor F obtenido mediante las tablas de distribución (Ver Anexo F) también conocido como valor crítico para F. Mediante la evaluación de los valores obtenidos se determina si la hipótesis nula debe ser aceptada, lo cual ocurre cuando $F_{Crítico} > F_{Calculado}$.⁸⁷

Los valores tomados del ANOVA para encontrar el valor F crítico en las tablas de distribución, son los siguientes:

- $\alpha = 0,05$.
- $\nu_1 = 1$ (g.l. tiempo, temperatura e interacción).
- $\nu_2 = 4$ (g.l. error).

Tabla 14. Valor crítico para F (0,05).

Fuente	Valor crítico para F
Temperatura	7,71
Tiempo	7,71
Interacción	7,71

Fuente: Minitab ® 18.

⁸⁷ OTERO VICÉNS, José; HERRARTE SÁNCHEZ, Ainhoa; MEDINA MORAL, Eva. Análisis de la varianza (ANOVA). Disponible en: <https://uam.es/departamentos/economicas/econapli/anova.pdf>. 2005.

Con respecto a los valores calculados por el ANOVA, puede evidenciarse que tanto la temperatura, el tiempo de residencia y su interacción presentan un menor valor F comparado al valor F crítico obtenido en tablas, lo que sugiere aceptar las hipótesis nulas, señalando que no existen efectos diferenciales entre los grupos, es decir, que las variables no presentan dependencia entre sí.

Por otro lado, el valor P permite determinar si las diferencias entre alguna de las medias son estadísticamente significativas, para ello se comparan los valores de P arrojados por el ANOVA correspondientes a la temperatura, tiempo de residencia y la interacción de los dos factores, con respecto al nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula.

Tabla 15. Interpretación del valor P (0,05).

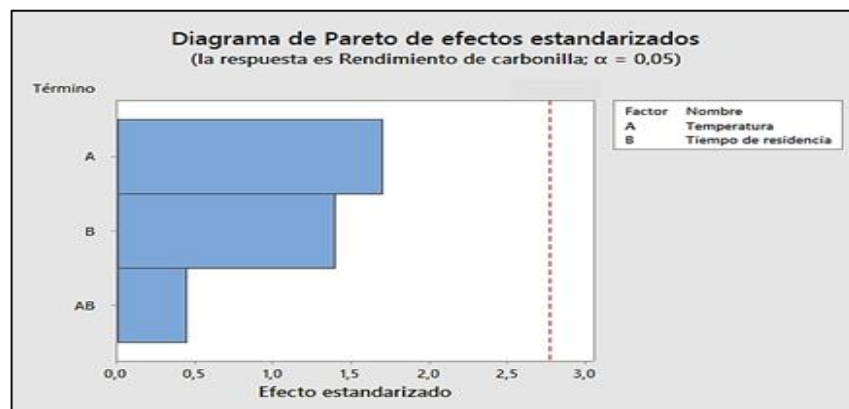
Nivel de confianza α	Fuente	Valor P
0,05	Temperatura	0,165
	Tiempo	0,234
	Interacción	0,678

Fuente: Minitab ® 18.

Si el valor P es mayor al valor de significancia, se confirma la aceptación de la hipótesis nula, por lo que las medias de la población son todas iguales.

La información suministrada es corroborada mediante el empleo del diagrama de Pareto obtenido por Minitab ® 18 (Gráfica 6), el cual ordena las causas de mayor efecto de manera decreciente, donde puede distinguirse el avance horizontal de cada factor de manera individual, así como su interacción. El impacto que presenta cada factor se ve reflejado cuando éste sobrepasa la línea vertical, que determina la variable que posee mayor influencia en el rendimiento del producto sólido.

Gráfica 6. Diagrama de Pareto para $\alpha = 0,05$.



Fuente: Minitab ® 18.

Según lo mencionado anteriormente, el diagrama indica que los factores no manifiestan efecto de manera individual, ni de forma grupal; lo que confirma la inexistencia de efectos significativos en el experimento.

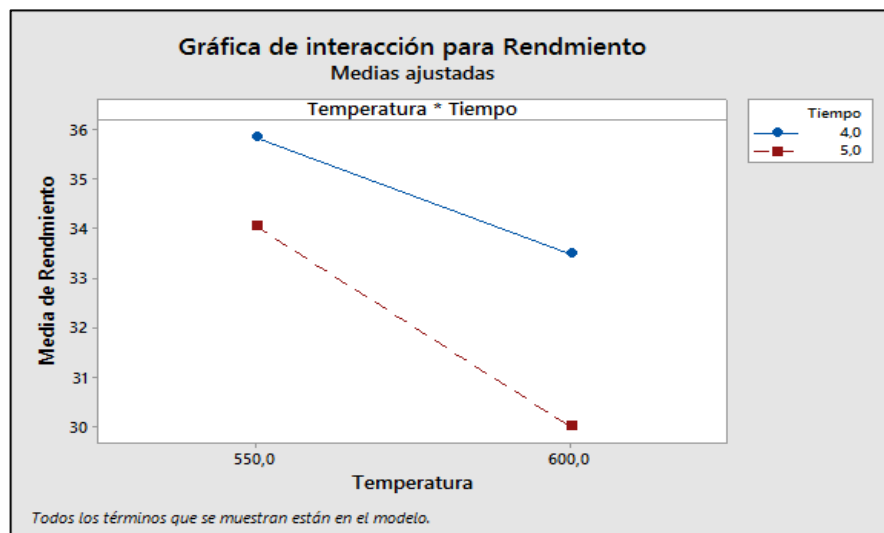
Además, se presenta la tabla 15 que refleja la interacción de los parámetros confirmando una vez más la falta de relación entre los factores propuestos, esta es realizada mediante el análisis individual del nivel bajo y el nivel alto que posee cada factor; donde el promedio del rendimiento de la corrida con su réplica es ubicado en la gráfica 7, en la que se evidencia la interacción mediante la posición de las rectas, ya sea de manera paralela o cruzada.

Tabla 16. Efecto de interacción.

Combinación de tratamientos	Factor A	Factor B	Factor AB	Variable respuesta		
				Replica 1	Replica 2	Promedio
1	-	-	+	36,22	35,50	35,86
a	+	-	-	33,28	33,72	33,50
b	-	+	-	36,96	31,16	34,06
ab	+	+	+	32,40	27,62	30,01

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7. Interacción de factores para $\alpha = 0,05$.



Fuente: Minitab © 18.

Como puede observarse las rectas se sitúan de manera paralela indicando que cada factor actúa de forma independiente, donde el cambio en el nivel de un factor no afecta la respuesta del otro factor. Sin embargo, puede establecerse que el

mayor rendimiento del biocarbón se obtiene en los niveles bajos de temperatura y tiempo de residencia, siendo estos 550°C y 4 horas.

3.7.2 Análisis para un nivel de significancia de 0,25. Conforme a las investigaciones previas consultadas, se ha determinado que los diferentes tipos de biomasa al ser priorizados bajo los parámetros de una pirólisis lenta, han presentado cambios en el rendimiento de sus fracciones a partir de la modificación de variables operativas como lo son la temperatura final y tiempo de residencia como ha sido evidenciado por la autora Penedo Medina Margarita⁸⁸, que planteó un diseño experimental 2⁴ donde estableció cuatro factores: temperatura final, velocidad de calentamiento, densidad aparente del sólido y tiempo final; las variables respuesta del experimento fueron el rendimiento de los productos: líquido, sólido y gas de pirólisis; con lo cual pudo concluir que la temperatura es una variable determinante en el rendimiento de los tres productos de la pirólisis, donde a una temperatura de 440,81°C se obtuvo un máximo rendimiento del aceite pirolítico en un 61,27% y un 27,5% para el carbón vegetal.

Así mismo, Jonny Jair Pantoja⁸⁹ establece que a temperaturas altas se ve afectado el rendimiento del biochar, así como también se produce una mayor estructura porosa favoreciendo la formación de superficies activas, lo que contribuye a una mayor capacidad de adsorción. La obtención de carbón se ve influenciada por una gran cantidad de variables, siendo la temperatura aquella que ejerció una influencia significativa en el rendimiento del producto.

Según lo anteriormente descrito se elige un valor de significancia del $\alpha = 0,25$, debido a que el experimento que se está desarrollando es susceptible a errores experimentales y este no cuenta con antecedentes que lo sustenten. Además, la intención de formular la hipótesis nula es poderla rechazar para comprobar los efectos de la hipótesis alterna, y así de este modo coincidir con la teoría propuesta por los diferentes autores.

⁸⁸ PENEDO MEDINA, Margarita. SÁNCHEZ DEL CAMPO LAFITA, Ana. FALCÓN HERNÁNDEZ, José. Pirolisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. Parte 1: influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos. Cuba. Universidad de Oriente. Revista Tecnología Química. Vol. 28 No. 2. ISSN: 0041-8420. 2008.

⁸⁹ PANTOJA DÍAZ, Jonny Jair. Participación en el diseño de un horno de pirolisis piloto de residuos agroindustriales con funcionamiento por etapas para producir biochar en el área de investigación y desarrollo I&D de la empresa Innovactiva Ingeniería S.A.S. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2015.

Tabla 17. Análisis ANOVA para $\alpha = 0,25$.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	35,964	11,988	1,68	0,308
Lineal	2	34,536	17,268	2,42	0,205
Temperatura	1	20,544	20,544	2,87	0,165
Tiempo	1	13,992	13,992	1,96	0,234
Interacciones de 2 términos	1	1,428	1,428	0,20	0,678
Temperatura*Tiempo	1	1,428	1,428	0,20	0,678
Error	4	28,600	7,150		
Total	7	64,564			

Fuente: Minitab ® 18.

Para esta situación, se evalúa nuevamente el valor F calculado por el ANOVA con respecto al valor F crítico hallado en tablas, donde si el $F_{Crítico} < F_{Calculado}$ se acepta la hipótesis nula, que asume que las medias de la población son iguales.

Para hallar el valor F crítico en las tablas de distribución, se usa la tabla de $\alpha = 0,25$ (Ver anexo F) usando los siguientes parámetros:

- $\alpha = 0,25$.
- $\nu_1 = 1$ (g.l. tiempo, temperatura e interacción).
- $\nu_2 = 4$ (g.l. error).

Tabla 18. Valor crítico para F ($\alpha=0,25$).

Fuente	Valor crítico para F
Temperatura	1,81
Tiempo	1,81
Interacción	1,81

Fuente: Elaboración propia

A partir del valor F crítico hallado, se determina que tanto la temperatura como el tiempo de residencia presentan un mayor valor con respecto al valor F calculado, por lo que se rechaza la hipótesis nula para estos dos factores, aceptando la hipótesis alterna que evidencia el efecto que cada variable presenta de forma independiente ante la variable respuesta. Para el caso de la interacción, se acepta la hipótesis nula que aclara que no existe influencia de los dos factores al actuar en conjunto debido a un menor valor de F calculado en contraste con el F hallado.

Luego para el valor P, se determina si existe diferencia significativa entre las medias a partir de los siguientes datos:

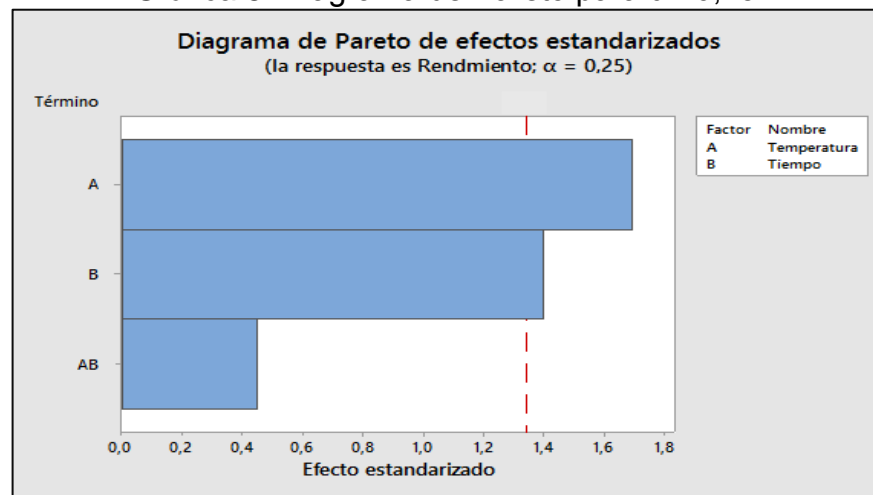
Tabla 19. Interpretación del valor P ($\alpha=0,25$).

Nivel de confianza α	Fuente	Valor P
0,25	Temperatura	0,165
	Tiempo	0,234
	Interacción	0,678

Fuente: Elaboración propia

Como el valor P es menor al valor de significancia elegido, se confirma la aceptación de las hipótesis alternas para las variables temperatura y tiempo de residencia, mientras que para la interacción se sigue aceptando la hipótesis nula.

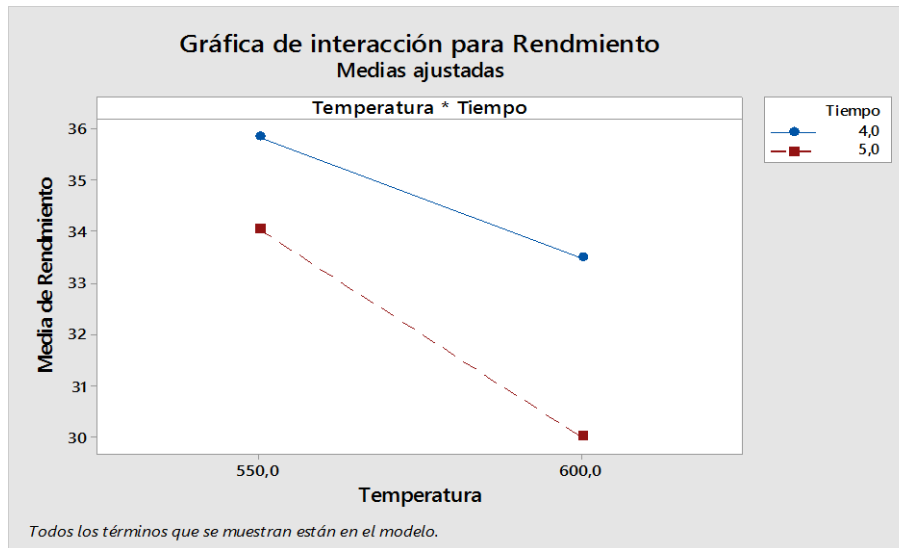
Gráfica 8. Diagrama de Pareto para $\alpha = 0,25$.



Fuente: Minitab ® 18.

El diagrama confirma que los factores temperatura y tiempo de residencia manifiestan efecto de manera individual en orden decreciente, donde la temperatura es aquella variable que presentó un mayor efecto significativo sobresaliendo con mayor longitud la línea vertical, la interacción evidencia la inexistencia de impacto sobre el rendimiento del producto sólido.

Gráfica 9. Interacción de factores *para $\alpha= 0,25$* .



Fuente: Minitab ® 18

La gráfica propuesta hace referencia a la región gráfica en la que se está desarrollando el diseño factorial, donde se muestra el comportamiento de la temperatura y el tiempo de residencia en sus diferentes niveles, por lo que se puede discernir acerca del nivel bajo de temperatura y el nivel bajo de tiempo de residencia, en el que se obtiene como resultado un alto rendimiento de carbonilla.

A partir del diseño factorial 2^2 y del análisis estadístico con Minitab ®18, se puede concluir que las condiciones a las que se obtiene un mayor rendimiento del carbón es al nivel bajo de temperatura y nivel bajo del tiempo de residencia correspondientes a 550°C y 4 horas. Con base a los resultados podría generarse ciertas hipótesis con respecto a las características superficiales que pueden presentar los biocarbones en función de los rendimientos alcanzados por el proceso. Es decir, que podría pensarse que a un mayor rendimiento del carbón habrá una mayor capacidad de adsorción, lo que hace referencia a un mayor diámetro de poro y alta área superficial en la matriz carbonada.

Proposición que será analizada y tendrá respuesta mediante el estudio del área superficial que presentan los carbones activados al ser sometidos a pruebas de azul de metileno e índice de yodo, lo que permitirá elegir el carbón activado más efectivo frente a los demás carbones, esto con el fin de establecer sus propiedades como el tamaño y distribución de poros que pudo adquirir frente a la activación química.

4. DETERMINAR LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES QUE POSEE LA MATRIZ CARBONADA MEDIANTE TÉCNICAS ANALÍTICAS.

4.1 ACTIVACIÓN QUÍMICA PARA EL CARBONIZADO DE HOJAS DE PALMA DE ACEITE

La activación química de biocarbones se desarrolla a partir de la impregnación de la biomasa y su posterior carbonización como lo menciona Viviana Guarín, Martínez de Yuso y Miguel Pérez^{90 91 92}, donde emplearon un horno horizontal con gas de arrastre, un reactor horizontal tubular de cuarzo con corriente de gas de N₂ y un horno tubular con corriente de CO₂ respectivamente para la activación de los carbones obtenidos de torta de higuera, cáscara de almendra, cascara de cacao y coco. Por otra parte Gabriela Burgos⁹³ afirma que una activación química debe realizarse principalmente en hornos rotatorios de material refractario para soportar altas temperaturas de activación, cercanas a los 1000°C.

Sin embargo, debido a la disponibilidad del reactor pirolítico usado en Laboratorios Calderón se sigue la metodología de Jhon Prías⁹⁴, quien realizó la activación química luego de obtener el carbonizado de *Guadua Angustifolia* Kunth; esto debido a que también usó un reactor de flujo continuo (*batch*), que por sus características y funcionamiento no cuenta con un sistema de mezclado lo cual hace que el material de partida se mantenga inmóvil, y por tanto no sea posible la distribución homogénea del agente activante con respecto a la biomasa ingresada.

⁹⁰ OSPINA GUARÍN, Viviana M. BUITRAGO SIERRA, Robinson. LÓPEZ LÓPEZ, Diana P. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuera. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Revista Tecno Lógicas, Vol. 17 No. 32, pp. 75-84. ISSN: 0123-7799. 2014.

⁹¹ MARTINEZ DE YUSO ARIZA, Alicia. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. Villanueva de Gállego. Universidad San Jorge. Instituto de investigación del medio ambiente y la sostenibilidad. 2012.

⁹² PÉREZ, Miguel. FLORES, Alien. CASTRO, Giselle. PÁEZ, Serafín. Cabones activados a partir de anamú (*Petiveria alliacea* L.). Sus características como adsorbente. Parte I. Adsorción de CO₂ y NH₃. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 42 No. 1, pp. 17-23. 2011.

⁹³ BURGOS CAPUZANO, Gabriela Elizabeth; JARAMILLO QUIROZ, Jomayra Lorena. Aprovechamiento de los residuos de cacao y coco para la obtención de carbón activado. Cantón Milagro, provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil, 2015.

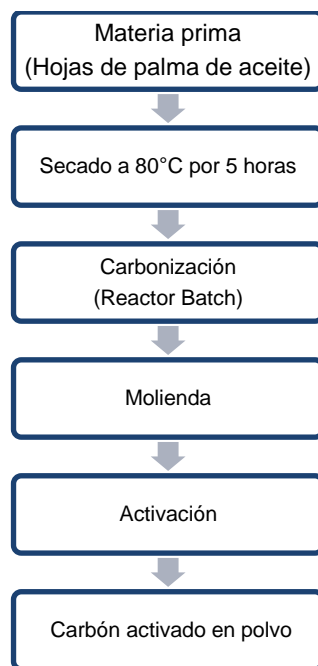
⁹⁴ PRÍAS BARRAGÁN, Jhon Jairo. ROJAS GONZÁLEZ, Carlos Andrés. ECHEVERRY MONTOYA, Narly Andrea. FONTHAL, Gerardo. ARIZA CALDERÓN, Hernando. Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir de precursor *Guadua Angustifolia* Kunth. Revista Acad. Colomb. Cienc. Vol. 35 No. 135. 2011.

4.2 METODOLOGÍA DE ACTIVACIÓN

Las hojas de palma de aceite fueron sometidas a pirolisis dentro de un reactor vertical tipo *batch* en una atmósfera inerte a temperaturas de 550°C y 600°C con tiempos de residencia de 4 y 5 horas. Los biocarbones obtenidos fueron enfriados a temperatura ambiente y luego fueron llevados a un proceso de molienda y tamizado con el fin de homogeneizar su tamaño a 180 µm usando la malla #80.

Posteriormente se procede a la activación química de los biocarbones obtenidos mediante la impregnación con ácido fosfórico H_3PO_4 al 85% en una relación 2:1 activante: carbón, sometiendo la muestra a una temperatura de 110°C durante 15 horas en un horno marca Binder. A continuación, se llevaron las muestras a la mufla para su respectiva activación a una temperatura de 450°C durante 1 hora. Una vez transcurrido el tiempo se procedió al lavado de los carbones activados con agua e hidróxido de sodio (NaOH) usando un embudo büchner de filtración al vacío con el fin de obtener un pH neutro. Finalmente se realiza el secado de las muestras activadas en el horno por un tiempo igual al inicial para luego ser almacenadas.

Diagrama 4. Obtención de carbón activado.



Fuente: Elaboración propia

El proceso de activación permite obtener carbones más desarrollados con un aumento en la superficie interna del material, así como un mayor volumen de

poros y microporos; condición que le permite ampliar su porosidad y de este modo le confiere una alta capacidad adsorbente.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS DE HOJAS DE PALMA DE ACEITE A PARTIR DE PRUEBAS DE ADSORCIÓN

Con el propósito de examinar las características texturales de los carbones activados de hojas de palma de aceite, se llevan a cabo dos pruebas de adsorción con soluciones de yodo y azul de metileno.

4.2.1 Índice de yodo. Se define como los miligramos de yodo adsorbidos por un gramo de carbón activado, donde la capacidad de adsorción del material carbonoso depende de la concentración de la solución, por lo que la normalidad de la solución de yodo debe estar entre 0,1 y 0,001 N. (NORMA NTC 4467). El procedimiento puede implementarse tanto para carbón activado en polvo como para carbón activado granular.

El método se relaciona de manera indirecta con el área superficial del carbón activado, por lo que puede estimarse acerca de la presencia de microporos que componen la matriz carbonada puesto que se pone en contacto con moléculas de diámetro pequeño.^{95 96}

El experimento se llevó a cabo teniendo en cuenta la metodología descrita por la norma NTC 4467, donde se adecua el carbón por medio de la molienda y tamizado por la malla 325 (0.045mm), donde la muestra se pone en contacto con ácido clorhídrico (HCl) al 5% en peso en un erlenmeyer para humedecer el carbón mediante agitación y se lleva a ebullición durante 30 segundos. Posteriormente es agregada una solución de yodo de 50 ml a la mezcla, que luego es filtrado por gravedad.

⁹⁵ SILVA MUÑOZ, Juan Diego. Producción y caracterización de carbón activado a partir de residuos agroindustriales (Fibra de Nopal) para la remoción de arsénico en agua. Zacatecas, México. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas. 2017.

⁹⁶ URIBE, Lina Marcela. LÓPEZ, María Esperanza. GONZÁLEZ, Andrés Giavanni. Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte. Colombia. Revista colombiana de materiales. No. 4, pp. 25-40. 2013.

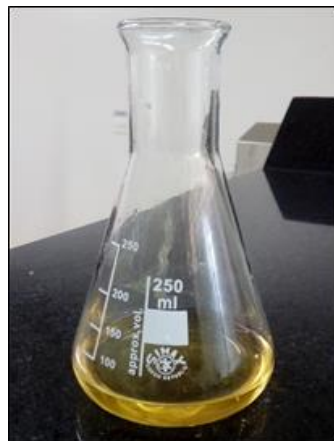
Imagen 15. Filtrado residual de la solución de yodo.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se tomó una alícuota de 25 ml del filtrado para ser titular con tiosulfato de sodio 0.1 normal hasta adquirir una tonalidad amarillo pálido como se observa en la siguiente imagen.

Imagen 16. Titulación del filtrado residual.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente es adicionado 1 ml de almidón a la solución titulada, la cual tomará una tonalidad azul con la que se continuará titulando hasta la decoloración de la misma; el volumen empleado de tiosulfato es registrado en la tabla 19.

En la siguiente tabla se hace referencia a las ocho matrices carbonadas vegetales activadas que fueron sometidas a la prueba de adsorción de yodo, sin embargo se realiza el promedio de cada corrida con su respectiva replica puesto que fueron producidas a las mismas condiciones de operación. Cada una de ellas estará

rotulada según el material, origen y un numeral que identificara las condiciones de síntesis.

Tabla 20. Volumen de tiosulfato implementado en la titulación.

Muestra	Volumen de tiosulfato (ml)
MACAVEAPAM1-1R	14.60
MACAVEAPAM2-2R	15.05
MACAVEAPAM3-3R	14.45
MACAVEAPAM4-4R	15.45

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del índice de yodo en los carbones activados, se usan las ecuaciones propuestas por la norma:

Ecuación 9. Miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado.

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.4 * B * ml \text{ usados de la solución de tiosulfato})}{gramos \text{ de carbón empleados}}$$

Donde

$$A = N1 * 6346.5$$

$$B = N2 * 126.93$$

Luego:

Ecuación 10. Normalidad residual del filtrado.

$$C = \frac{N2 * ml \text{ de tiosulfato gastados}}{25ml}$$

Dónde:

N1= normalidad de la solución de yodo

N2= normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

Ahora:

Ecuación 11. Cálculo del número de yodo para la muestra de carbón activado.

$$\text{Número de yodo} = \frac{X}{M} * D$$

Dónde:

D= normalidad del filtrado residual (C), corregido.

Tabla 21. Resultados de índice de yodo.

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (horas)	Índice de yodo (mg yodo/g CA)
MACAVEAPAM1-1R	550	4	279.97
MACAVEAPAM2-2R	600	4	258.16
MACAVEAPAM3-3R	550	5	298.25
MACAVEAPAM4-4R	600	5	242.70

Fuente: Elaboración propia

Con base a los resultados obtenidos se evidencia que a medida que aumenta la temperatura se presenta una disminución en el índice de yodo, esto se muestra en las cuatro horas del tiempo de residencia, mientras que el parámetro se ve aún más afectado cuando este tiempo aumenta. Por lo que se evidencia que a la temperatura de 550°C y 5 horas el MACAVEAPAM3-3R presenta el mayor valor de índice de yodo con respecto a los demás carbones. La norma ASTM D-4607 presenta un rango de valores típicos de 500 a 1200 mg de yodo/g de carbón activado para los carbones activados que manifiestan alta microporosidad ASTM D-4607 (American Society for the Testing and Material. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated, International ASTM D4607-94. Segunda edición Pensilvania, USA: Editorial:(C) ASTM International, 2006, por lo que el valor obtenido en la tabla 20 hace alusión a la baja microporosidad que desarrolla el carbón activado de hojas de palma de aceite tras la activación química.

Sin embargo el valor presentado, también hace referencia a los miligramos de yodo que fueron adsorbidos sobre la capa monomolecular del carbón permitiendo alojarse en los poros más pequeños en los cuales se lleva a cabo el proceso de adsorción; por lo que se estima la presencia de estos espacios en el carbón activado haciendo alusión a un área superficial interna de aproximadamente 298.25 m²/g ya que para el área BET un m² corresponde a un miligramo de yodo

adsorbido⁹⁷, así mismo Diana Navarrete, Nadia Quijano, y Cristian Vélez obtuvieron un valor similar de 341,68 mg/g, 288,06 mg/g, y 241,74 mg/g para las cascarras de plátano, cascarilla de arroz y pepa de aguacate respectivamente, donde se concluyó la baja presencia de poros en los carbones y por tanto una baja área superficial.⁹⁸

4.2.2 Índice de azul de metileno. El experimento define la capacidad de adsorción de un carbón activado frente a moléculas de gran tamaño como las del azul de metileno. Está definido como el número de mililitros de una solución estándar decolorada por 0,1 gramos de carbón activado en base seca.

El ensayo se llevó a partir de la metodología descrita por la norma NTC 4467, donde se acondiciona el carbón activado por medio de la molienda y tamizado hasta lograr un tamaño de partícula inferior a 0,1 mm a partir la malla 20. Luego se prepara la solución de azul de metileno de concentración 1.2 g/l, se verifica la solución diluyendo con ácido acético al 0.25% y midiendo el valor de absorbancia el cual debe ser de $0,84 \pm 0,01$ a una longitud de onda de 620 nm. Se pesa 0,1 g de la muestra de carbón activado y se pone en contacto con 25 ml de la solución de azul de metileno preparada dentro de un erlenmeyer con tapón, con el fin de poderse agitar hasta su decoloración como se evidencia en la imagen 16. Cuando ocurra la pérdida de color se agrega 5 ml más de la solución de azul de metileno y se agita nuevamente hasta la decoloración.

Imagen 17. Decoloración de la solución de azul de metileno.



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento será repetido adicionando 5 ml de la solución a la mezcla mientras ocurra la decoloración en cada agitación, hasta que finalmente el carbón

⁹⁷ DE RESEBDE, Eliane C. RAMOS, Paulize H. GUERREIRO, Mário C. SAPAG, Karim. Producción y caracterización de carbones activados a partir de residuos de candeia (*Eremanthus erythropappus*) y su aplicación en la adsorción de compuestos orgánicos. Revista colombiana de química. Vol. 39 No. 1, pp. 111-120. 2010.

⁹⁸ NAVARRETE AGUIRRE, Diana Fernanda. QUIJANO ARTEAGA, Nadia Rosaura. VÉLEZ SANCÁN, Cristian Douglas. Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica del litoral. 2014.

no pueda absorber más colorante y la solución llegue al punto de saturación como se muestra en la siguiente imagen.

Imagen 18. Saturación de la solución.



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento fue realizado para las ocho muestras de carbón activado, donde se mide el volumen total utilizado de la solución de azul de metileno en mililitros, el cual fue agregado al erlenmeyer que contiene 0,1 gramos de carbón hasta donde se presentó la adsorción del colorante. Este resultado fue registrado en la siguiente tabla:

Tabla 22. Índice de azul de metileno para MACAVEAPAM.

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (horas)	Índice de azul de metileno (ml adsorbidos por 0,1g CA)
MACAVEAPAM1-1R	550	4	47.50
MACAVEAPAM2-2R	600	4	41.00
MACAVEAPAM3-3R	550	5	53.50
MACAVEAPAM4-4R	600	5	36.00

Fuente: Elaboración propia

Para los ensayos de decoloración del azul de metileno, se evidencia la capacidad de adsorción que presentan las muestras de carbón activado, siendo MACAVEAPAM3-3R la que demostró una mayor adsorción frente a la solución de azul de metileno con un volumen de 53.50 ml / 0,1 gramos de carbón activado. Mediante este parámetro puede estimarse la presencia de macroporos y mesoporos que compone el carbón activado, así como la afinidad que cada uno

de estos presentan con respecto a las moléculas del azul de metileno (tamaño molecular de aproximadamente 0.84 nm).⁹⁹

A partir de esta evaluación, se evidencia la facilidad de acceso que presentó la molécula de azul de metileno frente a los poros de los carbones activados que probablemente pueden ser de gran tamaño por lo que favorece la difusión de este tipo de moléculas cuando se encuentra en soluciones acuosas;¹⁰⁰ por lo que podría establecerse que los carbones activados de hojas de palma de aceite son idóneos para la adsorción de grandes moléculas.

4.3 ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Es la representación gráfica que describe la manera como interactúa el adsorbato con la superficie del material adsorbente (carbón activado) y la presión o concentración de equilibrio a una determinada temperatura que permanece constante. Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrolladas por Freundlich, por Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller.¹⁰¹

Para la construcción de la isoterma se llevó a cabo pruebas de adsorción con azul de metileno, donde inicialmente se preparó una solución de concentración 1 g/L y de esta se obtuvieron diluciones con diferentes concentraciones conocidas manteniendo el volumen constante, las cuales fueron sometidas a agitación con 0,1 g de carbón activado con el fin de determinar los miligramos de azul de metileno adsorbidos mediante la filtración de la muestra y la determinación del valor de absorbancia arrojado en el espectrofotómetro visible GENESYS™ 20, Thermo Scientific.

Imagen 19. Diluciones de azul de metileno



⁹⁹ GIRALDO, Liliana. GARCÍA, Vanessa. MORENO, Juan Carlos. Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. Bogotá, Colombia. Universidad de Los Andes. Revista de ingeniería, ISSN: 0121-4993. 2008.

¹⁰⁰ VARGAS, Jaime E. GIRALDO, Liliana. MORENO, Juan C. Obtención y caracterización de carbones activados a partir de semillas de Mucuna sp. Revista colombiana de química. Vol. 37 No. 1, pp. 67-77. 2008.

¹⁰¹ MANUAL DE CARBÓN ACTIVADO. Provincia de Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>. Última actualización 12 de febrero de 2018.

Partiendo de los datos experimentales se realiza una curva de calibración mediante un modelo de línea recta que permitirá encontrar la recta que mejor se ajusta a cuatro puntos experimentales, cada uno de ellos definido como concentración de las diluciones (eje x) y la absorbancia de cada muestra (eje y).

Tabla 23. Datos experimentales para la curva de calibración

Concentración de azul de metileno (g/ml)	Absorbancia			
	MACAVEAPAM1-1R	MACAVEAPAM2-2R	MACAVEAPAM3-3R	MACAVEAPAM4-4R
5,003E-05	0,037	0,031	0,028	0,013
1,001E-04	0,043	0,038	0,035	0,020
1,501E-04	0,179	0,063	0,048	0,024
2,001E-04	0,220	0,071	0,059	0,041

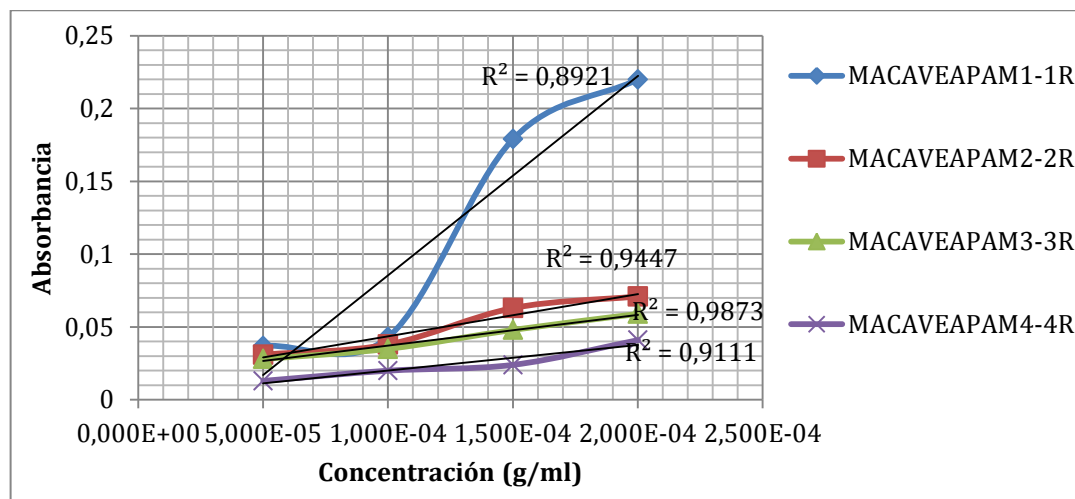
Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de determinación R^2 se interpreta como la proporción o porcentaje de variación que presenta la variable Y con respecto a la variable X, donde el modelo es explicado mediante la ecuación de regresión lineal. El parámetro se encuentra entre los límites $0 < R^2 < 1$, donde el valor igual a la unidad hace referencia a un ajuste lineal perfecto, por lo que habría relación entre X y Y; mientras que para un valor de cero indica la no significancia del modelo lineal, por lo que estas variables no presentan relación alguna¹⁰².

A partir de lo mencionado anteriormente, se evalúa el coeficiente de determinación R^2 para cada curva obtenida a partir de los datos de la tabla 22.

¹⁰² MARTINEZ RODRÍGUEZ, Elena. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escurialense. Vol. 38, pp. 315-332. ISSN: 1133-3677. 2005.

Gráfica 10. Curva de calibración absorbancia vs concentración



Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de determinación lineal para los carbones activados es representativo ya que fue superior a $R^2=0.85$,¹⁰³ lo que indica un buen modelado de los datos experimentales. No obstante, se precisa acerca de la MACAVEAPAM3-3R la cual presenta mayor linealidad y mayor ajuste con respecto a los demás carbones siendo el R^2 más cercano a la unidad con un valor de 0,9873; por lo que a partir de la ecuación de la recta obtenida, se analiza la capacidad de adsorción de esta matriz carbonada mediante las isotermas de Freundlich y Langmuir.

4.3.1 Isoterma de Freundlich. La isoterma de Freundlich es un modelo que describe el fenómeno de adsorción y la interacción entre las moléculas adsorbidas sobre la superficie del material adsorbente, donde se asume que la adsorción del soluto se da en multicapas debido a la heterogeneidad de las energías de sorción¹⁰⁴.

Esta isoterma se expresa mediante una relación tipo exponencial entre la cantidad de soluto adsorbido y la concentración en equilibrio, expresada como¹⁰⁵:

¹⁰³ PRIETO, Judith. PRIETO, Francisco. ROMÁN, Alma D. OTAZO, Elena M. MÉNDEZ, María A. Correlación de modelos matemáticos de adsorción de humedad en cereales para desayuno. Hidalgo, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 2012.

¹⁰⁴ ORÉ JIMÉNEZ, Franklin. LAVADO MEZA, Carmencita. BENDEZÚ MONTES, Salvador. Biosorción de Pb (II) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (Zea mays). Perú. Revista de la sociedad química del Perú. Vol. 81 No. 2. ISSN: 1810-634. 2015.

¹⁰⁵ MANUAL DE CARBÓN ACTIVADO. Provincia de Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>. Última actualización 12 de febrero de 2018.

$$\frac{X}{M} = K C f^{\frac{1}{n}}$$

También expresada como:

$$\frac{\log X}{M} = \log K + \frac{1}{n} * \log C f$$

Dónde:

X/M= cantidad de materia removida por unidad de masa de carbón

X= cantidad de materia removida

Cf=concentración final después del tratamiento con carbón

M= masa de carbón empleada

K= constante de equilibrio

n= constante relacionada con la afinidad entre el adsorbente y el soluto

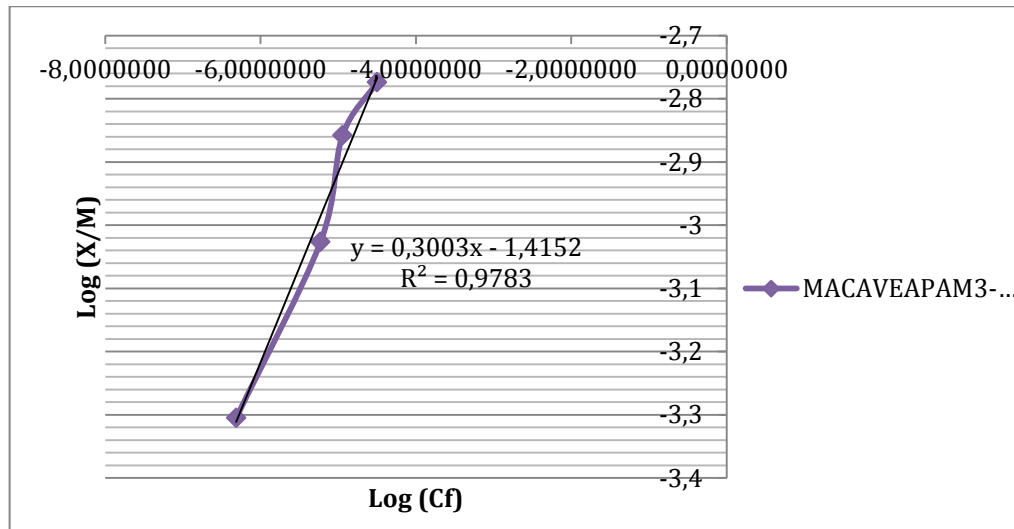
Mediante la ecuación de la recta $y = 211,87x + 0,016$ obtenida en la curva de calibración por MACAVEAPAM3-3R, se determina la cantidad de azul de metileno adsorbida (X), con lo que se obtiene la concentración final de cada dilución restando el valor de la concentración inicial y con ello se consigue la isoterma de Freundlich.

Tabla 24. Parámetros para el modelo de Freundlich

Cantidad Adsorbida (X)	X/M	log (X/M)	Concentración final (Cf)	log (Cf)
0,0000495	0,000495442	-3,305007238	0,00000049	-6,3135366
0,0000941	0,00094134	-3,026253637	0,00000593	-5,2272360
0,0001387	0,001387237	-2,857849206	0,00001137	-4,9443825
0,0001685	0,001684503	-2,77352832	0,00003167	-4,4993555

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 11. Isoterma de adsorción del azul de metileno sobre MACAVEAPAM3



Fuente: Elaboración propia

El valor n es una constante relacionada con la afinidad entre el adsorbente y el soluto, este parámetro es hallado por medio de la ecuación de la recta obtenida en la isoterma de Freundlich, el cual presenta un valor de 3.33 indicando la intensidad de adsorción que posee la estructura carbonosa frente a moléculas de gran tamaño. El valor n está restringido a valores mayores a la unidad puesto que identifica el grado de favorabilidad de la adsorción y hace referencia a un fenómeno de fisiorción entre el adsorbente y el adsorbato,¹⁰⁶ en el cual existen múltiples sitios activos para la adsorción dando lugar a monocapas y multicapas que presentan lugares activos energéticamente heterogéneos.

No obstante, se evidencia un buen ajuste al modelo de la isoterma de Freundlich mediante el valor obtenido por el coeficiente de determinación $R^2 = 0,9783$, con lo que se establece la viabilidad del proceso de adsorción del carbón activado frente al colorante empleado.

4.3.2 Isoterma de Langmuir

El modelo de adsorción describe la relación de moléculas retenidas en la superficie de un determinado material sólido, cuando este se encuentra en contacto con un medio gaseoso a cierta presión o un medio líquido a diferente concentración, juntos a una misma temperatura.

El modelo de adsorción de Langmuir supone que:

¹⁰⁶ RIVERAS, Carlos. NUÑEZ, Oswaldo. GONZÁLEZ, Lucy. LONGORIA RODRÍGUEZ, Francisco Enrique. Isoterma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. Cuba. Universidad de Oriente. Revista Saber, Vol. 26 No. 1, pp. 43-49. ISSN: 1315-0162. 2014.

- a) La superficie es homogénea y solo forma una monocapa.
- b) Una molécula se puede adsorber si encuentra un sitio activo disponible, es decir que existe un límite de adsorción cuando la monocapa está completa.
- c) El calor de adsorción es independiente del grado de recubrimiento por lo que es igual para todos los sitios de adsorción.
- d) La superficie proporciona un cierto número de sitios para la adsorción los cuales son equivalentes entre sí.
- e) La energía de las moléculas adsorbidas es independiente de la presencia de otras moléculas (no interaccionan entre sí).

El modelo de Langmuir propone la siguiente ecuación linealizada para representar la adsorción¹⁰⁷:

Ecuación 12. Ecuación lineal de la isoterma de Langmuir

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_m K_a} + \frac{C_e}{Q_m}$$

C_e= Concentración de adsorbato en el equilibrio (g/ml).

q_e= Capacidad de adsorción del adsorbato por el adsorbente en el equilibrio (g/g*ml).

Q_m= Capacidad máxima de adsorción del adsorbato (gr adsorbato/gr adsorbente).

K_a= Constante relacionada con la energía de adsorción del adsorbato por el adsorbente.

Los parámetros esenciales en la isoterma de Langmuir pueden ser expresados mediante el factor de separación adimensional o también conocido como parámetro de equilibrio R_L, que permite determinar si el proceso de adsorción de azul de metileno sobre MACAVEAPAM3-3R es favorable o no. Este parámetro se calcula a partir de la siguiente ecuación.¹⁰⁸

Ecuación 13. Factor de separación adimensional

$$R_L = \frac{1}{1 + b * C_i}$$

¹⁰⁷ PALOMINO AMORÍN, Carmen Carola. VARGAS PARKER, Rocío. VISITACIÓN FIGUEROA, Lizardo. Aprovechamiento de pelos de vacuno del proceso de pelambre enzimático de la curtiembre en la remoción de plomo. Perú. Revista de la sociedad química del Perú. Vol. 82 No. 2. ISSN: 1810-634. 2016.

¹⁰⁸ DR. PENEDO MEDINA, Margarita. MSC. MANALS CUTIÑO, Enma Michel. MSC. VENDRELL CALZADILLA, Frank. MSC. SALAS TORT, Dolores. Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. Santiago de Cuba, Cuba. Revista Tecnología Química. Vol. 35 No. 1. ISSN: 2224-6185. 2015.

Dónde:

$K_a=b$ = constante de afinidad entre adsorbato y el adsorbente.
 C_i = concentración inicial del azul de metileno en la solución.

Con base al valor obtenido puede determinarse a qué tipo de isoterma corresponde el ajuste realizado mediante el siguiente cuadro.

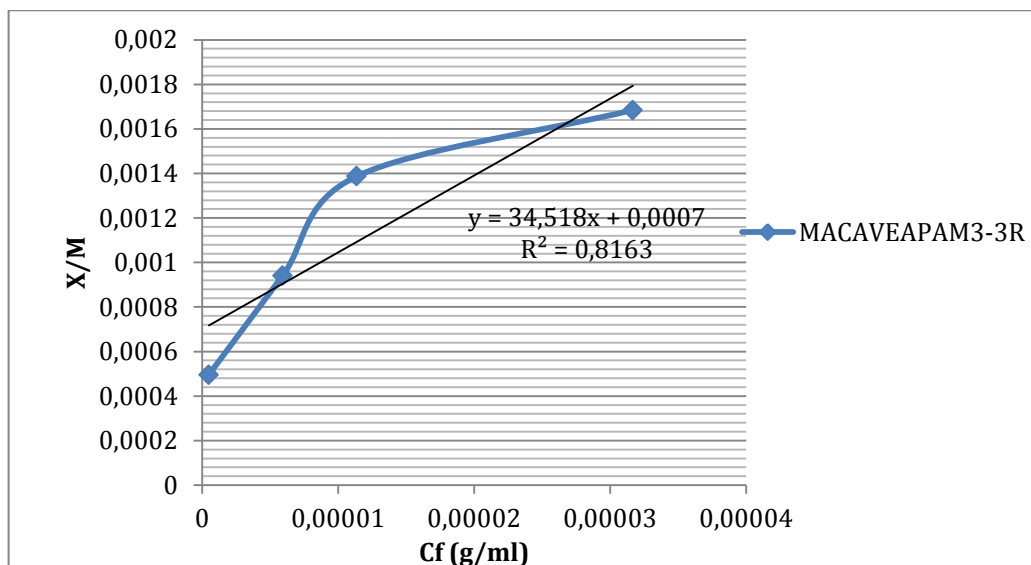
Cuadro 10. Valores de decisión R_L

Valor de R_L	Tipo de isoterma
$R_L > 1$	Desfavorable
$R_L = 1$	Lineal
$0 < R_L < 1$	Favorable
$R_L = 0$	Irreversible

Fuente: RUBINOS GONZÁLEZ, David. Utilización de lodos rojos de Bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos. La Coruña, España. Universidad de Santiago de Compostela. Tomo 1, pp. 568. Última actualización el 14 de mayo de 2018. Visto en: https://books.google.com.co/books?id=Z8XynuC_ySEC&pg=PA568&dq=RI%3E1+tipo+de+isoterma+desfavorable&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjVovLo4rrbAhXSmVkkHdTKATkQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false.

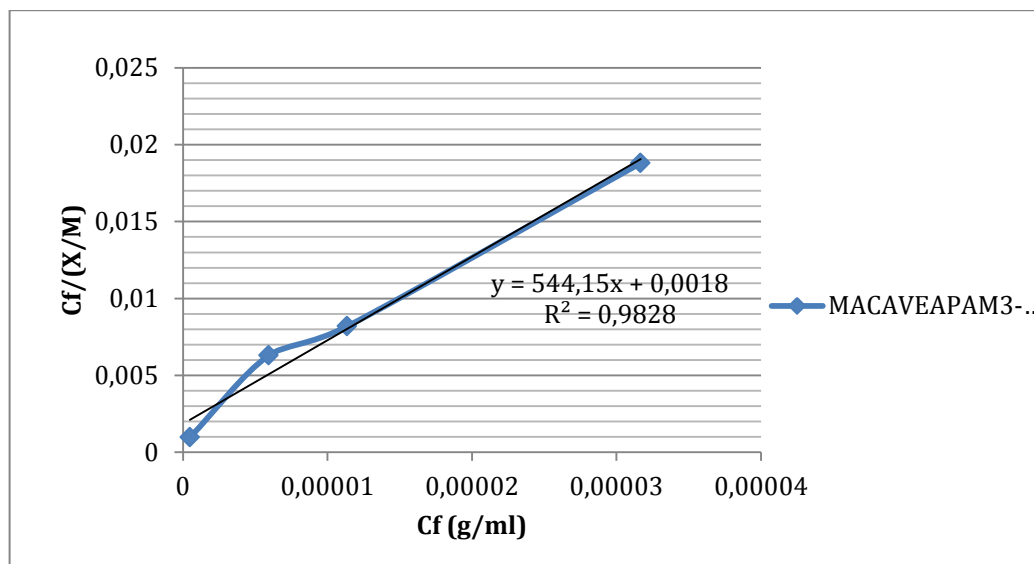
A continuación se presenta las isotermas de Langmuir de forma no linealizada y linealizada con el fin de ajustar los datos experimentales al modelo y de este modo determinar la máxima capacidad de adsorción del azul de metileno sobre la MACAVEAPAM3-3R.

Gráfica 12. Isoterma común del modelo de Langmuir



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13. Isoterma linealizada del modelo de Langmuir



Fuente: Elaboración propia

Conforme al valor obtenido por el coeficiente de determinación $R^2 = 0,9828$, podría inferirse acerca de un mejor ajuste de los datos experimentales con respecto al modelo planteado por Freundlich, aun cuando estos valores son muy cercanos entre sí. Es decir que al aceptarse el modelo propuesto por Langmuir, se asume una adsorción química (quimisorción) donde se presentan reacciones irreversibles mediante enlaces covalentes entre el adsorbato y adsorbente formando una monocapa donde se generan nuevos compuestos.

El comportamiento del carbón activado frente a la solución de azul de metileno es favorable según la trayectoria de la curva y el valor arrojado por el parámetro R_L , además de evidenciarse que a medida que aumenta la concentración del soluto, el MACAVEAPAM3-3R presenta una mayor capacidad de adsorción frente a este colorante orgánico.

Tabla 25. Parámetros para las isotermas de Freundlich y Langmuir

Isoterma de Freundlich		Isoterma de Langmuir		
R^2	n	Qm	R^2	R_L
0.9783	3.3300	1.6845E-3	0.9828	0.1742

Fuente: Elaboración propia

Como se expresó anteriormente, el parámetro n para la isoterma de Freundlich indico el grado de favorabilidad del proceso de adsorción por ser mayor a la unidad, además de presentar una linealidad correspondiente a un $R^2 = 0.9783$. Sin embargo, el modelo de Langmuir manifestó un mejor ajuste con un $R^2 = 0.9828$, donde el valor R_L apunto a una isoterma favorable y el Qm indico el área ocupada por una capa monomolecular de azul de metileno siendo la máxima adsorción sobre el carbón activado. Por otra parte, se puede inferir que MACAVEAPAM3-3R es capaz de retener la concentración del soluto en la superficie puesto que la concentración inicial que corresponde a $1.5009E-04$ g de azul de metileno/ L de solución es menor al valor Qm obtenido.

4.4 Modelo por Brunauer, Emmet y Teller (BET)

El método BET desarrollado por Brunauer, Emmet y Teller se basa en las fuerzas de atracción de Van der Waals como únicas responsables del proceso de adsorción¹⁰⁹, haciendo referencia al fenómeno de fisorción. Sin embargo a lo largo del desarrollo del modelo se ha visto que existe un equilibrio dinámico en cada capa adsorbida, por lo que es asociado al modelo de Langmuir que considera la inexistencia de sitios preferenciales de adsorción, así mismo asume que los calores de adsorción son iguales entre sí por encima de la primera capa, en la cual se generan sitios activos que forman capas sucesivas cuando se aumenta la presión.

Dado que la superficie de MACAVEAPAM3-3R es irregular y porosa, es de interés medir el área superficial que presenta este carbón activado de forma indirecta mediante la isoterma de BET, la cual relaciona la presión y las moléculas de

¹⁰⁹ MARTÍN MARTÍNEZ, José Miguel. Adsorción física de gases y vapores por carbones. España. Universidad de Alicante. Imprenta del Secretariado de la Universidad de Alicante. ISBN: 84-86809-33-9. Última actualización 15 de mayo de 2018. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4291/6/adsorcion_fisica_4.pdf

nitrógeno adsorbidas a temperatura constante, con lo cual es posible conocer el área superficial del sólido, distribución, tamaño y forma del poro.

4.4.1 Análisis por adsorción / desorción de N₂ (Área superficial BET).

Para el análisis de las propiedades texturales del carbón activado (MACAVEAPAM3-3R) se realizaron isotermas de adsorción de N₂ a 77K, obtenidas en el equipo Autosorb-iQ de Quantachrome equipado con el software AsiQwin IQ, luego de realizarse la desgasificación de la muestra a 200°C por 4 horas. El área superficial de la muestra se calculó mediante la ecuación BET¹¹⁰ la cual se presenta a continuación:

Ecuación 14. Ecuación BET.

$$\frac{1}{W \left[\frac{P}{P_0} - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} * \frac{P}{P_0}$$

Donde:

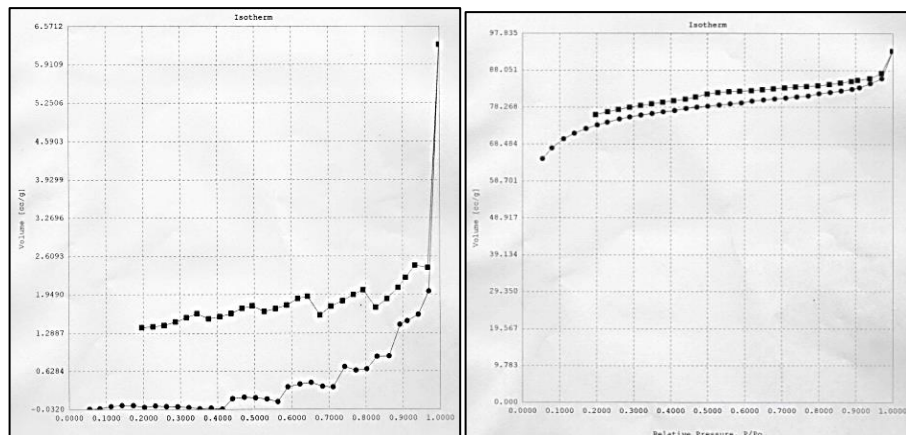
W_M= Volumen correspondiente a la monocapa.

P= Presión de equilibrio de cada punto experimental.

P₀= Presión de saturación del gas a la temperatura de adsorción.

C= Constante que se relaciona con la entalpia de adsorción.

Gráfica 14. Isotherma de BET para la muestra no activada y activada de las hojas de palma de aceite.



a) Carbón de hojas de palma de aceite

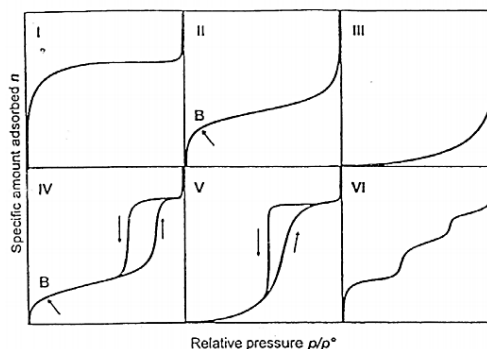
b) Carbón activado de hojas de palma de aceite

En la gráfica 14 a se muestra la isoterma de adsorción de N₂ para el carbón de hojas de palma de aceite obtenido a las condiciones de 550°C y 4 horas, la cual es

¹¹⁰ RINCÓN SILVA, Nelson G. RAMÍREZ GÓMEZ, Wandy M. MOJICA SÁNCHEZ, Lizeth C. BLANCO MARTÍNEZ, Diego A. GIRALDO, Liliana. MORENO PIRAJÁN, Juan C. Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H₃PO₄. Revista Ingeniería y Competitividad. Vol. 16 No. 1, pp. 207-219. 2014.

una muestra no representativa debido a la ausencia de área superficial que se desarrolla cuando se somete a un proceso de activación, por tanto puede evidenciarse que la adsorción del N_2 comienza a un volumen negativo lo cual no es coherente por lo que su área total es de $0\text{m}^2/\text{g}$. La grafica 14b para el carbón activado de hojas de palma de aceite (MACAVEAPAM3-3R) se clasifica según la IUPAC como isoterma tipo IV, la cual se caracteriza por presentar un ciclo de histéresis que es dado debido a que las presiones de saturación no son iguales para la condensación y evaporación en el interior de los poros, es decir que las isotermas de adsorción y desorción no coinciden en su trayectoria.¹¹¹ La parte inicial de la isoterma tipo IV se atribuye a la adsorción en monocapa, puesto que coincide con la primera región de la isoterma tipo II, donde el punto B en la gráfica indica la presión relativa a la cual se ha completado la monocapa y donde inicia la adsorción por multicapa como se muestra en la gráfica 15. La isoterma tipo IV es característica de materiales mesoporosos.

Gráfica 15. Clasificación de las isotermas de adsorción según la IUPAC.



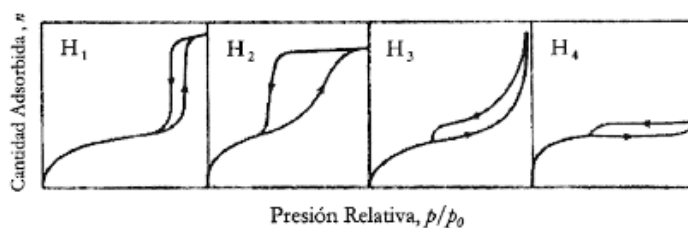
Fuente: LACERDA, Viviane da Silva. Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles y bioproductos. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. 2015.

En general, se aprecia un fenómeno de histéresis poco pronunciado entre la curvatura de adsorción y desorción las cuales son paralelas entre sí a presiones relativas de 0.1 y 0.98 (gráfica 15). La histéresis está relacionada con la geometría de los poros, por lo que dependiendo del tipo de lazo de histéresis observado puede estimarse la forma y tamaño que componen los mesoporos del material carbonoso, la clasificación se realiza según la IUPAC donde se evidencia una histéresis tipo H4 como se observa en la gráfica 16, típica de poros cilíndricos¹¹²¹¹³

¹¹¹ HOSTERT, Leandro. Caracterização de catalisadores $\text{Cu-K}_2\text{O/MxOy-Nb}_2\text{O}_5$ (M=Ce, La e Al): pela técnica de adsorção/dessorção de N_2 . Curitiba, Brasil. Universidad Tecnológica Federal de Paraná. 2013.

¹¹² HERNÁNDEZ, Miguel Ángel. VELASCO, José Antonio. ROJAS, Fernando. LARA, Víctor Hugo. SALGADO, Martha Alicia. TAMARIZ, Víctor. Evaluación de mesoporos y caracterización de arcillas

Gráfica 16. Ciclos de histéresis según la IUPAC.



Fuente: RUBINOS GONZÁLEZ, David. Utilización de lodos rojos de Bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos. La Coruña, España. Universidad de Santiago de Compostela. Tomo 1, pp. 304. Última actualización el 14 de mayo de 2018. Visto en: https://books.google.com.co/books?id=Z8XynuC_ySEC&pg=PA568&dq=RI%3E1+tipo+de+isoterma+desfavorable&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjVovLo4rrbAhXSmVkkKHdTKATkQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false.

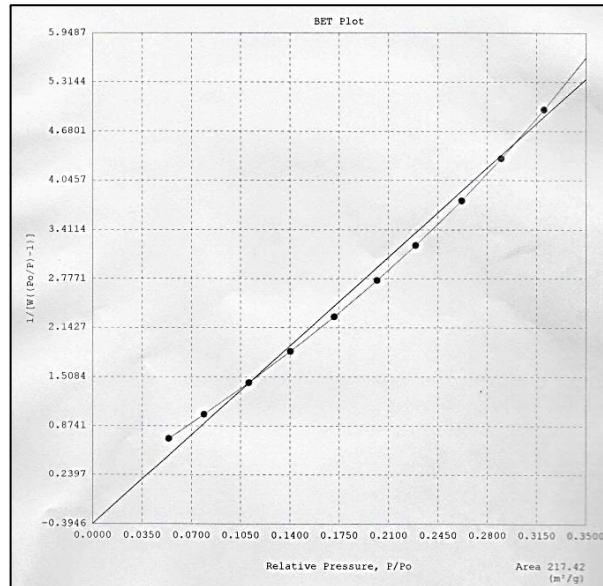
Normalmente el intervalo de presiones relativas en el que se aplica la ecuación BET va desde 0.05 a 0.35 correspondiente a la adsorción de una monocapa, por debajo de esta presión no es aplicable ya que existe heterogeneidad superficial, ni por encima del valor puesto que se evidencia la existencia de fenómenos de condensación capilar¹¹⁴. Por lo que se realiza una linealización de $1/W(P/P_0-1)$ en función de la presión relativa en el intervalo propuesto, con una pendiente igual a $((C-1)/W_m C) * (P/P_0)$ de donde se obtiene el valor W_m y C para el carbón activado, así mismo como el área superficial (Ver Anexo. H).

del estado de puebla, México. Puebla, México. Revista Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 19 No. 4. 2003.

¹¹³ GARCÍA, Julián Camilo. CASTELLANOS, María Paula. USCÁTEGUI, Ángela. FERNÁNDEZ, Jorge. PEDROZA, Aura Marina. DAZA, Carlos Enrique. Remoción de colorantes sintéticos mediante el proceso Fenton heterogéneo usando Fe₂O₃ soportado en carbón activado obtenido a partir de residuos de rosas. Bogotá, Colombia. Revista Universidad Javeriana. Vol. 17 No. 3. 2012.

¹¹⁴ MARTÍN MARTÍNEZ, José Miguel. Adsorción física de gases y vapores por carbones. España. Universidad de Alicante. Imprenta del Secretariado de la Universidad de Alicante. ISBN: 84-86809-33-9. Última actualización 15 de mayo de 2018. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4291/6/adsorcion_fisica_4.pdf.

Gráfica 17. Isoterma de adsorción de N2 a 77 K.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia

Mediante la aplicación de la ecuación de BET en su rango de validez, se ha determinado los parámetros $W_m = 0.064$, $C = -50.742$ y área BET = $217.420 \text{ m}^2/\text{g}$ antes mencionados a partir de la ecuación de la recta $Y = 15.777x - 0.3048$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9965$.

En las condiciones de preparación propuestas para los carbones activados de hojas de palma de aceite, se observa un bajo desarrollo de la microporosidad y por tanto un valor bajo del área superficial por activación química con H_3PO_4 . Este resultado da la posibilidad de pensar que el método de activación implementado no fue el apropiado, ya que es la etapa que condiciona el desarrollo microporoso del carbón haciéndolo un material con mayor capacidad de adsorción, este valor se ve reflejado en la capacidad de adsorción W_m ; por lo que se asume que MACAVEAPAM3-3R presenta una mayor mesoporosidad con respecto a la microporosidad. Realizando un contraste con respecto al carbón activado de hojas de palma de aceite gasificadas, puede evidenciarse que el proceso termoquímico aplicado a esta biomasa es más efectivo puesto que se obtiene una mayor área superficial de $891 \text{ m}^2/\text{g}$ y una capacidad de adsorción de $250 \text{ cm}^3/\text{g}$ ¹¹⁵ frente al proceso pirolítico implementado en el presente trabajo como se evidencia en la siguiente tabla.

¹¹⁵ Mahmood. Ariffin. Harun. Ishak. Ghani. Rahman. Characterisation and potential use of biochar from gasified oil palm wastes. Revista Journal of Engineering Science and Technology. 4ta Conferencia Internacional 2014, Edición Especial. pp. 45-54. 2015.

Tabla 26. Contraste de procesos termoquímicos aplicados a hojas de palma de aceite.

Parámetros de superficie	Hojas pirolizadas	Hojas gasificadas
Área superficial (m ² /g)	217.420	891
Wm Capacidad de adsorción (cm ³ /g)	0.064	250

Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros de superficie pueden ser comparados con el método de adsorción de yodo, el cual estima la presencia de microporos para relacionar el área superficial de un carbón activado; este valor fue de 298,25 mg de yodo/ g de carbón activado el cual corrobora la baja área superficial que presenta MACAVEAPAM3-3R. A través del modelo de Langmuir se determina el coeficiente Qm el cual expresa el volumen requerido de adsorbato para formar una monocapa, el valor obtenido fue de 1.6845E-3 g de adsorbato/g de adsorbente siendo este un valor pequeño y similar al obtenido por el modelo de BET; por tanto los modelos analizados concuerdan en la caracterización del carbón activado utilizado en el presente estudio.

4.5 TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PORO

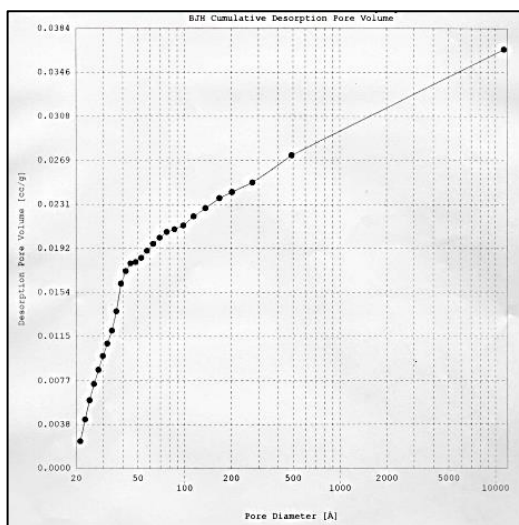
La distribución y tamaño de poro fue calculada a partir de la isoterma de adsorción de N₂ usando el método Barrett-Joyner- Hallenda (BJH), el cual se basa en la ecuación de Kelvin que describe el comportamiento de condensación capilar, el cual hace referencia a la presencia de mesoporos que son identificados a partir de la histéresis presente entre las ramas de adsorción/desorción de la isoterma de BET.¹¹⁶

BJH es el método más empleado para el cálculo de la distribución del tamaño de poros cilíndricos donde asume una adsorción física entre del adsorbato cuando se encuentra en equilibrio con la fase de vapor, por lo que es aplicado para el análisis de sólidos mesoporosos.

El análisis de la distribución del volumen de poros en función del diámetro fue realizado en el rango de 20 Å a 1000 Å, puesto que a partir de la isoterma de BET se percibe la escasez de microporos los cuales podrían estar dispersos dentro de la matriz mesoporosa del carbón activado. Esto es interpretado en la siguiente gráfica.

¹¹⁶ VALLEJOS BURGOS, Fernando. Modelos de cálculo para distribución de tamaños de poros mediante adsorción de gases. Base de datos Universidad de Concepción de Chile. Última actualización 16 de mayo de 2018. Vista en: http://www2.udec.cl/~fevallej/data/files/vallejospburgos_metinv2007.pdf.

Gráfica 18. Desorción acumulada del volumen de poro.



Fuente: Universidad Nacional de Colombia

Según la IUPAC se da la siguiente clasificación de acuerdo al tamaño y diámetro de poros donde, microporos $< 20 \text{ \AA}$ (2nm), mesoporos $20 \text{ \AA} < d < 500 \text{ \AA}$ (2nm $<$ 50nm) y macro poros $> 500 \text{ \AA}$ (50nm). Por lo que a partir de la gráfica anterior se evidencia la presencia de mesoporos en el rango de 2 nm a 23nm con un volumen de poro de $0.0250 \text{ cm}^3/\text{g}$, después de este valor no es posible determinar la presencia de macroporos, por lo que tendría que realizarse un análisis más riguroso por microscopia electrónica de barrido (SEM) que detalla la superficie del sólido.

MACAVEAPAM3-3R evidencia una mayor capacidad de adsorción de yodo y azul de metileno en soluciones acuosas luego de ser activado con H_3PO_4 a 450°C por 15 horas; razón por la cual fue elegido para ser caracterizado mediante pruebas superficiales con el fin de determinar el área superficial, así como también el tamaño y distribución de poros que lo conforman, resultados que fueron soportados mediante el análisis de modelos tales como Freundlich y Langmuir que describen procesos de adsorción identificando la interacción entre el adsorbato y el material adsorbente; con lo que se establece que MACAVEAPAM3-3R es caracterizado como un sólido mesoporoso, lo cual fue contemplado por el método de azul de metileno que estimo la presencia de estos espacios dentro de la matriz carbonada, así mismo el índice de yodo confirmo la escasez de microporos que se presentó en el método BET al obtener un área superficial de $217,42 \text{ m}^2/\text{g}$ y diámetro de poro de 15nm.

5. CONCLUSIONES

- La matriz de selección diseñada mediante el modelo estadístico de Monte Carlo, permitió elegir la alternativa de pirolisis lenta como ruta de aprovechamiento de las hojas de palma de aceite como precursor para la obtención de biocarbón, ya que a las condiciones de temperatura, tiempo de residencia y velocidad de calentamiento establecidas en el proceso, se logra obtener el sólido carbonoso como producto mayoritario teniendo como premisa el alto contenido de carbono que evidencia esta biomasa, lo cual la hace apreciable frente a otras biomásas y valida su uso como fuente de energía para procesos de pirolisis.
- A partir del diseño factorial 2^2 , se estudió el efecto de factores como temperatura y tiempo de residencia frente al rendimiento del producto sólido a un nivel de significancia α de 0.25, donde se estableció que la temperatura y el tiempo de residencia influyen en el proceso de manera individual, donde la temperatura es el factor dominante como se observó en el diagrama de Pareto, ya que al aumentar esta magnitud se acelera la descomposición térmica del biocarbón y se favorece el rendimiento de la fracción gaseosa, por lo que se estableció una temperatura de 550°C y tiempo de residencia de 4 horas como variables de operación para obtener el mayor rendimiento de carbonilla del 35,86%, siendo el valor máximo obtenido por pirolisis lenta.
- Se encontró que MACAVEAPAM3-3R es un material que presenta afinidad por moléculas de pequeño y gran tamaño como las de yodo y azul de metileno, con lo que se hace alusión a la presencia de microporos y mesoporos en el carbón activado. Los datos experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir con un $R^2 = 0.982$ donde se presenta el fenómeno de adsorción en monocapa, el cual fue confirmado mediante la técnica adsorción/desorción de N_2 a partir del método BET, que arrojó un área superficial de 217,420 m^2/g caracterizándolo como un sólido mesoporoso ya que se ajustó a la isoterma tipo IV propuesta por la IUPAC, lo que indica la formación completa de la monocapa siendo el punto de partida para la formación de multicapas que caracterizan un fenómeno de fisiorción. La mayor distribución de poros del MACAVEAPAM3-3R se dio en la zona cóncava de la abscisa del eje x de la isoterma de BET presentando un diámetro de poro de 15nm y un volumen de poro de 0,025 cm^3/g .

6. RECOMENDACIONES

- La baja área superficial presentada por el MACAVEAPAM3-3R hace pensar que el método de activación química desarrollado no fue el adecuado debido a la disponibilidad del tipo de reactor pirolítico, por lo que se recomienda llevar a cabo el método de activación en un sola etapa dentro de un reactor rotatorio ya que a partir de esta metodología se ha observado el desarrollo de microporosidad en carbones activados.
- Estudiar las propiedades superficiales del carbón activado de hojas de palma de aceite a partir de su activación física en dos etapas, ya que el método ha demostrado ser competitivo frente al incremento de áreas superficiales en diferentes tipos de biomasa.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO CORREDOR, Sergio Alberto. Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (*Elaeis Guineensis*) para adsorción de CO₂. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 2014.

AGRO WASTE. Pirolisis. Base de datos studylib. Disponible en: <http://studylib.es/doc/4696675/pir%C3%B3lisis---agrowaste>. Última actualización 15 de septiembre de 2017.

AGUDELO ÁLVAREZ, Branda Lindsay. Estandarización de proceso de producción de carbón actividad por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2017.

AL-KASSIR AL-KARANY, Raúl. Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante. Leiria, Portugal. Escola Superior de Tecnologia e Gestao. 2013.

ALFARO, Marcos. ORTIZ, Elvin. Procesos de producción del aceite de palma 2006. Descripción del proceso de producción de aceite de palma africana. Ministerio de agricultura, Gerencia de Palma. Consejo Nacional de producción, servicio de información de mercados. Disponible en: www.mercanet.cnp.go.cr. 2006.

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, Ana. PIZARRO GARCÍA, Consuelo. FOLGUERAZ DÍAZ, María Belén. Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Gijón, España. Universidad de Oviedo, 2012.

ANCHIQUE CRUZ, Johann Ricardo. Estudio de factibilidad técnica y financiera, de la implementación de una planta gasificadora de generación eléctrica, a base de biomasa residual, en la empresa Palma de Aceite del Meta (PAM). Bogotá, Colombia. Pontifica Universidad Javeriana. 2014.

BARRERA RODRÍGUEZ, Olga Lucía. Modelo de rentabilidad financiera para los modelos de distribución de una empresa panificadora de consumo masivo. Bogotá, Colombia. Pontifica Universidad Javeriana. 2010.

Base de datos BIOREFINERIES AND GREEN CHEMICAL ENGINEERING BLOG. Rendimiento del material biomasa. Disponible en: <https://biorrefineria.blogspot.com.co/2014/03/2014-06bio-oil-1-parte.html>. Última actualización 23 de septiembre de 2017.

Base de datos CONSTRUMÁTICA. Introducción al aprovechamiento energético de la biomasa. Disponible en:

http://www.construmatica.com/construpedia/Introducci%C3%B3n._Aprovechamiento_Energ%C3%A9tico_de_la_Biomasa. Última actualización 6 de octubre de 2017.

Base de datos ENERGIZA. Procesos de conversión de biomasa en energía. Disponible en: <http://www.energiza.org/index.php/biomasa-2/56-procesos-de-conversion-de-biomasa-en-energia>. Última actualización 6 de octubre de 2018.

Base de datos UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y ECOPETROL. Pirolisis rápida de biomasa. Revista indexada, ISBN: 978-958-761-774-0. 2013.

BURGOS CAPUZANO, Gabriela Elizabeth; JARAMILLO QUIROZ, Jomayra Lorena. Aprovechamiento de los residuos de cacao y coco para la obtención de carbón activado. Cantón Milagro, provincia del Guayas. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil, 2015.

BUSTAMANTE GARCÍA, Verónica. CARRILLO PARRA, Artemio. PRIETO RUÍZ, José Ángel. CORRAL RIVAS, José Javier. HERNÁNDEZ DÍAZ, José Ciro. Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. Vol. 7 No. 38, pp. 5-24. ISSN: 2007-1132. 2016.

CALDERON SAENZ, Felipe; CAMELO SALCEDO, Ángela. Pirolisis del raquis del racimo de palma de aceite (efb) para la producción de biochar. Bogotá, Colombia. 2013.

CARRASCO GARCÍA, Juan E. Combustión directa de la biomasa. Escuela de negocios, Escuela de Organización Industrial (EOI). Madrid, España. 2007.

CASTELAR ORTEGA, Grey Cecilia. VILORIA C. Carlos Andrés. MORRINSON B. Carlos Andrés. ANGULO M. Edgardo Ramón. ZAMBRANO A. Alejandra María. Evaluación de un carbón activado comercial en la remoción del colorante DB2. Universidad de Sucre. Revista colombiana de ciencia animal. Vol. 9 No. 2. ISSN: 2027-4297. 2017.

CASTILLO, Edgar F. Potencial del proceso de pirolisis como alternativa para la valorización de los residuos de cosecha en el sector azucarero colombiano. Cenicaña, disponible en: www.tecnicana.com, 2008.

CENTRO DE BIOSISTEMAS. Guía para la toma de muestra foliar. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia. 2010.

CHÁVEZ SIFONTES, Marvin, DOMINE, Marcelo E. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Revista Avances en ciencias e ingeniería. Vol. 4 No. 4, pp. 15-46. ISSN: 0718-8706. 2013.

CORRAL, Yadira. CORRAL, Itzama. FRANCO, Angi. Procedimiento de muestreo. Revista ciencias de la educación. Vol. 26 No. 46, pp. 151-167. ISSN: 316-5917. 2015.

CORREA L, Maria Lorena; VELÁSQUEZ J, Jorge. Optimización de la producción de carbón activado de cáscara de coco mediante steam explosión. Medellín, Colombia.2009.

DE RESEBDE, Eliane C. RAMOS, Paulize H. GUERREIRO, Mário C. SAPAG, Karim. Producción y caracterización de carbones activados a partir de residuos de candeia (*Eremanthus erythropappus*) y su aplicación en la adsorción de compuestos orgánicos. Revista colombiana de química. Vol. 39 No. 1, pp. 111-120. 2010.

DR. PENEDO MEDINA, Margarita. MSC. MANALS CUTIÑO, Enma Michel. MSC. VENDRELL CALZADILLA, Frank. MSC. SALAS TORT, Dolores. Adsorción de níquel y cobalto sobre carbón activado de cascarón de coco. Santiago de Cuba, Cuba. Revista Tecnología Química. Vol. 35 No. 1. ISSN: 2224-6185. 2015.

ESCALANTE HERNÁNDEZ, Humberto; ORDUZ PRADA, Janneth; ZAPATA LESMES, Henry Josué; CARDONA RUIZ, María Cecilia; DUARTE ORTEGA, Martha. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Ministerio de minas y energía. República de Colombia. ISBN: 978-958-8504-59-9. 2010.

FEDEPALMA. La Palma de Aceite en Colombia. Disponible en: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>. Última actualización 16 de mayo de 2018.

FERNÁNDEZ, Jesús. Energía de la biomasa. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pages/publicaciones/publicacion.php?id=98>. Última actualización 14 de agosto de 2017.

FERRÉ, Joan. El diseño factorial completo 2^2 . Grupo de quimiometría y cualimetría. Tarragona. Universidad Rovira i Virgili. 2007.

FILIPPÍN, Ana J. LUNA, Nadia S. POZZI, María T. PÉREZ, Jorge D. Obtención y caracterización de carbón activado a partir de residuos olivícolas y oleícolas por activación física. Revista Avances en ciencias e ingeniería Vol. 8 No. 3, pp. 59-71. ISSN: 0718-8706. 2017.

GARCÉS, Isabel Cristina. CUÉLLAR SÁNCHEZ, Mónica. Productos derivados de la industria de la palma de aceite. Usos. Revista Palmas, Vol. 18 No. 1, ISSN: 0121-2923. 1997.

GARCÍA, Julián Camilo. CASTELLANOS, María Paula. USCÁTEGUI, Ángela. FERNÁNDEZ, Jorge. PEDROZA, Aura Marina. DAZA, Carlos Enrique. Remoción de colorantes sintéticos mediante el proceso Fenton heterogéneo usando Fe_2O_3 soportado en carbón activado obtenido a partir de residuos de rosas. Bogotá, Colombia. Revista Universidad Javeriana. Vol. 17 No. 3. 2012.

GARCIA CORTES, Angela. Estudio termoquímico y cinético de la pirolisis de residuos sólidos urbanos. Alicante, España. Universidad de Alicante, 1993.

GARCÍA PÉREZ, Manuel. Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. Revista Palmas, Vol. 34 No. Especial, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2013.
GIRALDO, Liliana. GARCÍA, Vanessa. MORENO, Juan Carlos. Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. Bogotá, Colombia. Universidad de Los Andes. Revista de ingeniería, ISSN: 0121-4993. 2008.

GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCÓN, Sonia L. WIEST, Wolfgang. Proceso de producción de carbón activado a partir de cáscaras de palma de aceite en un horno rotatorio y su aplicación en la limpieza de NO. Revista Palmas, Vol. 25 No. Especial, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2004.

GUTIÉRREZ, Fernando. SAN MIGUEL, Guillermo. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 2015.

HERNÁNDEZ, Miguel Ángel. VELASCO, José Antonio. ROJAS, Fernando. LARA, Víctor Hugo. SALGADO, Martha Alicia. TAMARIZ, Víctor. Evaluación de mesoporos y caracterización de arcillas del estado de Puebla, México. Puebla, México. Revista Universidad Nacional Autónoma de México. Vol. 19 No. 4. 2003.

HOSTERT, Leandro. Caracterização de catalisadores $Cu-K_2O/MxOy-Nb_2O_5$ (M=Ce, La e Al): pela técnica de adsorção/dessorção de N_2 . Curitiba, Brasil. Universidad Tecnológica Federal de Paraná. 2013.

HOYOS, L.J. Efecto del tamaño de partícula y de la temperatura de secado en la pirolisis a velocidad media de aserrín. Bucaramanga, Colombia. Instituto Colombiano del Petróleo, 2009.

INDUAGRO S.A. Proceso productivo de aceites de palma. Disponible en: <http://www.induagro.com.mx/HOMEAP/ProcProductAP/ProcProductAP.html#sthas h.bjSipfbl.d>. Última actualización 23 de marzo de 2018.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización, 1ed. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33P.

-----Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC6513. 1ed. Bogotá: El instituto, 2008. 38p.

-----Referencias documentales para fuentes de información electronicas,. NTC4490. 1ed. Bogotá: El instituto, 2008. 23p

ISERN HIDALGO, Xavier. La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. Energética. Disponible en: www.energetica21.com. Última actualización 21 de octubre de 2017.

KHEANG, Loh Soh. Second generations biofuels from oil palm biomass. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, pp. 137-148, Tomo II, ISSN: 0121-2923. 2016.

KLUG, Michael. Pirolisis, un proceso para derretir la biomasa. Pontificia Universidad Católica del Perú. Revista de química PUCP. Vol. 26 No. 1. ISSN: 1012-3946. 2012.

LACERDA, Viviane da Silva. Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles y bioproductos. Valladolid, España. Universidad de Valladolid. 2015.

Mahmood. Ariffin. Harun. Ishak. Ghani. Rahman. Characterisation and potential use of biochar from gasified oil palm wastes. Revista Journal of Engineering Science and Technology. 4ta Conferencia Internacional 2014, Edición Especial. pp. 45-54. 2015.

MANALS CUTIÑO, Enma. PENEDO MEDINA, Margarita. GIRALT ORTEGA, Giselle. BELTRÁN GUILARTE, Yayné. SÁNCHEZ DEL CAMPO, Ana Estela. Cromatogramas Gram-Schmidt del ácido piroleñoso obtenidos en la pirolisis de diferentes biomásas vegetales. Cuba. Universidad de Oriente. Revista Tecnología Química. Vol. 29 No. 3. ISSN: 0041-8420. 2009.

MANUAL DE CARBÓN ACTIVADO. Provincia de Sevilla, España. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>. Última actualización 12 de febrero de 2018.

MANYÁ CERVELLÓ, Joan Josep. Efecto de las condiciones de operación de la pirolisis lenta (temperatura final y presión) en la estabilidad potencial del biochar obtenido a partir de alpurejo. Zaragoza, España. Universidad de Zaragoza. 2013.

MARTÍN MARTÍNEZ, José Miguel. Adsorción física de gases y vapores por carbones. España. Universidad de Alicante. Imprenta del Secretariado de la Universidad de Alicante. ISBN: 84-86809-33-9. Última actualización 15 de mayo

de 2018. Disponible en:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4291/6/adsorcion_fisica_4.pdf.

MARTINEZ DE YUSO ARIZA, Alicia. Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano. Villanueva de Gállego. Universidad San Jorge. Instituto de investigación del medio ambiente y la sostenibilidad. 2012.

MARTINEZ RODRÍGUEZ, Elena. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario jurídico y económico escorialense. Vol. 38, pp. 315-332. ISSN: 1133-3677. 2005.

MESA UPEGUI, Maria Paula. ORTÍZ RODRIGUEZ, Carol Ivonne. Evaluación del proceso de pirolisis para la producción de diésel a nivel laboratorio a partir de residuos plásticos de industrias de alimentos. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América. 2016.

MÍGUEZ TABARÉZ, José Luis. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirolisis). Disponible en:
<https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMLCOS+PARA+OBTENCION+DE+BIOMASA.pdf>. Última actualización 28 de octubre de 2017.

MONTOYA ARBELÁEZ, Jorge Iván. Pirólisis rápida de biomasa. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Ecopetrol. Última actualización 24 de marzo de 2018. Visto en:
<https://books.google.com.co/books?id=GHYRAwAAQBAJ&pg=PA30&dq=humedad+en+pirolisis&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiZoYesrrXbAhViw1kKHYIOB7EQ6AEIJjAA#v=onepage&q=humedad%20en%20pirolisis&f=false>

MORA, M. ALBUJA, M. PROAÑA, O. Evaluación de la pirolisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch. Revista EPN, Vol. 33 No. 2. 2014.

MUNEVAR MARTINEZ, Fernando. FRANCO BAUTISTA, Pedro Nel. Guía general para el muestro foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite. Centro de investigación en palma de aceite CENIPALMA. Boletín técnico No. 12, ISBN: 96153-1-7. 1998.

NAVARRETE AGUIRRE, Diana Fernanda. QUIJANO ARTEAGA, Nadia Rosaura. VÉLEZ SANCÁN, Cristian Douglas. Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica del litoral. 2014.

NAVARRO P. VARGAS C. Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde medio cianuro. Revista de metalurgia, Vol. 46 No. 3, ISSN: 0034-8570. 2010.

OBANDO, Gabriel Andrés. Condiciones de diseño de un reactor de pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS). Manizales, Colombia. Universidad de Manizales. 2015.

ORÉ JIMÉNEZ, Franklin. LAVADO MEZA, Carmencita. BENDEZÚ MONTES, Salvador. Biosorción de Pb (II) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (*Zea mays*). Perú. Revista de la sociedad química del Perú. Vol. 81 No. 2. ISSN: 1810-634. 2015.

Orfao, J., Antunes, F., Figueiredo, J. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials- three independent reaction model. Laboratory of Catalysis and Materials, Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal. 1999

ORTIZ VEGA, Rubén Alberto. FERNÁNDEZ HERRERA, Olman. Cultivo de la palma aceitera. San José, Costa Rica. Universidad Estatal a Distancia. 1994.

OSPINA GUARÍN, Viviana M. BUITRAGO SIERRA, Robinson. LÓPEZ LÓPEZ, Diana P. Preparación y caracterización de carbón activado a partir de torta de higuerilla. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Revista Tecnológicas, Vol. 17 No. 32, pp. 75-84. ISSN: 0123-7799. 2014.

OTERO VICÉNS, José; HERRARTE SÁNCHEZ, Ainhoa; MEDINA MORAL, Eva. Análisis de la varianza (ANOVA). Disponible en: <https://uam.es/departamentos/economicas/econapli/anova.pdf>. 2005.

PAIPA RIOS, Nathaly Aseneth; TRIANA GÓMEZ, Max Alejandro. Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C, Volumen 9, pp.18-29, enero-Julio 2018.

PALOMINO AMORÍN, Carmen Carola. VARGAS PARKER, Rocío. VISITACIÓN FIGUEROA, Lizardo. Aprovechamiento de pelos de vacuno del proceso de pelambre enzimático de la curtiembre en la remoción de plomo. Perú. Revista de la sociedad química del Perú. Vol. 82 No. 2. ISSN: 1810-634. 2016.

PANTOJA DÍAZ, Jonny Jair. Participación en el diseño de un horno de pirolisis piloto de residuos agroindustriales con funcionamiento por etapas para producir biochar en el área de investigación y desarrollo I&D de la empresa Innovactiva Ingeniería S.A.S. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño. 2015.

PADRÓN, Rolando. RODRÍGUEZ, Clara. GÓMEZ, Alaín. El carbón activado, un material adsorbente. Vía Blanca Km. 3, Matanzas, Cuba. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2013.

PATIÑO MARTÍNEZ, Pedro Elías. Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual. Revista Innovaciencia facultad cienc. exactas fis. naturales. Vol. 2 No.1, pp. 45-52. 2014.

PENEDO MEDINA, Margarita. SÁNCHEZ DEL CAMPO LAFITA, Ana. FALCÓN HERNÁNDEZ, José. Pirolisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. Parte 1: influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos. Cuba. Universidad de Oriente. Revista Tecnología Química. Vol. 28 No. 2. ISSN: 0041-8420. 2008.

PÉREZ, Miguel. FLORES, Alien. CASTRO, Giselle. PÁEZ, Serafín. Cabones activados a partir de anamú (*Petiveria alliacea* L.). Sus características como adsorbente. Parte I. Adsorción de CO₂ y NH₃. Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 42 No. 1, pp. 17-23. 2011.

PRÍAS BARRAGÁN, Jhon Jairo. ROJAS GONZÁLEZ, Carlos Andrés. ECHEVERRY MONTOYA, Narly Andrea. FONTHAL, Gerardo. ARIZA CALDERÓN, Hernando. Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir de precursor *Guadua Angustifolia* Kunth. Revista Acad. Colomb. Cienc. Vol. 35 No. 135. 2011.

PRIETO, Judith. PRIETO, Francisco. ROMÁN, Alma D. OTAZO, Elena M. MÉNDEZ, María A. Correlación de modelos matemáticos de adsorción de humedad en cereales para desayuno. Hidalgo, México. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 2012.

QUESADA HERRERA, German. Tecnología de palma aceitera, cultivo e industria de la palma, palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_palma.pdf. Última actualización 28 de octubre de 2017.

RINCÓN SILVA, Nelson G. RAMÍREZ GÓMEZ, Wandy M. MOJICA SÁNCHEZ, Lizeth C. BLANCO MARTÍNEZ, Diego A. GIRALDO, Liliana. MORENO PIRAJÁN, Juan C. Obtención de carbones activados a partir de semillas de eucalipto, por activación química con H₃PO₄. Revista Ingeniería y Competitividad. Vol. 16 No. 1, pp. 207-219. 2014.

RIVERAS, Carlos. NUÑEZ, Oswaldo. GONZÁLEZ, Lucy. LONGORIA RODRÍGUEZ, Francisco Enrique. Isotherma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. Cuba.

Universidad de Oriente. Revista Saber, Vol. 26 No. 1, pp. 43-49. ISSN: 1315-0162. 2014.

RUBINOS GONZÁLEZ, David. Utilización de lodos rojos de Bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos. La Coruña, España. Universidad de Santiago de Compostela. Tomo 1, pp. 568. Última actualización el 14 de mayo de 2018. Visto en: https://books.google.com.co/books?id=Z8XynuC_ySEC&pg=PA568&dq=RI%3E1+tipo+de+isoterma+desfavorable&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjVovLo4rrbAhXSmVkJHdTKATkQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false.

SEPÚLVEDA CERVANTES, Cynthia Viridiana. Producción de carbón activado a partir de la cáscara de frijol de soya para la aplicación como adsorbente en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorante verde de malaquita. México. Universidad Autónoma de Nuevo León. 2014.

SERRANO BALLESTEROS, Javier Darío. Evaluación de la responsabilidad social empresarial en la agroindustria, caso de la palma africana de aceite. María la baja, Bolívar. Cartagena de Indias D.T.C; Colombia. 2011.

SILVA MUÑOZ, Juan Diego. Producción y caracterización de carbón activado a partir de residuos agroindustriales (Fibra de Nopal) para la remoción de arsénico en agua. Zacatecas, México. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas. 2017.

SULAIMAN, S. BALAMOHAN, S. MONI, Z. ATNAW S. MOHAMED A. Feasibility study of gasification of palm oil fronds. Revista Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES). Vol. 9, pp. 1744-1757. ISSN: 2289-4659. 2015.

SILVA MUÑOZ, Juan Diego. Producción y caracterización de carbón activado a partir de residuos residuales (fibra de nopal) para la remoción de arsénico en agua. México. Instituto Politécnico Nacional, unidad profesional interdisciplinaria de ingeniería. 2017.

TORRES RAMOS, Ricardo. MONTERO ALPÍREZ, Gisela. BELEÑO CABARCAS, Mary Triny. TOSCANO PALOMAR, Lydia. PÉREZ PELAYO, Laura Janet. Lignina obtenida de residuos agrícolas como biocombustible de tercera generación. Revista Ciencia y tecnología. Vol. 15, pp. 151-164. ISSN:1850-0870. 2015.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA, Biblioteca de ingeniería. Capítulo II, fundamentos teóricos de gasificación de biomasa. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/20250/fichero/Capitulos%252F04++CAPITULO+II+-+Fundamentos+te%C3%B3ricos.pdf>. Última actualización 4 de agosto de 2017.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Unidad 3. Fenómenos de superficie. Adsorción. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf. Última actualización 27 de septiembre de 2017.

URIBE, Lina Marcela. LÓPEZ, María Esperanza. GONZÁLEZ, Andrés Giavanni. Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte. Colombia. Revista colombiana de materiales. No. 4, pp. 25-40. 2013.

URIEN PINEDO, Andrea. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirolisis de biomasa residual. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.

VALLEJOS BURGOS, Fernando. Modelos de cálculo para distribución de tamaños de poros mediante adsorción de gases. Base de datos Universidad de Concepción de Chile. Última actualización 16 de mayo de 2018. Vista en: http://www2.udec.cl/~fevallej/data/files/vallejos-burgos_metinv2007.pdf.

VAN DAM, Jan E. G. Oil palm by-products as biocommodities. XVIII lternation oil palm conference. Cartagena de Indias, Colombia. 2015.

VAN DAM, Jan. Oil palm by-products as biomass commodities. Revista Palmas, Vol. 37 No. Especial, Tomo II, pp. 149-156, ISSN: 0121-2923. 2016.

VARGAS, Jaime E. GIRALDO, Liliana. MORENO, Juan C. Obtención y caracterización de carbones activados a partir de semillas de Mucuna sp. Revista colombiana de química. Vol. 37 No. 1, pp. 67-77. 2008.

ANEXOS

ANEXO A.

PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

Imagen 20. Molino de martillos de la Universidad de América



Imagen 21. Tallos de hoja de palma de aceite de tamaño de 2-4 cm.



Imagen 22. Tallos de hoja de palma de aceite molido.



ANEXO B.

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA.

Imagen 23. Determinación de la humedad.



ANEXO C.

DETERMINACIÓN DE CENIZAS.

Imagen 24. Placa de calentamiento.

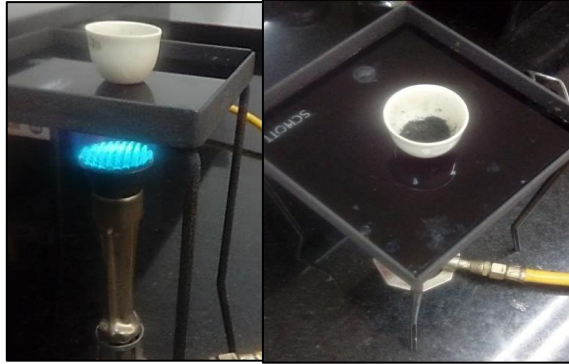


Imagen 25. Crisol con cenizas.



ANEXO D.
DETERMINACIÓN MATERIA VOLÁTIL.

Imagen 26. Crisol con cenizas.



ANEXO E.

ANÁLISIS ELEMENTAL DE LAS HOJAS DE PALMA DE ACEITE

Cuadro 11. Resultados para el análisis elemental de hojas de palma de aceite.

Eager 300 Report					
Method Name : NCHS					
Method File : E:\Análisis Elemental\FEB 14-2018\N C H S system.mth					
Chromatogram : Hojas palma de aceite C					
Operator ID : Company Name : ThermoFinnigan					
Analysed : 25/05/2018 15:32 Printed : 25/05/2018 16:06					
Sample ID : Hojas palma de aceite C (# 86)					
Instrument N. : Flash 2000 EA					
Analysis Type : UnkNown (Area) Sample weight : 1.244					
Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'					
!!! Warning missing one or more peaks.					
Element Name	Ret.Time	Area	BC	Area ratio	K factor

Nitrogen	4.7332	46	119412 FU	22.759940	
Carbon	45.9731	63	2717808 FU	1.000000	
Hydrogen	5.3689	197	1002831 RS	2.710135	
Totals	56.0752		3840051		

Cuadro 12. Resultado duplicado para el análisis elemental de las hojas de palma de aceite.

Eager 300 Report					
Method Name : NCHS					
Method File : E:\Análisis Elemental\FEB 14-2018\N C H S system.mth					
Chromatogram : Hojas palma de aceite B					
Operator ID : Company Name : ThermoFinnigan					
Analysed : 25/05/2018 15:22 Printed : 25/05/2018 16:06					
Sample ID : Hojas palma de aceite B (# 85)					
Instrument N. : Flash 2000 EA					
Analysis Type : UnkNown (Area) Sample weight : 1.228					
Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'					
!!! Warning missing one or more peaks.					
Element Name	Ret.Time	Area	BC	Area ratio	K factor

Nitrogen	4.6552	46	115620 FU	24.024620	
Carbon	47.5582	63	2777722 FU	1.000000	
Hydrogen	5.4530	197	1005362 RS	2.762907	
Totals	57.6663		3898704		

Cuadro 14. Distribución de Fisher para $\alpha = 0.25$

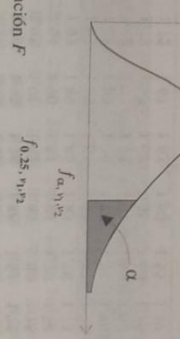


Tabla V Puntos porcentuales f_{α, v_1, v_2} de la distribución F

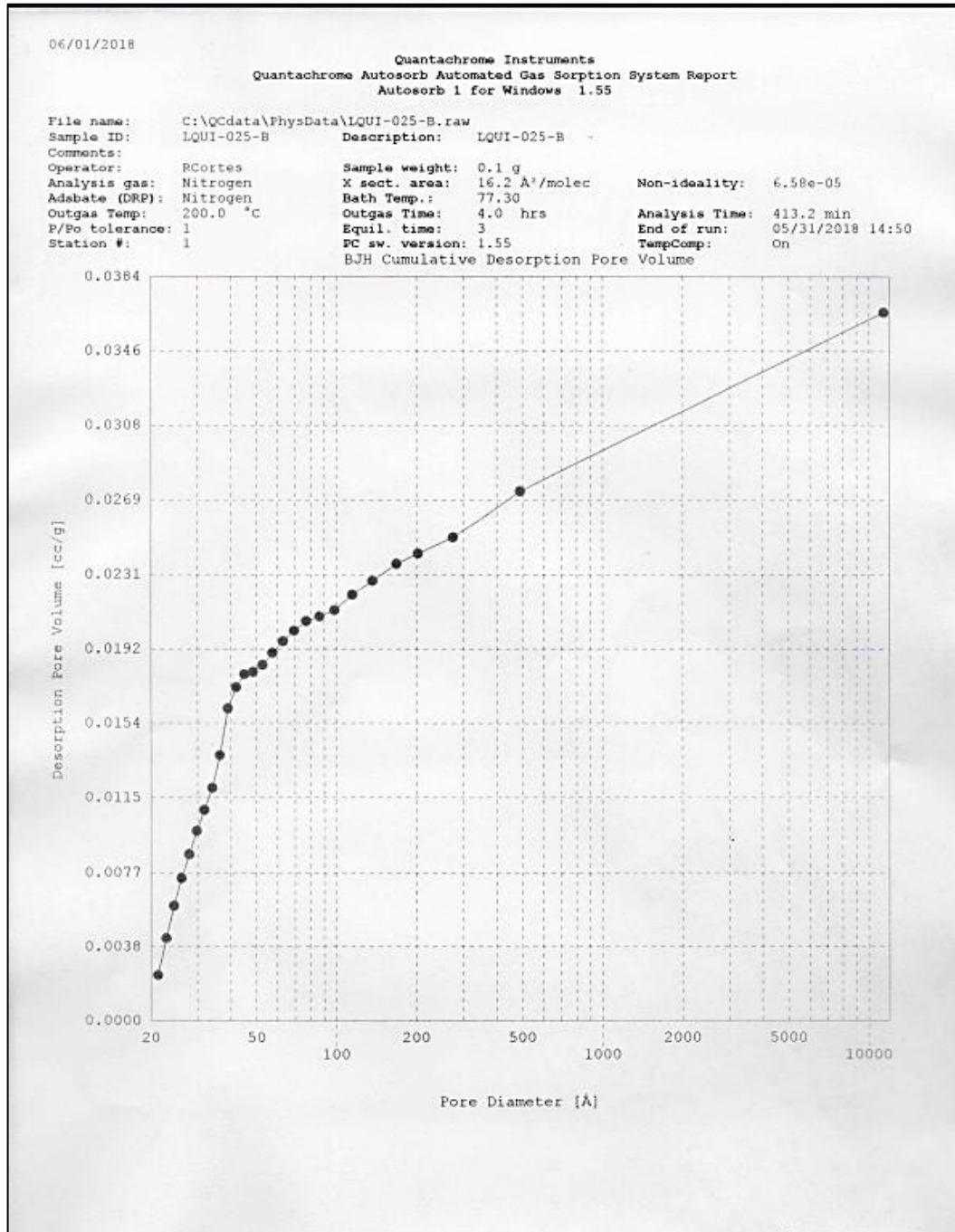
v_2	v_1	Grados de libertad del numerador (v_1)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	2	5.83	7.50	8.20	8.58	8.82	8.98	9.10	9.19	9.26	9.32	9.41	9.49	9.58	9.63	9.67	9.71	9.76	9.80	9.85	
2	2	2.57	3.00	3.15	3.23	3.28	3.31	3.34	3.35	3.37	3.38	3.39	3.41	3.43	3.43	3.44	3.45	3.46	3.47	3.48	
3	2	2.02	2.28	2.36	2.39	2.41	2.42	2.43	2.44	2.44	2.44	2.45	2.46	2.46	2.46	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47	
4	2	1.81	2.00	2.05	2.06	2.07	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	
5	2	1.69	1.85	1.88	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89	1.88	1.88	1.88	1.88	1.87	1.87	1.87	
6	2	1.62	1.76	1.78	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78	1.77	1.77	1.77	1.76	1.75	1.75	1.75	1.75	1.74	1.74	1.74	
7	2	1.57	1.70	1.72	1.72	1.71	1.71	1.70	1.70	1.69	1.69	1.68	1.68	1.67	1.67	1.66	1.66	1.65	1.65	1.65	
8	2	1.54	1.66	1.67	1.66	1.66	1.65	1.64	1.64	1.63	1.63	1.62	1.62	1.61	1.60	1.60	1.59	1.58	1.58	1.58	
9	2	1.51	1.62	1.63	1.63	1.62	1.61	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.54	1.53	1.53	
10	2	1.49	1.60	1.60	1.59	1.59	1.58	1.57	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48	1.48	
11	2	1.47	1.58	1.58	1.57	1.56	1.55	1.54	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.48	1.47	1.46	1.45	1.45	
12	2	1.46	1.56	1.56	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.42	
13	2	1.45	1.55	1.55	1.54	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	
14	2	1.44	1.53	1.53	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.38	
15	2	1.43	1.52	1.52	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	
16	2	1.42	1.51	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	
17	2	1.42	1.51	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	
18	2	1.41	1.50	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	
19	2	1.41	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	
20	2	1.40	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	
21	2	1.40	1.48	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	
22	2	1.40	1.48	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	
23	2	1.39	1.47	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	
24	2	1.39	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	
25	2	1.39	1.47	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	
26	2	1.38	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	
27	2	1.38	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	
28	2	1.38	1.46	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	
29	2	1.38	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	
30	2	1.38	1.45	1.44	1.43	1.42	1.41	1.40	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	
40	2	1.36	1.44	1.42	1.40	1.39	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.31	1.30	1.28	1.26	1.24	1.22	1.21	1.19	1.18	
60	2	1.35	1.42	1.41	1.38	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.27	1.25	1.24	1.22	1.21	1.19	1.17	1.15	
120	2	1.34	1.40	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26	1.24	1.22	1.21	1.19	1.17	1.16	1.13	1.10	
∞	2	1.32	1.39	1.37	1.35	1.33	1.31	1.29	1.28	1.27	1.25	1.24	1.22	1.19	1.18	1.16	1.14	1.12	1.08	1.00	

ANEXO. G
MARCO NORMATIVO

Cuadro 15. Marco normativo del proyecto.

Norma	Título	Versión
NTC 529	Cereales y productos de cereales. Determinación del contenido de humedad	21/10/2009
NTC 1485	Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación	23/07/2008
NTC 5613	Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura	23/07/2008
ASTM D3173	Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke	10/10/2002
ASTM D3174	Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke	01/11/2012
ASTM D3175	Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke	01/02/2017
ASTM D4607	Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon	01/02/2017
ASTM D4607-94	Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon	01/02/2017
NTC 4467	PRODUCTOS QUÍMICOS INDUSTRIALES.CARBÓN ACTIVADO. MÉTODOS DE ENSAYO	26/08/1998

ANEXO H. RESULTADOS MÉTODO DE BET Y DISTRIBUCIÓN DE POROS



Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

File name: C:\QCdata\PhysData\LQUI-025-B.raw
 Sample ID: LQUI-025-B Description: LQUI-025-B
 Comments:
 Operator: RCortes Sample weight: 0.1 g
 Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å²/molec Non-ideality: 6.58e-05
 Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.30
 Outgas Temp: 200.0 °C Outgas Time: 4.0 hrs Analysis Time: 413.2 min
 P/Po tolerance: 1 Equil. time: 3 End of run: 05/31/2018 14:50
 Station #: 1 PC sw. version: 1.55 TempComp: On

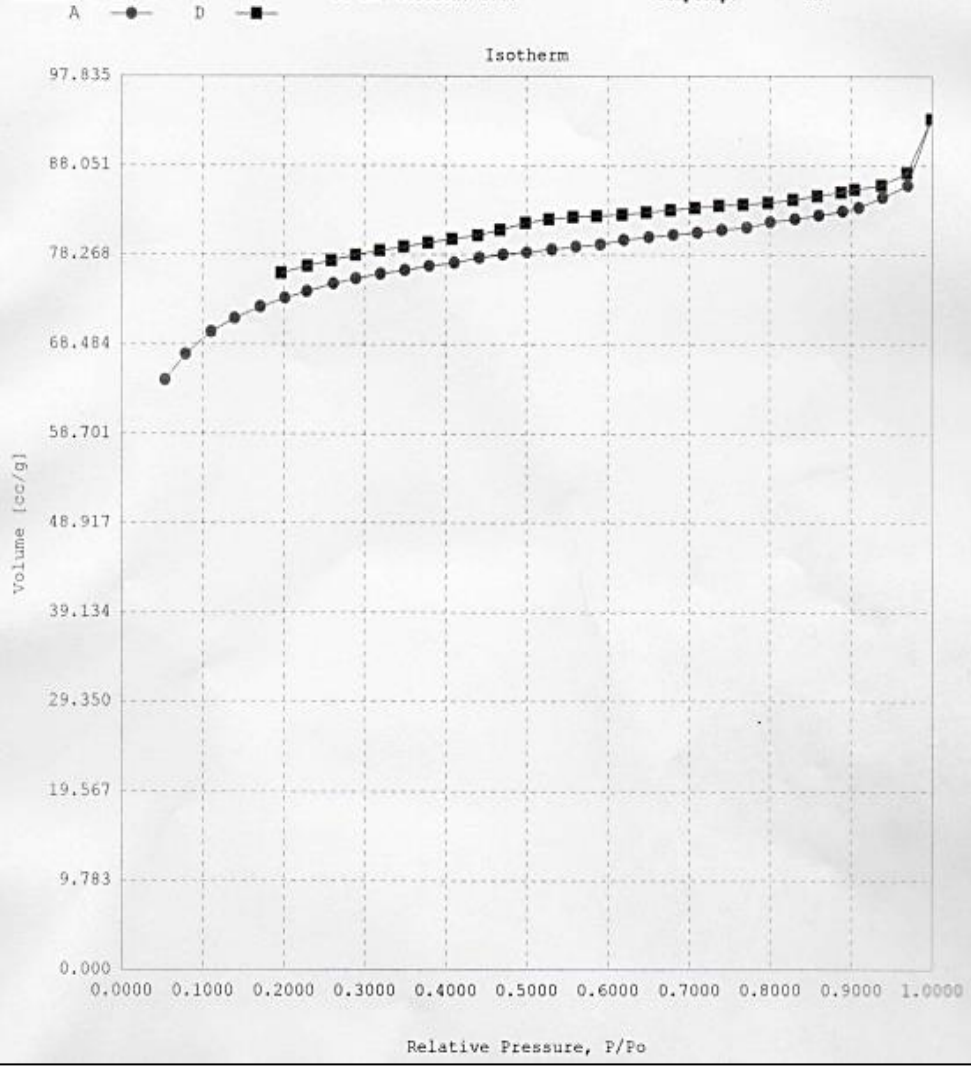
BJH DESORPTION PORE SIZE DISTRIBUTION

Diameter Å	Pore Vol [cc/g]	Pore Surf Area [m ² /g]	Dv(d) [cc/Å/g]	Ds(d) [m ² /Å/g]	Dv(log d) [cc/g]	Ds(log d) [m ² /g]
21.31	2.376E-03	4.459E+00	1.450E-03	2.722E+00	7.115E-02	1.335E+02
22.91	4.278E-03	7.779E+00	1.222E-03	2.134E+00	6.446E-02	1.125E+02
24.50	5.979E-03	1.056E+01	1.047E-03	1.710E+00	5.907E-02	9.644E+01
26.17	7.417E-03	1.275E+01	8.403E-04	1.284E+00	5.062E-02	7.737E+01
27.94	8.638E-03	1.450E+01	6.679E-04	9.563E-01	4.296E-02	6.150E+01
29.83	9.812E-03	1.608E+01	5.983E-04	8.021E-01	4.108E-02	5.508E+01
31.85	1.090E-02	1.745E+01	5.249E-04	6.591E-01	3.848E-02	4.832E+01
34.10	1.204E-02	1.878E+01	4.733E-04	5.552E-01	3.714E-02	4.357E+01
36.45	1.374E-02	2.065E+01	7.388E-04	8.106E-01	6.199E-02	6.802E+01
39.04	1.615E-02	2.312E+01	8.426E-04	8.634E-01	7.570E-02	7.757E+01
41.92	1.723E-02	2.415E+01	3.707E-04	3.537E-01	3.577E-02	3.413E+01
45.06	1.790E-02	2.475E+01	1.994E-04	1.770E-01	2.068E-02	1.836E+01
48.61	1.804E-02	2.485E+01	3.567E-05	2.935E-02	3.990E-03	3.283E+00
52.73	1.839E-02	2.512E+01	7.794E-05	5.912E-02	9.457E-03	7.174E+00
57.48	1.902E-02	2.556E+01	1.272E-04	8.853E-02	1.683E-02	1.171E+01
62.93	1.962E-02	2.594E+01	1.011E-04	6.429E-02	1.464E-02	9.309E+00
69.40	2.016E-02	2.625E+01	7.630E-05	4.398E-02	1.218E-02	7.021E+00
77.11	2.066E-02	2.651E+01	6.036E-05	3.131E-02	1.071E-02	5.554E+00
86.45	2.090E-02	2.662E+01	2.251E-05	1.042E-02	4.476E-03	2.071E+00
98.55	2.124E-02	2.676E+01	2.474E-05	1.004E-02	5.605E-03	2.275E+00
114.80	2.202E-02	2.704E+01	4.215E-05	1.469E-02	1.112E-02	3.874E+00
136.92	2.276E-02	2.725E+01	2.866E-05	8.372E-03	9.008E-03	2.632E+00
168.47	2.362E-02	2.745E+01	2.290E-05	5.436E-03	8.845E-03	2.100E+00
203.05	2.414E-02	2.756E+01	1.664E-05	3.278E-03	7.764E-03	1.529E+00
274.72	2.499E-02	2.768E+01	7.545E-06	1.099E-03	4.706E-03	6.852E-01
490.38	2.736E-02	2.787E+01	7.436E-06	6.065E-04	8.090E-03	6.599E-01
11349.13	3.662E-02	2.791E+01	4.325E-07	1.524E-06	6.047E-03	2.131E-02

06/01/2018

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

File name: C:\QCdata\PhysData\LQUI-025-B.raw
Sample ID: LQUI-025-B Description: LQUI-025-B
Comments:
Operator: RCortes Sample weight: 0.1 g
Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å²/molec Non-ideality: 6.58e-05
Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.30
Outgas Temp: 200.0 °C Outgas Time: 4.0 hrs Analysis Time: 413.2 min
P/Po tolerance: 1 Equil. time: 3 End of run: 05/31/2018 14:50
Station #: 1 PC sw. version: 1.55 TempComp: On



Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

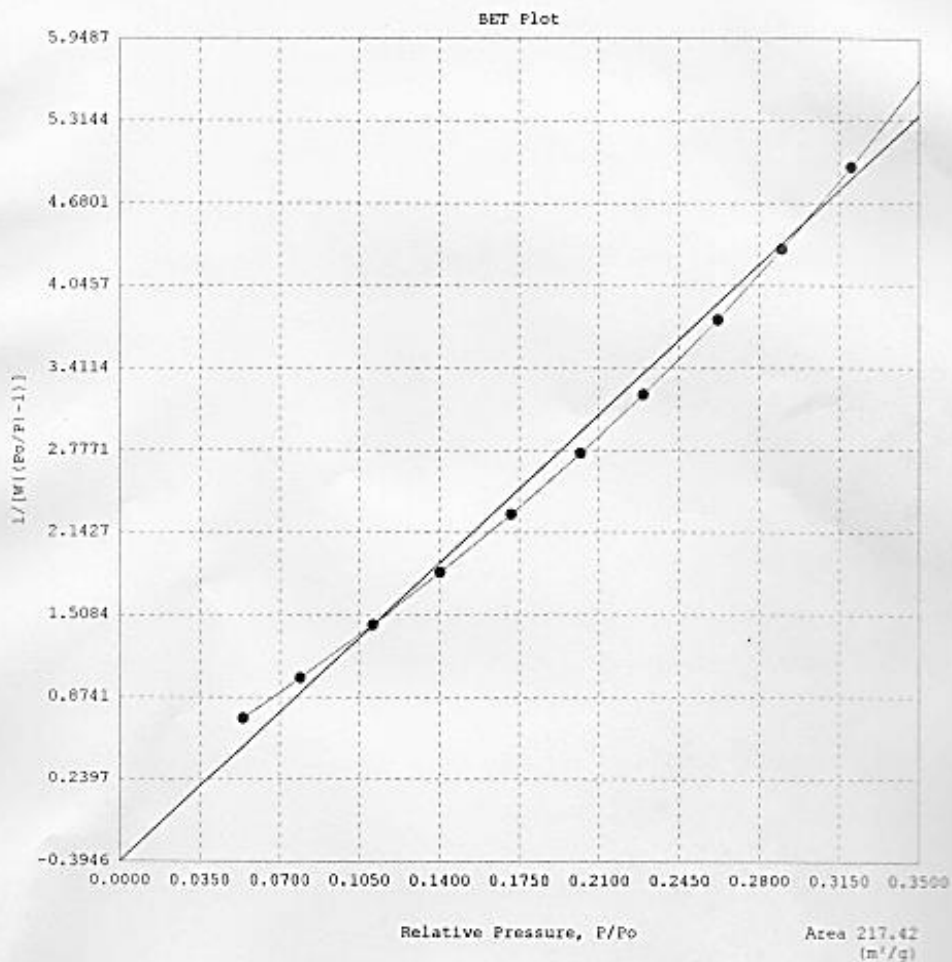
File name: C:\QCdata\PhysData\LQI-025-B.raw
 Sample ID: LQI-025-B Description: LQI-025-B
 Comments:
 Operator: RCortes Sample weight: 0.1 g
 Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å²/molec Non-ideality: 6.58e-05
 Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.30
 Outgas Temp: 200.0 °C Outgas Time: 4.0 hrs Analysis Time: 413.2 min
 P/Po tolerance: 1 Equil. time: 3 End of run: 05/31/2018 14:50
 Station #: 1 PC sw. version: 1.55 TempComp: On
 Isotherm

P/Po	Volume [cc/g] STP	P/Po	Volume [cc/g] STP
5.4140e-02	64.6077	6.7825e-01	83.1920
7.9225e-02	67.4189	6.4806e-01	82.9346
1.1113e-01	69.8380	6.1844e-01	82.6703
1.4064e-01	71.3299	5.8724e-01	82.5014
1.7166e-01	72.5451	5.5798e-01	82.4110
2.0198e-01	73.5039	5.2812e-01	82.1506
2.2934e-01	74.2135	4.9937e-01	81.7683
2.6213e-01	75.1118	4.6808e-01	80.9828
2.9025e-01	75.6476	4.4038e-01	80.4112
3.2053e-01	76.1413	4.0878e-01	79.9847
3.5004e-01	76.5813	3.7917e-01	79.5790
3.8077e-01	77.0022	3.4909e-01	79.1488
4.1125e-01	77.3591	3.1913e-01	78.7051
4.4239e-01	77.9387	2.8936e-01	78.2051
4.7148e-01	78.2582	2.5961e-01	77.6360
5.0083e-01	78.5482	2.2985e-01	77.0114
5.3161e-01	78.8416	1.9740e-01	76.2469
5.6136e-01	79.1181		
5.9149e-01	79.3731		
6.2030e-01	79.8915		
6.5151e-01	80.1715		
6.8156e-01	80.4307		
7.1126e-01	80.7110		
7.4151e-01	80.9804		
7.7206e-01	81.2480		
8.0160e-01	81.8754		
8.3149e-01	82.2204		
8.6088e-01	82.6017		
8.9023e-01	83.0478		
9.1035e-01	83.4598		
9.3954e-01	84.5812		
9.7032e-01	85.9103		
9.9913e-01	93.1761		
9.6941e-01	87.2440		
9.3831e-01	85.8896		
9.0514e-01	85.4249		
8.8838e-01	85.1520		
8.5917e-01	84.7164		
8.2913e-01	84.3518		
7.9822e-01	83.9747		
7.6731e-01	83.7918		
7.3790e-01	83.6618		
7.0825e-01	83.4301		

06/01/2018

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

File name:	C:\QCdata\PhysData\LQUI-025-B.raw	Description:	LQUI-025-B	
Sample ID:	LQUI-025-B			
Comments:				
Operator:	RCortes	Sample weight:	0.1 g	
Analysis gas:	Nitrogen	X sect. area:	16.2 Å ² /molec	Non-ideality: 6.58e-05
Adsorbate (DRP):	Nitrogen	Bath Temp.:	77.30	
Outgas Temp:	200.0 °C	Outgas Time:	4.0 hrs	Analysis Time: 413.2 min
P/Po tolerance:	1	Equil. time:	3	End of run: 05/31/2018 14:50
Station #:	1	PC sw. version:	1.55	TempComp: On



Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

```

File name:      C:\QCdata\PhysData\LQUI-025-B.raw
Sample ID:      LQUI-025-B      Description:      LQUI-025-B
Comments:
Operator:       RCortes      Sample weight:    0.1 g
Analysis gas:   Nitrogen      X sect. area:    16.2 Å²/molec
Adsorbate (DRP): Nitrogen      Bath Temp.:      77.30
Outgas Temp:    200.0 °C      Outgas Time:     4.0 hrs
P/Po tolerance: 1      Equil. time:     3
Station #:      1      PC sw. version:  1.55

```

```

Non-ideality:   6.58e-05
Analysis Time:  413.2 min
End of run:     05/31/2018 14:50
TempComp:       On

```

MULTIPOINT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/(W((Po/P)-1))
5.4140e-02	64.6077	7.089E-01
7.9225e-02	67.4189	1.021E+00
1.1113e-01	69.8380	1.432E+00
1.4064e-01	71.3299	1.836E+00
1.7166e-01	72.5451	2.286E+00
2.0198e-01	73.5039	2.755E+00
2.2934e-01	74.2135	3.208E+00
2.6213e-01	75.1118	3.784E+00
2.9025e-01	75.6476	4.325E+00
3.2053e-01	76.1413	4.957E+00

Area = 2.251E+02 m²/g

Slope = 1.578E+01

Y - Intercept = -3.049E-01

Correlation Coefficient = 0.996594

C = -5.075E+01

06/01/2018

Quantachrome Instruments
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb 1 for Windows 1.55

File name: C:\QCdata\PhysData\LQUI-025-A.raw
Sample ID: LQUI-025-A Description: LQUI-025-A
Comments:
Operator: RCortes Sample weight: 0.1 g
Analysis gas: Nitrogen X sect. area: 16.2 Å²/molec Non-ideality: 6.58e-05
Adsorbate (DRP): Nitrogen Bath Temp.: 77.30
Outgas Temp: 200.0 °C Outgas Time: 4.0 hrs Analysis Time: 374.3 min
P/Po tolerance: 1 Equil. time: 3 End of run: 05/31/2018 06:15
Station #: 1 PC sw. version: 1.55 TempComp: On

