

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de fin de carrera titulado:

**“Diseño de un proceso para la producción de carbón activado a partir de residuos de tagua
provenientes de Manta, en el periodo 2012 -2013.”**

Realizado por:

NATHALIE GABRIELA DE LA TORRE MIRANDA

Directora del proyecto:

ING. ANA LUCÍA RODRIGUEZ

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL

Quito, 06 de Septiembre de 2013

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, NATHALIE GABRIELA DE LA TORRE MIRANDA, con cédula de identidad # 1715578710, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Nathalie Gabriela de la Torre Miranda
C.I.: 1715578710

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“Diseño de un proceso para la producción de carbón activado a partir de residuos de tagua
provenientes de Manta, en el periodo 2012 -2013.”**

Realizado por:

NATHALIE GABRIELA DE LA TORRE MIRANDA

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL

ha sido dirigido por la profesora

ANA LUCÍA RODRIGUEZ

quien considera que constituye un trabajo original de su autor

Ana Lucía Rodríguez

DIRECTORA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

ANDRÉS MIÑO

ALEXANDRA JAMI

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador

Andrés Miño

Alexandra Jami

Quito, 06 de Septiembre del 2013

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios. Él es mi guía y fortaleza en todos los retos de mi vida.

A mis padres, a mis abuelos y a mi hermano por haberme enseñado los valores para ser una persona íntegra y por haber creído y confiado en mí.

AGRADECIMIENTO

A mi padre, excepcional ser humano e Ingeniero Químico, por su incondicional ayuda y guía en el desarrollo de esta tesis. Definitivamente tú eres mi ejemplo.

A mi madre y mi hermano, por haber estado siempre conmigo alentándome para seguir adelante.

A mis profesores, Ana Lucía Rodríguez, Andrés Miño y Alexandra Jami, porque con su consejo y apoyo, esta investigación pudo culminarse con éxito.

Al Departamento de Metalurgia Extractiva y a sus miembros, en especial a la Ing. Alicia Guevara, por haber abierto sus puertas para el desarrollo de esta tesis. A la empresa Angy Tagua, por haber proveído el residuo de tagua para la elaboración de esta investigación

Contenido

CAPÍTULO I.....	18
INTRODUCCIÓN	18
1.1 El problema de investigación	19
1.1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.1.2. Formulación del problema	21
1.1.3 Sistematización del problema	21
1.1.4 Objetivo general.....	22
1.1.5 Objetivos específicos	22
1.1.6 Justificación	22
1.2 Marco teórico.....	23
1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema	23
1.2.2 Adopción de una perspectiva teórica	27
1.2.3 Marco conceptual.....	28
1.2.4 Hipótesis.....	55
1.2.5 Identificación y caracterización de variables	55
CAPÍTULO II	56
MÉTODO	56
2.1 Nivel de estudio.....	57
2.2 Modalidad de Investigación.....	57
2.3 Método.....	57

2.4 Población y muestra.....	58
2.5 Selección de instrumentos de investigación	59
2.6 Validez y confiabilidad de los instrumentos.....	59
2.7 Procesamiento de datos	59
CAPÍTULO III	61
RESULTADOS.....	61
3.1 Levantamiento de datos	62
3.1.1 Ensayos de laboratorio	63
3.1.2 Ensayos piloto.....	68
3.2 Presentación y análisis de resultados.....	71
3.3 Aplicación Práctica.....	92
3.3.1 Capacidad y localización de la planta.....	92
3.3.2 Descripción del proceso.....	95
3.3.3 Diagrama de bloques y diagrama de flujo de la planta de producción de carbón activado de tagua.....	97
3.3.4 Sumario de propiedades de las corrientes.....	98
3.3.5 Identificación de equipos en el diagrama de flujo	99
3.3.7 Diseño básico de equipos principales de la planta de producción de carbón activado de tagua.....	101
3.3.8 Análisis económico preliminar	127
CAPITULO IV	141
DISCUSION.....	141
4.1 Conclusiones.....	142

4.2 Recomendaciones	145
Referencias	147
Anexo A : Registros de operación del horno Nichols.....	153
Anexo B : Detalle de cálculo del diseño de los equipos de la planta	161
Anexo C : Muestra de los certificados de calibración de los equipos de investigación utilizados	161
Anexo D : Detalle del análisis económico preliminar	161
Anexo E : Detalle de cálculo TIR y VAN.....	161
Anexo F : Muestra de cotizaciones referenciales utilizadas para estimar la inversión inicial de la planta.....	161

Índice de figuras

Figura 1 : Cinética de activación del cuesco de palma africana en un horno piloto Nichols. Temperatura: 880 °C; variación del índice de yodo en función del tiempo (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).....	25
Figura 2: Cinética de carbonización del cuesco de palma africana en un horno piloto Nichols ; Carga: 12 Kg; Temperatura variable entre 300 y 600 °C (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).	26
Figura 3: Esquema de la semilla de tagua. (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990)	30
Figura 4 : (A) Nuez de marfil y (B) semillas de tagua (Navarro, 2006).	31
Figura 5 : (A) D- Manosa. (B) D- Glucosa (Mutzke, 2012).	32
Figura 6 : Estructura molecular típica de manano β - (1-4) (Choct, 2007).....	33
Figura 7: Distribución celular del endosperma de la semilla de tagua. (A) Corte Transversal y (B) Corte longitudinal (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).....	33

Figura 8 : Infrutescencia de <i>Phytelephas Aequatorialis</i> (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).	35
Figura 9: Palma de tagua (Navarro, 2006).	35
Figura 10 : Animelas de tagua (Angy tagua, 2012).	40
Figura 11 : Estructura del grafito (Reboiras, 2006).	45
Figura 12 : Estructura “panelar” del carbón con aromáticos policíclicos, agrupada en forma de hojas al azar (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).	46
Figura 13 : (A) Estructura grafitica de los microcristales de carbón; (B) “Sitios activos” en la estructura desordenada del carbón activado. (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (de la Torre & Guevara, Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados, 2005)	47
Figura 14 : Negativo de una fotografía de las ramas de un árbol, que esquematiza la interconexión de los poros del carbón activado (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).	48
Figura 15 : Representación del proceso de activación de carbón mediante vapor de agua, según la reacción Rx. 1 (Capelle & de Vooy, 1983).	51
Figura 16 : (A) Formación porosa por activación química; (B) Formación porosa por activación física (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).	52
Figura 17: (A) Recortes de tagua. (B) Residuo de la producción de animelas. Fuente: Autor	62
Figura 18: Divisor de rifles tipo Jones. Fuente: Autor	67
Figura 19 : Tagua maciza en tiesto lista para ser carbonizada. Fuente: Autor	69
Figura 20 : Tagua maciza dentro de Horno Nichols en proceso de carbonización. Fuente: Autor	69
Figura 21 : Carbón en Horno Nichols listo para ser activado. Fuente: Autor	70
Figura 22 : Análisis Termo-Gravimétrico de los recortes de tagua. Fuente: Autor	72
Figura 23: Descarga carbón activado. Temperatura de trabajo: 920°C; atmósfera reductora $\lambda= 0.9$. Fuente: Autor	76
Figura 24: Análisis próximo detallado de muestras de carbón de tagua tomadas en varios momentos durante el proceso de pirolisis. Fuente: Autor	78
Figura 25: Cinética de activación de la Prueba 1 basada en la medición del índice de yodo a diferentes momentos. Fuente: Autor	80

Figura 26 : Cinética de activación de la Prueba 2 basada en la medición del índice de yodo a diferentes momentos. Fuente: Autor	81
Figura 27: Imágenes MEB (aumento 200 x) en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de tagua: a) materia prima inicial, b) carbón de tagua, c) carbón activado de tagua. Fuente: Autor.....	85
Figura 28: Imágenes MEB (aumento 2000 x) en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de tagua: a) materia prima inicial, b) carbón de tagua, c) carbón activado de tagua. Fuente: Autor.....	86
Figura 29: Imágenes MEB en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de cuesco de palma: a) materia prima inicial, b) carbón de cuesco de palma, c) carbón activado de cuesco de palma. Fuente: Autor	87
Figura 30: (A) Imagen de la distribución celular del endosperma de la semilla de tagua. Corte transversal. (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). (B) Imágenes MEB (aumento 200 x) del carbón de tagua. Fuente: Autor.	88
Figura 31 : Tipos de Torres de enfriamiento (Perry, Green, & Maloney, 2001).	118
Figura 32 : Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente (Perry, Green, & Maloney, 2001).	121
Figura 33: Gráfica de caballos de potencia para una torre de enfriamiento de tiro inducido y contracorriente (Perry, Green, & Maloney, 2001).	122

Índice de tablas

Tabla 1 : Resultados de los análisis de biopolímeros. Muestra: Materia prima inicial. Fuente: Autor.....	71
Tabla 2 : Resultados de la prueba de pirolisis a 400-500 °C. Condiciones de trabajo: Temperatura: 400-500 °C, $\lambda= 0.9$, tipo de lecho: fijo, Carga: 1 kg. Fuente: Autor	73
Tabla 3 : Resultados de la pirólisis a 900 °C. Condiciones de trabajo: Temperatura: 900 °C, $\lambda= 0.9$, tipo de lecho: fijo, Carga: 1 kg. Fuente: Autor	74
Tabla 4: Resultados de la prueba de activación del carbón de tagua Prueba 1 y Prueba 2. Fuente: Autor.....	75
Tabla 5 : Análisis próximo de una muestra de tagua. Fuente: Autor	76
Tabla 6 : Análisis próximo detallado de muestras de carbón de tagua durante el proceso de pirolisis. Fuente: Autor.....	77
Tabla 7 : Resultados de los análisis del índice de yodo realizados durante el proceso de activación en la Prueba 1. Fuente: Autor.....	79
Tabla 8 : Resultados de los análisis del índice de yodo realizados durante el proceso de activación en la Prueba 2. Fuente: Autor.....	80
Tabla 9 : Resultados del índice de azul de metileno para el carbón activado de tagua. Fuente: Autor.....	82
Tabla 10 : Resultados del índice de decoloración de azúcar para el carbón activado de tagua con jarabe inicial de azúcar morena. Fuente: Autor.....	83
Tabla 11 : Resultados del índice de decoloración de azúcar para el carbón activado de tagua con jarabe inicial de azúcar refinada. Fuente: Autor.	83
Tabla 12 : Composición elemental del carbón activado de tagua. Resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido. Fuente: Autor.	90
Tabla 13 : Caracterización de la materia prima, carbón y carbón activado. Fuente: Autor.....	91
Tabla 14 : Tamaño de la planta para producir carbón activado de tagua. Fuente: Autor.	93
Tabla 15 : Sumario de las propiedades de las corrientes del diagrama de flujo. Fuente: Autor. ...	98

Tabla 16 : Identificación de equipos en el diagrama de flujo. Fuente: Autor.....	100
Tabla 17 : Datos usados para el dimensionamiento del horno rotatorio. Fuente: Autor.....	102
Tabla 18 : Dimensiones del horno rotatorio. Fuente: Autor.....	102
Tabla 19 : Molino de martillos para pulverización de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.....	103
Tabla 20: Dimensionamiento del proceso de ensacado. Fuente: Autor.....	104
Tabla 21 : Elementos de la reacción de carbonización de la madera. Fuente: Autor.....	105
Tabla 22: Composición de los gases del fuel oil (Perry J. , 1981).....	107
Tabla 23: Composición de los gases que salen del horno y van a tratamiento de post-combustión. Fuente: Autor.....	108
Tabla 24: Composición de los gases dentro de la cámara de post-combustión tomando en cuenta un 30% de exceso de aire. Fuente: Autor.....	109
Tabla 25: Composición de los gases a la salida de la cámara de post-combustión. Fuente: Autor.	110
Tabla 26: Dimensionamiento de la cámara de post-combustión. Fuente: Autor.....	111
Tabla 27 : Dimensionamiento del caldero. Fuente: Autor.....	113
Tabla 28 : Datos para diseño del lavador Venturi. Fuente: Autor.....	115
Tabla 29: Dimensionamiento del lavador venturi. Fuente: Autor.....	115
Tabla 30: Datos para diseño de la torre de absorción. Fuente: Autor.....	116
Tabla 31: Diseño de la torre de absorción. Fuente: Autor.....	117
Tabla 32 : Datos empleados para el diseño de una torre de enfriamiento tipo contracorriente. Fuente: Autor.....	120
Tabla 33 : Pérdidas de agua en la torre de enfriamiento de agua. Fuente: Autor.....	124
Tabla 34 : Características de la torre de enfriamiento de agua. Fuente: Autor.....	124
Tabla 35: Tipos de tornillos sin fin (de la Torre E. , 2011).....	125
Tabla 36 : Características del tornillo de enfriamiento. Fuente: Autor.....	126
Tabla 37 : Parámetros de operación de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor....	130
Tabla 38 : Inversión inicial de la planta de carbón activado. Fuente: Autor.....	131
Tabla 39 : Detalle de pago de la inversión inicial de la planta. Fuente: Autor.....	132

Tabla 40 : Ingresos y egresos totales anuales. Fuente: Autor.	133
Tabla 41 : Cálculo TIR, VAN y pago final de la inversión. Fuente: Autor.	134
Tabla 42 : Flujo de caja mensual detallado. Fuente: Autor.	135
Tabla 43 : Costos fijos de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.	137
Tabla 44 : Costos variables de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.	137
Tabla 45 : Resumen de la utilidad de la planta por kilo de carbón activado vendido. Fuente: Autor.	138
Tabla 46 : Balance de energía de los equipos de la planta e ingresos generados por la venta de energía eléctrica producida por el vapor excedente. Fuente: Autor.	139
Tabla 47 : Precios de venta de los productos derivados de los residuos de tagua. Fuente: Autor.	140

Diseño de un proceso para la producción de carbón activado a partir de residuos de tagua provenientes de Manta, en el periodo 2012 -2013

Nathalie de la Torre
Ingeniería Química Industrial
Universidad Internacional SEK.
Correo electrónico: nathalie_dltm@hotmail.com

Resumen

El proceso de producción de animelas de tagua, base para la fabricación de botones de alta costura, genera “*recortes*” como residuo, los cuales no tienen una utilización cierta, empleándolos, ocasionalmente, como combustible en hornos artesanales de ladrillos. Por esta razón, se quiere investigar procesos que permitan valorizar dicho residuo mediante la producción de carbón activado, material con gran demanda por sus diversas aplicaciones en la industria minera, alimenticia, ambiental, y petrolera.

Los recortes de tagua serán caracterizados utilizando análisis de biopolímeros, de textura y de pirólisis. Se realizarán ensayos de carbonización y activación física con CO₂ y vapor de agua a nivel piloto, en un horno Nichols Herreshoff mono solera de atmósfera controlada, evaluando las condiciones operatorias más favorables y los parámetros cinéticos necesarios para el diseño del proceso industrial de producción de carbón activado de tagua, cuyas propiedades de superficie específica y tamaño de poro se determinarán con los índices de yodo, azul de metileno y decoloración de azúcar. Las técnicas analíticas empleadas serán: microscopía electrónica de barrido con analizador de energía dispersiva de rayos x, termo-gravimetría, espectrofotometría y titulación. Con los resultados experimentales obtenidos, se efectuará el diseño conceptual de la planta industrial y un análisis económico preliminar.

Palabras clave: tagua, carbón activado, diseño conceptual, análisis económico

Design of a process to produce activated carbon from vegetable ivory residues from Manta, in the period 2012-2013.

Abstract:

The production of vegetable ivory “*animelas*”, which are used to manufacture haute couture buttons, generate “*cuttings*” as residue, that do not have an actual usage, employing them, occasionally, as fuel for artisanal brick furnaces. For this reason, processes that make use of such residue by producing active carbon have been investigated. Active carbon is a high valued material for its different applications in the mining, food, environmental and oil industry.

The vegetable ivory “*cuttings*” are going to be characterized by biopolymers, texture and pyrolysis analysis. Carbonization and physics activation with CO₂ and water vapor essays are going to be done in a Nichols Herreshoff furnace with controlled atmosphere, at a pilot level. These essays will be used to evaluate the most favorable operative conditions and the kinetics parameters that are necessary for the process design of the industrial production of vegetable ivory active carbon. Specific surface and pore size properties of active carbon are going to be determined by Iodine, Methylene Blue and Sugar Discoloration indexes. The following analytic techniques are going to be employed: Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectroscopy, thermogravimetry, spectrophotometry, and titration. With the obtained results, the conceptual design of the industrial plant and a preliminary economic analysis will be done.

Keywords: vegetable ivory, active carbon, conceptual design, economic analysis

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 El problema de investigación

1.1.1 Planteamiento del problema

1.1.1.1 Diagnóstico del problema

La tagua crece en Ecuador de forma silvestre, razón por la cual, es común encontrar cultivos de la palma que se han extendido espontánea y naturalmente a partir de las semillas que caen al suelo (Ortiz, 2009). También se puede observar pequeñas plantaciones de tagua en el país, realizadas con el objetivo de aprovechar la planta en diferentes aplicaciones como para la elaboración de gran variedad de figuras decorativas y otros instrumentos útiles e incluso para la formulación de medicinas ancestrales (Zambrano & Martínez, 2005).

Una de las partes usadas de la tagua, y que es de interés para el presente estudio específicamente, es su nuez madura y seca. La nuez se vuelve tan sólida como el marfil, por lo que puede ser empleada como materia prima para la fabricación de varios productos como finos botones, artesanías y joyas (Navarro, 2006).

Además, la semilla de tagua es utilizada industrialmente en Ecuador para producir animelas, base para la fabricación de botones. El proceso de manufactura de animelas incluye operaciones como secado, pelado, corte y torneado y produce dos residuos provenientes de la tagua:

- Polvillo: usado como base de balanceado para el ganado.
- Recortes: que se usan como combustible para la quema en hornos artesanales (Montufar, 2008).

Los residuos (puntualmente los recortes) del proceso de la producción de las animelas están siendo subutilizados, razón por la cual se buscará una forma de valorizarlos de mejor manera, dándoles un uso alternativo que sea ambientalmente amigable y económicamente interesante.

1.1.1.2 Pronóstico

Se considera que los recortes del proceso de la producción de las animelas están siendo subutilizados. Dicho residuo, tal y como se dijo anteriormente, es solo empleado como combustible, ya que tiene lenta descomposición natural y no puede ser usado para la elaboración de derivados orgánicos como humus o compost. Esto provoca varios efectos en el ambiente y pérdidas económicas, por la falta de una correcta valorización.

La quema de material vegetal en hornos artesanales, donde no existe un correcto control de la atmósfera de combustión, genera diferentes gases y compuestos. De hecho, se puede afirmar que al quemar material vegetal se generan alrededor de 200 productos, entre los que se encuentran: agua, etano, propano, propileno, metil y etil-acetileno, ácidos orgánicos, aldehídos y furanos, además de una gran cantidad de material particulado (Bernadis et al., 2008). También se producen gases de combustión como NO_x, CO, y CO₂. El CO es un gas extremadamente tóxico, aún en concentraciones muy bajas, que puede provocar muerte por asfixia en las personas expuestas, según Coral *com. pers* (2011). El CO₂, por su lado, es un reconocido gas de efecto invernadero, que muchos países en el mundo tratan de disminuir. Por último, los NO_x son irritantes, corrosivos y precursores de la formación de lluvia ácida. Por lo tanto, si se siguen utilizando los recortes como combustible para hornos artesanales, donde las atmósferas de combustión no están bien controladas, seguirá existiendo la generación de compuestos contaminantes para el ambiente.

Es por esta razón que se puede afirmar que dicho residuo no está siendo utilizado en todo su potencial. Se considera que los recortes de tagua pueden llegar a constituirse como materia prima no tradicional para la producción de carbón activado, material con alto valor agregado que es empleado en diferentes aplicaciones como potabilización de aguas, deodorización, etc.

1.1.1.3 Control de pronóstico

Es necesario el desarrollo de un proceso alternativo para la valorización de los residuos provenientes de la producción de animelas, los mismos que están siendo actualmente subutilizados. El uso alterno propuesto es la producción de carbón activado a partir de los mismos. El carbón activado es un producto con valor agregado, muy utilizado en la industria para la potabilización de agua, deodorización, despigmentación, extracción de oro de soluciones cianuradas e incluso, medicinalmente para primeros auxilios contra intoxicaciones (Mintegui, S. et al., 2003).

1.1.2. Formulación del problema

¿Es factible el diseño de un proceso para la valorización de los residuos de tagua generados en la fabricación de animelas, mediante la obtención de carbón activado?

1.1.3 Sistematización del problema

- ¿Cuáles son las características del residuo de tagua generado en la fabricación de animelas y cuál es su uso actual?
- ¿Cuál uso alternativo se puede dar a los residuos de tagua provenientes de la fabricación de animelas?
- ¿Qué calidad de carbón activado se obtiene utilizando como materia prima los residuos de tagua procedentes de la producción de animelas?

- ¿Cuál será el análisis económico preliminar del establecimiento de una planta de carbón activado, tomando como materia prima los residuos de tagua generados en la producción de animelas?

1.1.4 Objetivo general

El presente proyecto tendrá como objetivo diseñar un proceso para la producción de carbón activado a partir de los recortes generados como residuo de la producción de animelas de tagua, proponiendo una alternativa de uso de los mismos.

1.1.5 Objetivos específicos

- Caracterizar el residuo de tagua generado en la producción de animelas e identificar sus aplicaciones actuales.
- Proponer un uso alternativo de los residuos de tagua generados en el proceso de producción de animelas, que sea más lucrativo que la aplicación actual que se está dando a dichos residuos.
- Caracterizar el carbón activado obtenido a partir de los residuos de tagua para poder determinar la calidad del producto.
- Realizar el diseño de una planta industrial para la producción de carbón activado de tagua y hacer un análisis económico preliminar de la misma.

1.1.6 Justificación

La presente investigación servirá para proponer un uso alternativo de los residuos de tagua generados en el proceso de producción de animelas, al usarlos como materia prima para la producción de carbón activado. Se diseñará el proceso más eficiente para la

activación y se caracterizará el producto obtenido, con el fin de identificar los posibles usos que se le puede dar a este carbón en la industria, de acuerdo a sus características particulares.

Este proyecto se justifica ya que valorizará un residuo que actualmente está siendo considerado como un pasivo ambiental. Esto solucionará el problema que genera el mal uso de este residuo y evitará el desperdicio. En concreto, se transformará un desecho en materia prima plenamente aprovechable.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Estado actual del conocimiento sobre el tema

La producción industrial de carbón activado en Ecuador utiliza cuescos de coco y madera como materia prima fundamentalmente (de la Torre *com pers*, 2012). En el mundo, el 60% de los carbones activados son producidos a partir del carbón mineral (Sarmiento et al., 2004). Las propiedades particulares que adquiera un producto al ser carbonizado y activado dependerán de la naturaleza de la materia prima y de las condiciones de carbonización y de activación. La carbonización desarrollará la estructura gráfica del material y la activación condicionará la formación de poros (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

De hecho, se puede afirmar que el tipo de materia prima y el proceso de activación que se emplee es determinante para obtener carbones activados con ciertas características físicas y químicas, tales como dureza, resistencia a la abrasión, tamaño y forma de poro, etc. Por ejemplo, la madera de pino es usada como materia prima para la producción de carbones activados en polvo, los mismos que tienen propiedades decolorantes tanto por activación física con vapor de agua, como química con ácido fosfórico. Por otro lado, los

carbones activados granulares elaborados a partir de cuescos de coco, presentan alta resistencia a la abrasión, por lo que pueden ser empleados en la adsorción de gases y el complejo cianurado de oro (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Otro ejemplo a mencionar es las diferencias en las propiedades obtenidas en carbones activados producidos a partir de cuesco de palmiste y de coco. Un carbón activado elaborado a partir de cuescos de palmiste tiene mayor cantidad de mesoporos y microporos que un carbón activado fabricado a partir de cuescos de coco, mismo que se caracteriza por presentar mayor formación de macroporos, bajo pruebas de activación y carbonización iguales (Mohd & Wan, 2004).

Por otro lado, las características específicas de porosidad de cada tipo de carbón activado, le confieren al mismo la capacidad de ser utilizado en aplicaciones varias. Un carbón activado microporoso puede ser utilizado en tratamiento de aguas residuales. En cambio, los carbones activados mesoporoso y macroporosos, por lo general, tienen amplias aplicaciones en procesos de la industria alimenticia como por ejemplo, la decoloración de azúcar (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988).

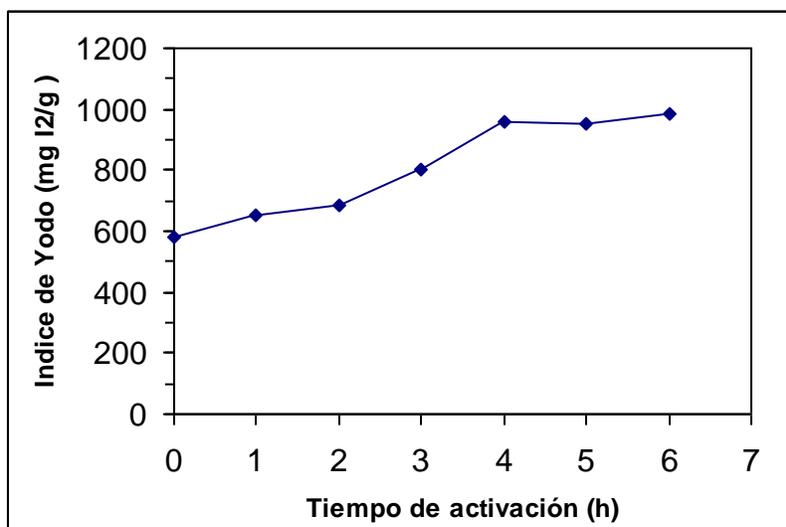
También, la resistencia mecánica que adquieren los carbones activados está estrechamente relacionada con la porosidad de los mismos. Es así que carbones activados que presentan un porcentaje de porosidad menor al 40%, se caracterizan por ser altamente resistentes. Ejemplos de estos últimos son aquellos carbones fabricados a partir de semillas de mamey, cáscaras de coco y madera (Medina, Villegas, & de las Posas, 2003).

El tiempo de activación también determina la cantidad de poros formados en el carbón, y por lo tanto, la superficie específica obtenida. Por ejemplo, en el caso de la activación del cuesco de palma africana, la superficie específica, medida mediante el ensayo del Índice de Yodo, aumenta mientras incrementa el tiempo de activación, hasta

llegar a un máximo. La Figura 1 ilustra la cinética de activación del cuesco de palma africana a diferentes temperaturas (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007):

Figura 1 : Cinética de activación del cuesco de palma africana en un horno piloto Nichols.

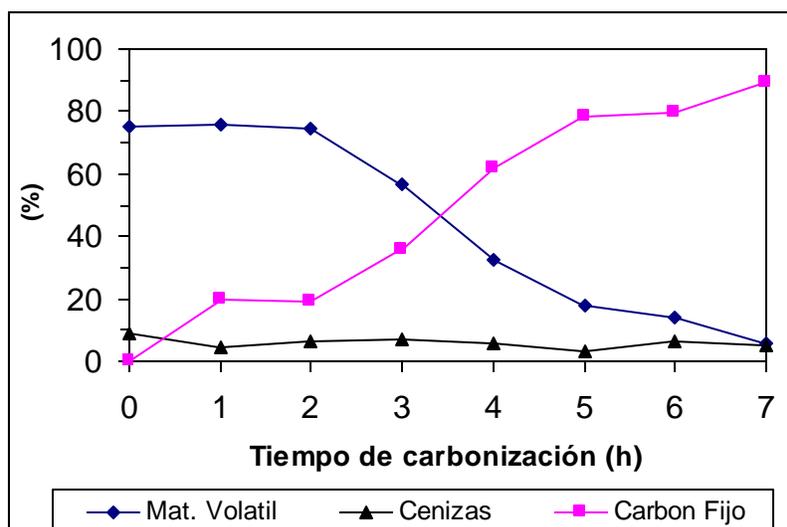
Temperatura: 880 °C; variación del índice de yodo en función del tiempo (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).



En concreto, se puede decir que la producción de carbón activado comprende dos operaciones básicas: carbonización y activación. La carbonización elimina los compuestos volátiles de la materia prima, conservando las materias minerales y un esqueleto de carbón, tal y como lo muestra la Figura 2. La activación, por su lado, genera

la porosidad característica del carbón activado, elevando su superficie específica (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).

Figura 2: Cinética de carbonización del cuesco de palma africana en un horno piloto Nichols ; Carga: 12 Kg; Temperatura variable entre 300 y 600 °C (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).



Basándose en estos principios, se desarrolló el proceso de producción de carbón activado a base de cuesco de palma africana siguiendo la siguiente metodología experimental, considerando pruebas a nivel de laboratorio y piloto (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007):

- En los ensayos a nivel de laboratorio se realizaron pruebas para caracterizar la materia prima y el carbón activado obtenido como producto.
- Los ensayos a nivel piloto se efectuaron en un Horno Nichols Herreshoff mono solera. Este horno trabaja con calentamiento a base de Gas Licuado de Petróleo (GLP) y es capaz de operar en lecho fijo o en lecho agitado. El horno tiene capacidad de 15 litros material y permite el control de la atmósfera operacional en base al factor λ , que relaciona el aire alimentado al quemador y el aire estequiométrico necesario para realizar una combustión completa. De esta forma, se puede hacer pruebas trabajando tanto en atmósfera oxidante, como en atmósfera reductora.
- Con el fin de determinar las características del carbón obtenido, se deben hacer análisis de densidad, dureza, humedad, volátiles, cenizas, carbón fijo, índice de yodo, índice de azul de metileno e índice de decoloración de azúcar (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).

1.2.2 Adopción de una perspectiva teórica

Basados en la metodología utilizada para producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste, lo que se buscará es aplicar el mismo método para producir carbón activado a partir de los residuos de tagua, provenientes del proceso de producción de las animelas.

El carbón obtenido, utilizando esta materia prima, será caracterizado mediante las normas American Society for Testing and Materials (ASTM) correspondientes o afines.

Además, a partir de los datos obtenidos en la parte experimental, se procederá a realizar el

diseño de un proceso para la producción de carbón activado a partir de residuos de tagua. Por último, se hará un estudio de prefactibilidad preliminar donde se realizará una estimación de costos, inversiones, capital de operación y rentabilidad.

1.2.3 Marco conceptual

1.2.3.1 Tagua

La tagua es el fruto de una planta muy semejante en su morfología a la palma. En el Ecuador, la planta crece de forma silvestre en bosques llamados táguales y espontáneamente en la zona subtropical de la cordillera andina. Por esta razón, se puede encontrar tagua principalmente en la región Costa y Amazónica y en la Sierra en las zonas de Pacto y Nanegal (Ortiz, 2009).

La tagua ha sido comercializada internacionalmente desde aproximadamente 1865. Tradicionalmente, esta ha sido utilizada para la elaboración de botones, juguetes y figuras. Su mercado era bastante amplio cuando inició su explotación. Tanto así que en 1887, la exportación de tagua desde el puerto de la ciudad de Esmeraldas representaba el 76.2% de las ganancias de dicho puerto (Velásquez, 1998).

Se estima que el 20% de todos los botones producidos en Estados Unidos durante los años 1920 eran hechos de tagua. Lo que es más, se podía decir que los principales países exportadores del producto eran Ecuador, Colombia y Panamá. (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

Sin embargo, la demanda de tagua declinó significativamente durante la Segunda Guerra Mundial, debido a la popularización del plástico. A partir del año 1987, el mercado internacional de la tagua solo ha ido incrementando debido al aumento del interés de los consumidores en adquirir productos “verdes” (Velásquez, 1998).

Por lo general, la palma de tagua en el país crece de forma dispersa en pastizales y ocasionalmente es cultivada en sistemas agroforestales, por ejemplo, en asociación con maíz, frutos cítricos, caña de azúcar, banano y papaya (Borgtoft & Balslev, 1992). Lo que es más, no se puede afirmar que existe una plantación significativa de tagua en el mundo, ya que la palma de tagua es una planta silvestre, que no se adapta fácilmente a un régimen controlado para sembrarla y cosecharla (Montufar, 2008).

La producción total de tagua en el país es de unas 100 mil toneladas, de las cuales: 50 mil son provenientes de Manabí, 30 mil de Esmeraldas y 20 mil de la Cordillera Occidental (Ortiz, 2009).

1.2.3.1.1 Morfología y características generales de la tagua

La tagua, también conocida como marfil vegetal, toma su nombre en alusión a su semilla, la misma que tiene un endosperma blanco y duro compuesto por células de paredes gruesas, que hacen que se parezca mucho al marfil animal (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

La Figura 7 muestra la morfología celular de la semilla de tagua. La planta es también conocida en Ecuador como viz, cade, cadí, coroso, mococho y cabeza de negro (Acosta, 1990). En el mundo, la tagua toma los nombres de marfil de palma, palm ivory, coquilla, palmivoor, steennoot, entre otros (Montufar, 2008).

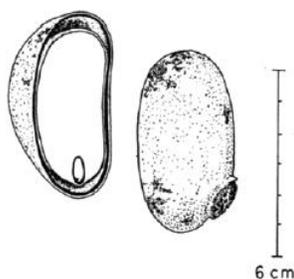
La planta está formada por un solo tallo erecto. Los individuos más altos pueden alcanzar alturas de hasta 15 m y son encontrados en bosques sub-montanos. Dichos individuos tendrían una edad aproximada de 200 años (Barfod, Bergmann, & Pedersen,

1990). La palma macho es la que produce la flor, mientras que la hembra tiene los frutos (Montufar, 2008).

El fruto seco de la palma tiene un diámetro aproximado de unos 4 centímetros y puede pesar hasta 3 onzas (Montufar, 2008). Sus frutos son cónicos e individuales y pueden llegar a medir hasta 12 cm (Navarro, 2006). Su cáscara externamente es fibrosa y está compuesta por un epicarpio delgado y un mesocarpio externo. La parte interna del mesocarpio es carnuda. Cada grupo de semillas (que pueden ir entre 5 y 7 por fruta), están contenidas dentro de una concha dura llamada endocarpio.

El nombre de “nuez de marfil” se refiere comúnmente al endocarpio que contiene las semillas maduras. Estas semillas son de color café y conspicuamente veteadas (Navarro, 2006). La Figura 3 esquematiza la forma que tiene la semilla de tagua.

Figura 3: Esquema de la semilla de tagua. (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990)



El epicarpio de la fruta es leñoso y de color pardo en el exterior y amarillo en el interior. Su mesocarpio es carnoso, anaranjado, duro y tiene consistencia fibrosa y oleaginosa con un espesor de hasta 5 mm. Además, presenta un tegumento blanco muy fino y duro, parecido al

marfil. La Figura 4 muestra la “nuez de marfil” de la especie *Phytelephas Macrocarpa* y sus semillas (Navarro, 2006).

Figura 4 : (A) Nuez de marfil y (B) semillas de tagua (Navarro, 2006).



(A)



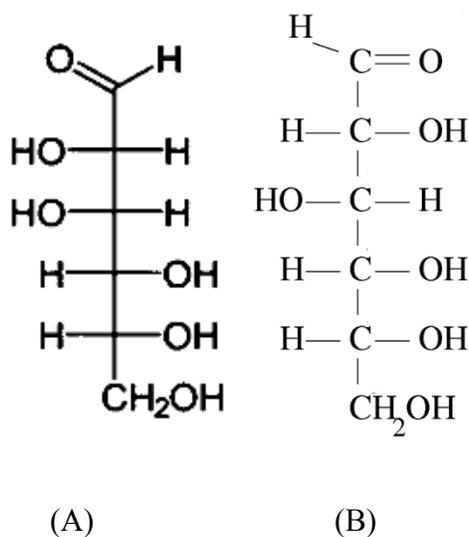
(B)

El principal componente de la pared celular del endosperma de la semilla de tagua es el manano (*mannan*), polisacárido de la manosa (Figura 5 A), mismo que constituye un 70% del mismo en la fruta madura (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). La manosa tiene una fórmula

molecular igual a la de la glucosa (Figura 5 B), pero difiere de esta porque su grupo hidroxilo en el carbono 2 está dirigido a la izquierda; es decir, es un estereoisómero de la glucosa en el carbono 2.

Específicamente, el endospermo está formado por un 45% de manano A (manano I), 25% de manano B (manano II), 7.5% de celulosa y el porcentaje restante de un componente de naturaleza desconocida que probablemente sea un material péctico o lignina (Timel, 1957).

Figura 5 : (A) D- Manosa. (B) D- Glucosa (Mutzke, 2012).



Cadenas lineares de manano β - (1-4) (Figura 6) son encontrados en el endosperma de las semillas de ciertas especies de plantas. Este polisacárido es altamente insoluble en agua y muy denso. D-Manano lineal β - (1-4) en forma cristalina se encuentra formando parte de las paredes celulares de las nueces de la tagua. Las dos morfologías de manano halladas (manano I y manano

II) se caracterizan por ser granulares y fibrosas, respectivamente. Se ha dicho que el manano forma las bases moleculares que le dan dureza a las nueces de la tagua (Hägglund, 2002).

Figura 6 : Estructura molecular típica de manano β - (1-4) (Choct, 2007).

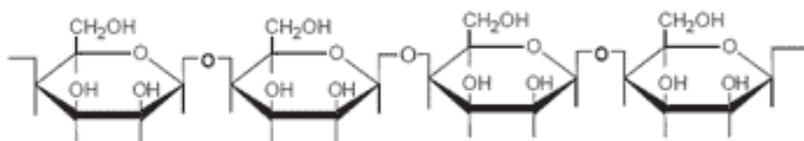
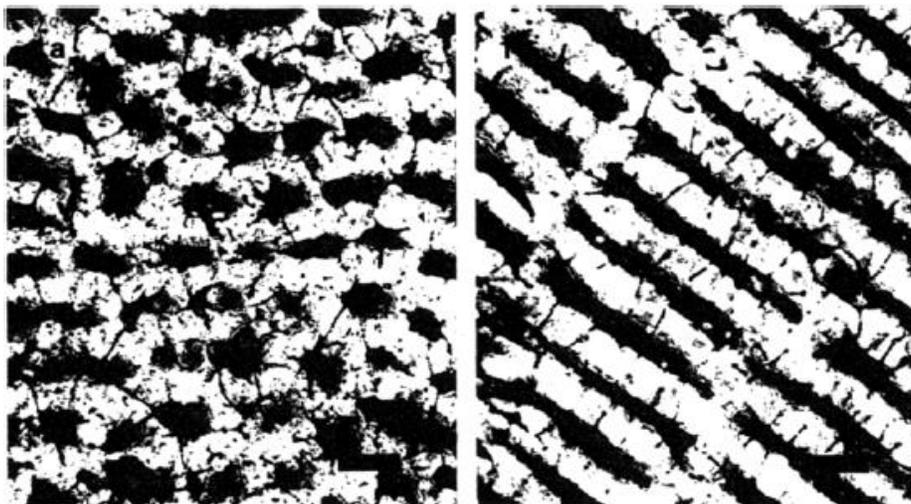


Figura 7: Distribución celular del endosperma de la semilla de tagua. (A) Corte Transversal y (B) Corte longitudinal (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).



(A)

(B)

En Ecuador se puede encontrar dos variedades de la planta: *Phytelephas Aequatorialis* y *Phytelephas Macrocarpa*. La especie usada para obtener el marfil vegetal en el país es fundamentalmente la *Phytelephas Aequatorialis*. Esta especie proviene de la subfamilia de palmas *Phytelephantoideae* y es encontrada en la parte norte de la costa ecuatoriana, donde las condiciones climáticas son favorables para su crecimiento (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

Phytelephas Aequatorialis es una palmera dioica que tiene un estípite (tallo largo no ramificado de las palmeras) de 25 centímetros a 30 centímetros. Presenta un arreglo de hojas tipo espiral y una infrutescencia bastante grande, pudiendo alcanzar diámetros de 30 a 40 cm (Navarro, 2006) (Velásquez, 1998). Una sola infrutescencia puede tener entre 7 y 22 frutas, cada una conteniendo entre 5 y 7 semillas. La Figura 8 ilustra dicha infrutescencia.

Se estima que el desarrollo de la fruta toma alrededor de tres años en tierras bajas. Por lo general, las semillas son recolectadas después de que la infrutescencia este madura y caiga al suelo, rompiéndose y exponiendo las semillas (Velásquez, 1998). La Figura 9 muestra la palma de tagua.

Figura 8 : Infrutescencia de *Phytelephas Aequatorialis* (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).



Figura 9: Palma de tagua (Navarro, 2006).



Aunque es conocido que la semilla de tagua tiene un periodo prolongado de latencia, no existe mucha información acerca de su velocidad de germinación, ni sobre cuánto tiempo demora un individuo juvenil en convertirse en sub-adulto, ni cuántos años necesita un adulto para

alcanzar su madurez (Velásquez, 1998). Sin embargo, se puede afirmar que la planta puede tardar entre 14 y 15 años para dar sus primeros frutos, ofreciendo tres cosechas al año aproximadamente (Ortiz, 2009).

1.2.3.1.2 Zonas de cultivo y sus características

Las palmas de tagua están distribuidas en la parte nororiental de América de Sur (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). Esta planta se encuentra en varios países como Brasil, Venezuela, Perú, Colombia y Panamá principalmente, ya que dichas naciones tienen climas y condiciones propicias para el desarrollo de la misma. (Ortiz, 2009).

En Ecuador, la tagua se localiza en las provincias de Manabí, Carchi, Esmeraldas, Guayas, El Oro, Bolívar, Azuay, Cañar y algunos sectores de la Amazonía. Las principales zonas donde crece la planta son:

- Pacto-Nanegalito-Gualea en la provincia de Pichincha, donde la palma no es muy explotada por desconocimiento de sus aplicaciones por parte de la gente del lugar.
- En el área comprendida entre Quito y Santo Domingo de los Colorados, por la carretera hasta los 1800 msnm, aunque existe más abundancia de crecimiento entre los 400 y 600 msnm.
- Paralelo al carretero de la línea férrea Guayaquil-Quito, la tagua se puede encontrar desde Barraganetal hasta Naranja Pata y dentro de las montañas.
- Zona de Bucay en los exteriores de la Cordillera Occidental.
- En la provincia de Bolívar, en los valles de la Cordillera Occidental.
- En las provincias de Azuay y Cañar existe presencia de palmas de tagua, pero esta no es comúnmente explotada.

- En la provincia de Manabí, la tagua crece a lo largo de los ríos, valles fluviales y bosques húmedos de forma natural, principalmente en Manta (Ortiz, 2009).

En los años 1800, cuando inició la explotación de tagua, las plantas utilizadas provenían de plantaciones naturales. Actualmente, los terrenos donde se encontraba la planta, se han transformado en pastizales, plantaciones de banana o plantaciones de palma africana. Aunque los recursos para obtener tagua no son tan grandes ni fácilmente accesibles como solían serlo, las industrias que se dedican a la explotación de la misma se abastecen, por lo general, de proveedores locales que cosechan los frutos del área (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

Las palmas en el Ecuador son cultivadas, por lo general, dispersamente en jardines, pastos o sistemas agroforestales. Las pocas poblaciones cultivadas se encuentran en Alluriquin, en la provincia de Pichincha, donde las semillas de tagua son recolectadas de pastizales que crecen en las laderas junto con otros productos. En la provincia de Manabí entre Jipijapa y Puerto Cayo, la palma es sembrada en cultivos mixtos junto con otras plantas como maíz, cítricos, café, banano, papaya y caña de azúcar (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

Las palmas de tagua pueden llegar a formar, ocasionalmente, grupos homogéneos que toman el nombre de táguales. Cada tágual tiene alrededor de 240 palmas por hectárea y crecen en diques aluviales en las orillas de los ríos. Comúnmente, sin embargo, las plantaciones de tagua no son sembradas por el ser humano, sino que simplemente crecen en zonas montañosas y húmedas (Ortiz, 2009).

En Ecuador se identifican dos variedades claramente separadas:

- *Phytelephas Aequatorialis*: encontrada en la región Costa.
- *Phytelephas Macrocarpa*: encontrada en la región Sierra y amazónica (Montufar, 2008).

La especie *Phytelephas Aequatorialis* que, como ya se había manifestado anteriormente, es la que comúnmente se utiliza en el país para la explotación de marfil vegetal, crece a 1500 metros en las pendientes de las montañas de la Cordillera de los Andes (Velásquez, 1998). Además, es común encontrar la palma en la parte norte de las planicies de la Costa ecuatoriana. Sin embargo, esta no crece en áreas pre-húmedas ni áridas (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). La especie *Phytelephas Aequatorialis* presenta densidades poblacionales de 185 plantas femeninas en promedio, con un rendimiento de 4 TM/ha/año (Navarro, 2006).

1.2.3.1.3 Usos de la tagua

La especie *Phytelephas Aequatorialis* es utilizada en diferentes aplicaciones:

- Las hojas de la planta son secadas y usadas para techar casas o chozas de paja.
- El endosperma tierno y el corazón de la palma es consumido como alimento por la gente de la localidad (Velásquez, 1998). Además, es conocido que el endosperma tierno y líquido puede ser utilizado como principio activo para la fabricación de medicinas para controlar la diabetes (Navarro, 2006).
- El mesocarpio interno se usa como carnada para pescar o para la elaboración de trampas para animales (Velásquez, 1998). Adicionalmente, este contiene aceite totalmente comestible, que es empleado para cocinar (Navarro, 2006).
- Las raíces de la palma son conocidas y utilizadas por la gente de la zona como medicamento para el control natal, por sus propiedades anticonceptivas.
- Los troncos de la palma macho se utilizan para hacer madera de fogata.
- Las ramas secas son empleadas para hacer escobas.
- Las flores con estambres son consumidas por el ganado como forraje.

- Las nueces, específicamente las semillas maduras, son empleadas para la manufactura de botones (Velásquez, 1998). Las semillas de la especie *Phytelephas Aequatorialis* son las comúnmente utilizadas en la industria debido a su morfología: son largas y su endosperma muy frecuentemente está sólido (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). Además, las semillas tiernas son ocupadas para hacer bebidas y como alimento (Montufar, 2008).
- La semilla madura de la tagua es muy apreciada para hacer artesanías por su similitud con el marfil. Incluso su endocarpio, que presenta un color pardo, es incorporado en las técnicas de tallado para hacer los “detalles” de las figurillas. Se dice que, por su estructura de líneas concéntricas, la tagua se parece al marfil encontrado en el hipopótamo. La habilidad del artesano muchas veces es tan grande, que algunos aseguran que la única forma de diferenciar tagua del marfil animal es mediante pruebas en el laboratorio o añadiendo ácido sulfúrico al ítem que va a ser examinado. El ácido sulfúrico aplicado a la tagua causa una coloración rosada irreversible, mientras que el marfil animal no sufre ningún efecto (Espinoza & Mann, 1999).

1.2.3.1.4 Producción de animelas

La semilla madura de la tagua es usada en la industria para la producción de animelas. La animela es un producto manufacturado de la tagua que sirve como base para la manufactura de botones (Montufar, 2008). La Figura 10 indica diferentes tipos de animelas de tagua producidas por industrias ecuatorianas.

El 90% de las animelas de tagua hechas en el Ecuador, son elaboradas en la ciudad de Manta para satisfacer la demanda local y exportar a diferentes lugares del mundo incluyendo Latinoamérica, Europa y Estados Unidos. La producción promedio mensual

de animelas de tagua en la ciudad de Manta es de 150.000 gruesas (equivalente a 21.600.000 unidades) mensuales (Ortiz, 2009).

Figura 10 : Animelas de tagua (Angy tagua, 2012).



El proceso de producción de animelas consiste en los siguientes pasos (Montufar, 2008):

- **Recolección y adquisición de pepas de tagua**

Las industrias que elaboran las animelas de tagua obtienen su materia prima, por lo general, de recolectores informales quienes esperan que la infrutescencia se encuentre madura y caiga al suelo, liberando las semillas (Velásquez, 1998). Dichos recolectores llevan las nueces a centros de acopio, que distribuyen las mismas a las fábricas para su procesamiento (Montufar, 2008).

Las nueces de tagua llegan a la factoría de animelas cuando la pulpa y la cáscara ya fueron removidas. Muchas ocasiones también, las industrias reciben la nuez sin cáscara, es decir, sin el endocarpio. Si este no es el caso, el endocarpio es removido con un mazo o martillo (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

- **Secado**

Las frutas de tagua que contienen semillas frescas deben ser secadas al sol para poder remover su cáscara y obtener la nuez y sus semillas (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). El tiempo de secado dependerá del estadio en el que llegue la fruta a la fábrica. Dicho tiempo podrá comprender entre 30 y 90 días, dependiendo de la frescura de la materia prima (Montufar, 2008) (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

Existen dos formas de secar la tagua. La primera consiste en exponerla al sol dispuesta en tendales; la segunda es hacerlo mediante el uso de un horno. Cabe resaltar que la fruta, en los tendales, debe ser volteada utilizando movimientos ligeros, con el objetivo de obtener un secado uniforme (Montufar, 2008).

Las semillas obtenidas de frutas frescas secadas al sol, muy frecuentemente, adquieren un color más claro que aquellas que son recolectadas directamente desde el piso. Esto hace que se den dos cualidades de materia prima para procesar: una clara llamada “tagua rubia” y una oscura llamada “tagua negra” (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

- **Pelado**

Una vez seca, la fruta de tagua pasa a un proceso de pelado. Este proceso se lo puede realizar de dos formas. De forma manual, mediante el uso de un machete u otro instrumento similar, o mediante el uso de una peladora automática. Producto del pelado, se obtiene la semilla totalmente limpia y lisa (Montufar, 2008).

- **Corte**

Las pepas pueden ser cortadas manualmente o mediante el uso de sierras rotatorias automáticas. Las tajadas son escindidas de forma paralela a la cara aplanada. El primer corte es solo utilizado si la cara externa es plana. Para este punto, lo que se obtiene son tajadas de tagua que tienen aún el tegumento, lo que les hace lucir como madera (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990).

De cada pepa se obtienen dos tajadas, cuyo tamaño depende de las pepas a cortar. Es importante decir que de todo el material solo el 7% es usado para producir las animelas. El 93% restante constituye residuo formado por recortes, principalmente (Montufar, 2008). El polvillo es utilizado como alimento para el ganado, para hacer balanceado junto con la adición de proteínas (Velásquez, 1998). El costo del polvillo se encuentra en 8 dólares el quintal. Los recortes, en cambio, se usan como combustible en hornos artesanales para la fabricación de ladrillos (Montufar, 2008).

Según investigaciones realizadas, los fabricantes de animelas reciben, en el mejor de los casos, 1 dólar por quintal de recortes. Sin embargo, por lo general, debido a que la demanda de este residuo por parte de los fabricantes de ladrillos es muy baja, las industrias de animelas buscan deshacerse de dicho residuo de cualquier forma, regalándolo o incluso pagando para que otras personas se lo lleven.

- **Verificación de tonalidades**

Tal y como se manifestó anteriormente, las semillas de la tagua adquieren un color diferente si son secadas o no, por el sol. Las tonalidades irán entre blanco, que es considerado como el tono ideal, hasta verde, que significará

que la semilla no está correctamente seca y que necesitará mayor tiempo de exposición al sol (Montufar, 2008).

- **Selección de tajadas**

Este proceso es realizado de forma manual y consiste en seleccionar las tajadas ideales para la elaboración de diferentes lineados. Los lineados son animelas con medidas establecidas, que son talladas en la operación del torneado (Montufar, 2008).

- **Torneado**

El proceso de torneado, que depende del lineado que se necesite lograr, se lo hace en un torno. Es allí donde se fija de forma exacta el ancho, largo, espesor y diámetro de la animela a producir (Montufar, 2008).

- **Empaque y almacenamiento**

Después de realizada la clasificación de los lineados producidos, se procede al empaque de los mismos, dependiendo de las exigencias del cliente. Una vez empaqueado, el producto es almacenado hasta su entrega al cliente final (Montufar, 2008).

1.2.3.2 Carbón Activado

1.2.3.2.1 Definición y características generales del carbón activado

El término carbón activado se da a aquellas materias carbonáceas que poseen grandes capacidades de adsorción. Este producto es considerado como un polímero orgánico complejo con una gran porosidad y elevada superficie específica (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos

de palma africana, 2007). Complementando esta definición, se puede afirmar que el carbón activado es una estructura amorfa compuesta por microcristales desordenados que crean una estructura porosa con una extensa área superficial disponible (Pazmiño, 2007).

El carbón activado es un adsorbente que se utiliza en la industria para distintas aplicaciones. Este material es empleado en procesos de purificación de sustancias tanto líquidas como gaseosas, en la recuperación de solventes y compuestos metálicos y en procesos catalíticos. Una de las propiedades más resaltables del carbón activado es su porosidad. Su amplia utilidad se debe, en gran manera, a esta característica. El carbón activado tiene un tamaño de poros tal que permite el ingreso de moléculas a su interior, confiriéndole una gran capacidad de adsorción, que lo distingue de otros materiales (Viswanathan, Sivasanker, & Ramaswamy, 2009) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

La adsorción es el fenómeno donde ocurre una fijación de un compuesto en la superficie de un sólido adsorbente, debido a la presencia de fuerzas de atracción. Esta adsorción puede ser de tipo física o química. En el caso del carbón activado, se puede evidenciar la presencia de ambos mecanismos de adsorción (Smith, 1998) (Viswanathan, Sivasanker, & Ramaswamy, 2009).

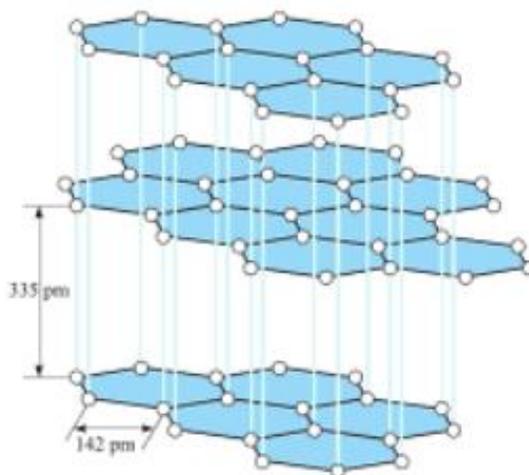
La adsorción física se caracteriza por su falta de especificidad y ocurre por las fuerzas de van der Waals presentes en las moléculas. Por otro lado, la adsorción química, que es específica, se da mediante un enlace químico covalente entre el compuesto y el adsorbente. Este tipo de adsorción, en contraste, ocurre solo en posiciones definidas denominadas “sitios activos” (Viswanathan, Sivasanker, & Ramaswamy, 2009) (Smith, 1998).

El valor comercial del carbón activado depende principalmente de sus características físicas. Es decir, de la superficie específica y la estructura porosa que este posea. Además, se toma en cuenta aspectos como su dureza, tamaño y volumen de poro (Mantilla, 1993).

1.2.3.2.1.1 Estructura del carbón activado

El carbón activado está estructurado de manera análoga al grafito. El grafito, variedad alotrópica del carbono, posee una estructura cristalina compuesta por capas paralelas de grafeno sumamente ordenadas. La Figura 11 ilustra la forma ordenada y simétrica del grafito (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Figura 11 : Estructura del grafito (Reboiras, 2006).



El grafeno es, justamente, cada una de las láminas paralelas compuestas por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Klein & Hurlbut, 1999).

Los carbones activados, por su lado, poseen dos estructuras básicas: (Oudenne, 1990) (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006) (Bansal & Goyal, 2005).

- Pequeñas regiones donde se encuentran microcristales. Estos microcristales son cien veces más pequeños que los encontrados en el grafito y están compuestos de capas de grafeno relativamente paralelas.
- Una desordenada estructura con forma de panel, agrupada como hojas al azar (Figura 12). Esta estructura “panelar” está compuesta de átomos de carbono ordenados hexagonalmente como HAPs con base bencénica.

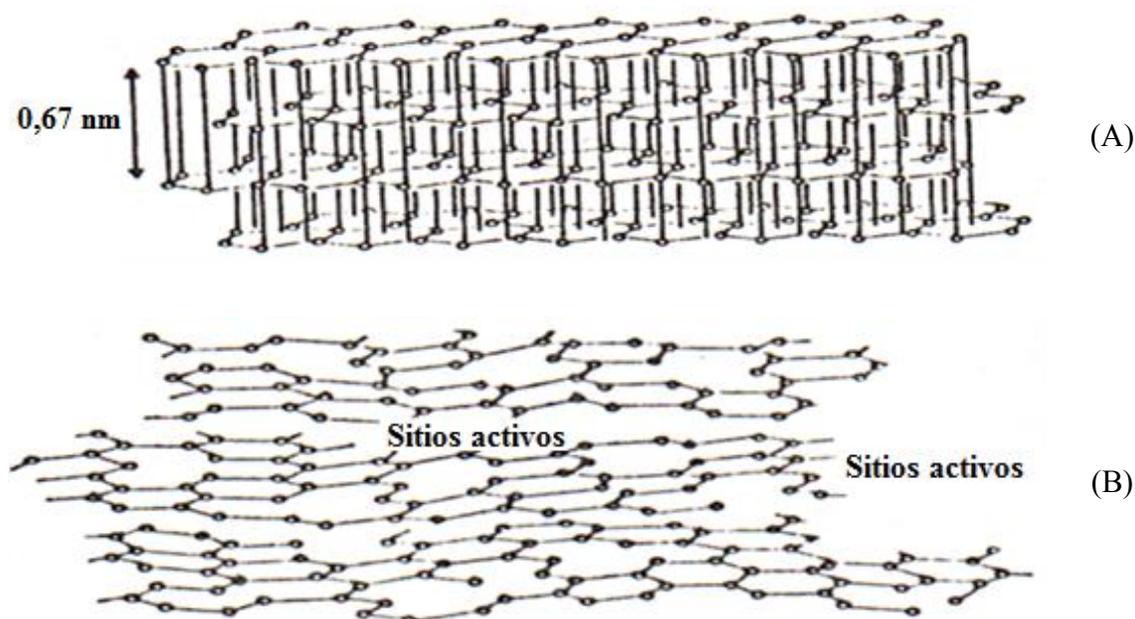
Figura 12 : Estructura “panelar” del carbón con aromáticos policíclicos, agrupada en forma de hojas al azar (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).



En la Figura 13 A se presenta un esquema de la estructura gráfica del carbón y en la Figura 13 B, la estructura más caótica que tiene el carbón activado donde se encuentran valencias

desapareadas que conforman los sitios activos, lugar en el que se lleva a cabo la adsorción química de los compuestos.

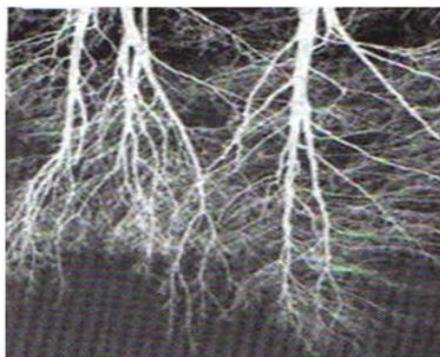
Figura 13 : (A) Estructura gráfica de los microcristales de carbón; (B) “Sitios activos” en la estructura desordenada del carbón activado. (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (de la Torre & Guevara, Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados, 2005)



Además, el carbón activado se caracteriza por tener en su estructura gran cantidad de poros ramificados y unidos. Es decir, sus microporos (con diámetro inferior a 2 nm), mesoporos (con diámetro entre 2 y 50 nm) y macroporos (tamaño mayor a 50 nm) están interconectados. Esta estructura característica es lo que hace que el carbón activado tenga una elevada superficie específica, la misma que oscila entre $500 - 2\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (Marsh &

Rodríguez-Reinoso, 2006) (Rodríguez-Reinoso & Molina, 2004). La Figura 14 muestra una representación esquemática de los poros del carbón activado.

Figura 14 : Negativo de una fotografía de las ramas de un árbol, que esquematiza la interconexión de los poros del carbón activado (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).



1.2.3.2.1.2 Propiedades de adsorción del carbón activado

Las propiedades de adsorción del carbón activado se deben a su:

- superficie específica.
- tamaño de los poros que permiten el acceso de moléculas al interior.
- alto grado de reactividad de la superficie (propiedades físico-químicas de superficie).

La elevada reactividad de la superficie del carbón está relacionada a las valencias desapareadas que se encuentran en la misma. Estas valencias son de tipo covalente y son justamente las que constituyen los sitios activos en el carbón activado. Además, existe adsorción por fuerzas tipo Van der Waals, mismas que se encuentran de forma natural en las moléculas

(Mardesen & House, 1992) (Oudenne, 1990) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006) (Menéndez, 2007).

Los macroporos, aunque tienen una superficie específica relativamente baja por su tamaño, sirven como conductos de ingreso hacia el interior del carbón activado, donde se encuentran los mesoporos y microporos presentes. Es justamente en este tipo de poros donde realmente se produce la adsorción. Sin embargo, el tamaño y forma de la molécula que se va a adsorber debe ser accesible a los mesoporos y microporos presentes (Oudenne, 1990) (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006) (Rodríguez-Reinoso & Molina, 2004).

1.2.3.2.2 Carbonización

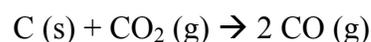
La producción de carbón activado requiere de una primera etapa llamada carbonización o pirólisis. La carbonización es básicamente un proceso de degradación de la materia orgánica, mediante el uso de alta temperatura. Esta se realiza, de mejor manera, en hornos donde se pueda tener un control de la atmósfera. La pirólisis debe ser llevada a cabo en una atmósfera pobre en oxígeno, lo que permitirá eliminar los productos volátiles y dejar en el material carbonizado un esqueleto de carbón y sustancias minerales remanentes (Gomez, Klose, & Rincón, 2008) (Oudenne, 1990).

La carbonización de la materia prima, por ejemplo, en el caso del cuesco de coco, se lleva a cabo a una temperatura de 600 °C. En este proceso, la estructura inicial, formada por celulosa, hemicelulosa o lignina es transformada en dos productos. En primer lugar se obtienen gases como alquitrán, levoglucosan, CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ y en segundo lugar se evidencia la formación de una estructura con forma de paneles compuesta por HAPs con base bencénica estructurada como hojas al azar. El material carbonizado tiene baja superficie específica, misma

que es inferior a $4 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006) (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (A, Klose, & Rincón, 2008) (Oudenne, 1990).

1.2.3.2.3 Activación física

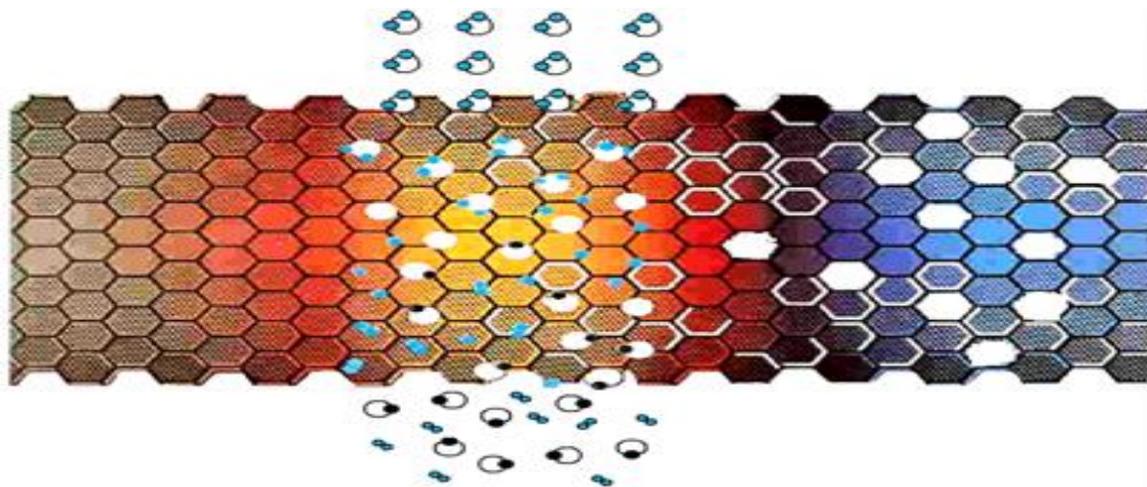
La activación física es un proceso que consiste en tratar el material previamente pirolizado en un horno usando una atmósfera rica en vapor de agua o dióxido de carbono. El proceso de activación se lo lleva a cabo entre un intervalo de temperatura de $800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. El objetivo de la misma es lograr que el material desarrolle una gran micro y mesoporosidad interna, aumentando de esta forma la superficie específica, según las siguientes reacciones:



La Figura 15 representa lo que ocurre en el proceso de activación mediante vapor de agua. En este modelo, las moléculas de agua se ponen en contacto con la estructura panelar del carbón y reaccionan con los átomos de carbono. Producto de esta reacción se genera CO e H₂. Es justamente por este fenómeno que se logra desarrollar una importante porosidad en la estructura del carbón activado (Mardesen & House, 1992) (Capelle & de Vooy, 1983) (Guevara, de la Torre, & Criollo, 2007). (Ludlow, 2001).

La forma y tamaño de poros que se formen en los carbones activados tras la activación, dependen de las características morfológicas y de las propiedades físicas y químicas de las materias primas empleadas. También influye el tipo de proceso de activación a utilizar.

Figura 15 : Representación del proceso de activación de carbón mediante vapor de agua, según la reacción Rx. 1 (Capelle & de Vooy, 1983).



El proceso de adsorción puede ser reversible en ciertos carbones activados. Los carbones activados de tipo granular son regenerados, restituyendo sus propiedades iniciales, mediante tratamientos térmicos con vapor de agua a temperaturas de alrededor de 200 °C. Es necesario también hacer un proceso de reactivación a temperaturas entre 800 – 1000 °C en atmósferas inertes o con vapor de agua. Tras el proceso de regeneración, sin embargo, la resistencia mecánica del carbón activado baja y el tamaño de los poros podría aumentar (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

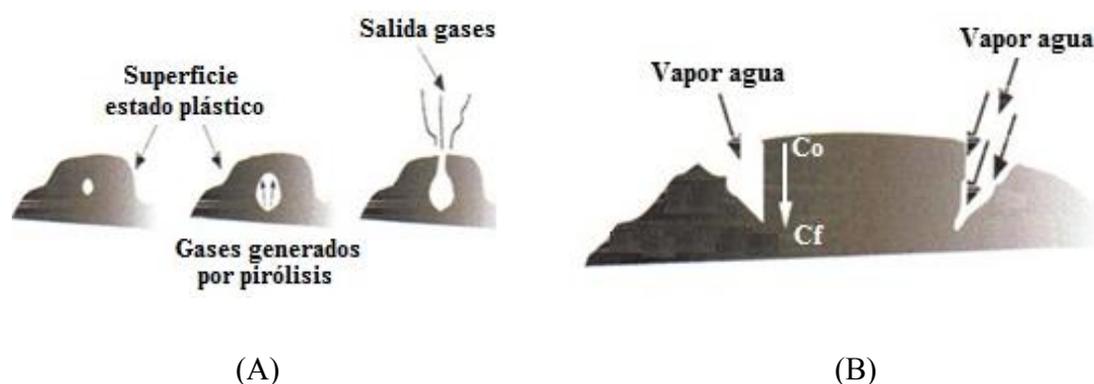
1.2.3.2.4 Activación Química

La activación química consiste en impregnar la materia prima con agentes deshidratantes fuertes como cloruro de zinc y ácido fosfórico. Después, este material es llevado a la etapa de carbonización, la misma que comprende la extrusión y pirolización del agente impregnado, a temperaturas entre 700 y 1100 K, en ausencia de aire. Esto provoca la degradación del material

celulósico y la creación de porosidad. La activación química, por lo general, genera carbones activados con poros más abiertos, ideales para ser utilizados para la adsorción de moléculas grandes (Pazmiño, 2007).

Complementando a los anteriormente expuesto, se puede decir que la activación química necesita el uso de un agente activante, que debe ser impregnado en el material a carbonizar, previamente a que el mismo ingrese al horno (Sarmiento et al., 2004). En este caso, los poros son generados por una acumulación de gases dentro del material durante la carbonización, según se esquematiza en la Figura 16 A. En contraste, la activación con vapor de agua, genera poros con forma cónica por ataque externo. Este modelo se esquematiza en la Figura 16 B (Guevara, de la Torre, & Criollo, 2007) (de la Torre & González, Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana, 2007).

Figura 16 : (A) Formación porosa por activación química; (B) Formación porosa por activación física (Bansal, Donnet, & Stoeckli, 1988) (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).



1.2.3.3 Procesos industriales para la producción de carbón activado

1.2.3.3.1 Producción de carbón activado a nivel industrial y tipos de hornos utilizados

La producción de carbón activado a nivel industrial puede ser hecha empleando dos métodos: por medio del uso de gases de reacción, proceso conocido como activación física, o mediante activación química. Sin embargo, se afirma que el proceso estándar a nivel mundial para la producción de carbón activado es mediante activación física, por facilidades de operación y menores costos (Gómez et al., 2010).

Los hornos empleados para la carbonización y activación del carbón pueden ser de diversos tipos:

- **Hornos de tierra**

Son los tipos de hornos más simples. Consisten en simples hoyos donde se coloca madera seca para ser carbonizada, y se cubre con tierra, permitiendo la entrada de aire. Este método tiene rendimientos de carbón comerciable relativamente bajos, pero también sus costos de operación e inversión son bajos (Mantilla, 1993).

- **Hornos de ladrillo**

Los hornos de ladrillo son uno de los métodos más efectivos para la producción de carbón. Representan una inversión de capital moderada, requieren poca mano de obra y además tienen buenos rendimientos (FAO, 1983).

Los hornos de ladrillo están diseñados de tal manera que su construcción es relativamente simple, pueden soportar tensiones térmicas al calentarse y enfriarse y es capaz de aguantar tensiones mecánicas (FAO, 1983). Además, permiten el mejor control y manejo de los gases de combustión (Mantilla, 1993).

Existen cuatro tipos de hornos de ladrillos: horno colmena brasilero, horno argentino media naranja, horno Schwartz y horno Missouri (FAO, 1983).

- **Horno de lámina metálica**

Son fácilmente transportables y tienen costos de conservación bajos. Sin embargo, presentan problemas debido a la pérdida de calor por irradiación, provocando que estos tengan rendimientos relativamente bajos (Mantilla, 1993).

- **Retortas**

Las retortas son cuerpos metálicos cilíndricos colocados de forma horizontal. En estos, una vez terminada la carbonización, el carbón aun incandescente es pasado a cámaras enfriadoras, evitando que este se consuma con el oxígeno del aire. Después, las retortas son vaciadas y vuelven a ser cargadas con materia prima, para iniciar otro proceso (Mantilla, 1993).

El horno tipo retorta tiene dos cámaras metálicas: en la primera yace la materia prima para ser carbonizada, aislándola del contacto directo de gases y fuego. La segunda tiene un mayor tamaño que la primera, ya que debe contener a esta última. En la segunda cámara circulan los gases calientes producidos para el calentamiento de la materia a carbonizar (Flores & Quinteros, 2008).

- **Horno Rotatorio**

Es el tipo de horno más utilizado en las industrias para la producción de carbón. Permiten la carbonización, activación y regeneración de adsorbentes. Son sumamente versátiles y pueden adaptarse a operaciones en continuo. Pueden ser construidos con capacidades muy pequeñas o grandes y ya en operación pueden,

sin problema, variar la capacidad de carga, temperatura y periodo de tratamiento térmico (Mantilla, 1993).

- **Horno de solera**

Los hornos de solera son hornos especiales usados para el tratamiento de minerales y se conocen por diferentes nombres como Herreshoff, McDougall, Wedge, Nichols, etc. Estos hornos están formados por una o varias soleras montadas unas sobre otras. En cada una de las soleras hay rastrillos movidos por un eje central común hueco que es enfriado con aire (Perry J. , 1981).

El material se carga por la solera más alta. Los brazos mueven la carga hacia el centro de la solera por donde cae a la siguiente. Después, la carga es empujada hacia la periferia, cayendo una vez más a la siguiente. De esta forma, este movimiento continua hasta abajo por todo el horno (Perry J. , 1981).

1.2.4 Hipótesis

El diseño de un proceso para la producción de carbón activado a partir de residuos de tagua es factible técnica y económicamente.

1.2.5 Identificación y caracterización de variables

- Variable independiente: Residuos de tagua (recortes), condiciones de activación y carbonización.
- Variable dependiente: calidad de carbón activado a obtener.

CAPÍTULO II

MÉTODO

2.1 Nivel de estudio

Esta investigación tendrá nivel exploratorio y descriptivo. Es exploratoria ya que el muestreo se realizará en campo y la investigación en laboratorios especializados con hornos de atmósfera controlada. La toma de muestras de residuos se la hará en la ciudad de Manta en la empresa Angy Tagua, misma que se dedica a la producción de animelas. La investigación estará estructurada en base a revisiones bibliográficas previas, opiniones de expertos y ensayos a realizarse en los laboratorios del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

Además, se puede decir que la investigación es descriptiva ya que busca detallar el proceso de producción más conveniente para la fabricación de carbón activado utilizando los residuos de tagua.

2.2 Modalidad de Investigación

La modalidad adoptada para la presente investigación es de campo, ya que las muestras se tomarán in situ y de proyecto especial ya que se pretende que sus resultados lleven a la creación de productos tangibles (carbón activado manufacturado con residuos de tagua). Este producto permitirá solucionar la necesidad de valorizar estos residuos de mejor manera y dar una alternativa de uso de los mismos, ambientalmente amigable y económicamente interesante y rentable.

2.3 Método

La información obtenida para realizar esta investigación permite que la misma tome el carácter inductivo – deductivo. En este caso, se deberá aplicar la deducción de un

procedimiento para determinar las operaciones de un proceso válido para la producción de carbón activado usando residuos de tagua.

Esta investigación se basará en el proceso de producción de carbón activado a partir de cuesco de palmiste, para la producción de carbón activado aprovechando los residuos generados en la industria de animelas de tagua.

2.4 Población y muestra

Este estudio no tiene una población identificable, por lo que no se tomará una muestra en campo mediante un método de muestreo estadístico. Esto se basa en que en el Ecuador existen solo dos variedades de tagua en tres regiones plenamente identificadas: *Phytelephas Aeroquatorialis* que se encuentra en la región Costa y *Phytelephas Macrocarpa* que está en la Sierra y en la Amazonía (Montufar, 2008).

Esta investigación tomará la especie *Phytelephas Aeroquatorialis* para la realización de las pruebas experimentales, ya que el residuo de tagua que se usará proviene de la ciudad de Manta. Además, se puede decir que la tagua no presenta derivaciones que podrían cambiar su composición o estructura (Montufar, 2008).

Ante esto, se puede aseverar que la muestra del residuo (recortes) tomada en campo no tendrá variación significativa si el muestreo es realizado en la misma región geográfica, ya que existe solo una especie de la planta presente en esta región. Además, el enfoque de este estudio es el diseño de un proceso para la producción industrial de carbón activado y el análisis económico de la inversión.

2.5 Selección de instrumentos de investigación

Para el desarrollo de esta investigación se usarán las instalaciones del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, quien ha puesto en disposición sus equipos para la realización de este estudio.

Los instrumentos de investigación seleccionados son:

- Estufa.
- Balanza analítica.
- Horno Nichols Herreshoff mono solera para ensayos a nivel piloto.
- Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).
- Termobalanza analítica.
- Plancha de calentamiento.
- Colorímetro.

2.6 Validez y confiabilidad de los instrumentos

Antes de usar los instrumentos mencionados, se deberá validar la confiabilidad de los mismos. Se asegurará que los equipos estén midiendo de forma fiable y que se encuentren previamente calibrados. Para esto, se consultarán los certificados de calibración de los equipos a utilizar. Ver en Anexo C una muestra de los certificados de calibración de los instrumentos.

2.7 Procesamiento de datos

Los datos serán procesados mediante el paquete de Microsoft Office (Excel y Word). También se usará registros escritos durante la operación del horno, para controlar las condiciones del mismo, constantemente.

Herramientas como Microsoft Visio y PowerPoint serán utilizadas para presentar el diseño conceptual de la planta de carbón activado a partir de residuos de tagua.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Levantamiento de datos

La cantidad de residuo proporcionado por la empresa Angy Tagua para la realización de los ensayos fue de 45 kg. Este residuo será procesado en su totalidad, con el fin de determinar la calidad y cantidad de carbón activado que puede obtenerse con esta materia prima. La Figura 17 muestra los recortes de tagua que serán carbonizados y activados. Al tipo de residuo mostrado en la figura de la izquierda (A) se lo conocerá como “tagua maciza” y al residuo mostrado en la figura de la derecha (B) se lo nombrará como “tagua agujereada”.

La metodología utilizada para el procesamiento del residuo de tagua estará basada en el artículo publicado por de la Torre y González (2007) sobre producción de carbón activado a partir de cuescos de palmiste.

Figura 17: (A) Recortes de tagua. (B) Residuo de la producción de animelas. Fuente: Autor



(A)

(B)

Con el fin de obtener todos los datos necesarios para el diseño, se seguirán los siguientes procedimientos a nivel laboratorio y piloto:

3.1.1 Ensayos de laboratorio

A nivel laboratorio se realizarán los siguientes ensayos:

Análisis Próximo:

El Análisis Próximo consiste en determinar el porcentaje de humedad, volátiles, cenizas y carbón fijo de la materia prima inicial. Este ensayo se hará según las normas: ASTM D 2866-70 para cenizas, ASTM D 3175-77 para volátiles, ASTM D 2862-82 para humedad y el carbón fijo se calculará por diferencia. La metodología consiste en la calcinación de la muestra a 950 °C. La pérdida de peso determina la composición de la materia prima.

Índice de Yodo

El ensayo del Índice del Yodo permite determinar la cantidad de microporos que tiene un carbón activado. El valor obtenido con este ensayo es muy parecido al reportado con un equipo analizador de superficie específica que emplea el método de análisis BET (de la Torre *com. pers.*, 2013). La metodología, basada en la norma ASTM D4607-86, consiste en poner en contacto una solución de yodo con carbón activado y después de filtrarla, la solución resultante debe ser valorada con tiosulfato de sodio y almidón.

Índice de decoloración de azúcar

El índice de decoloración de azúcar permite determinar si un carbón activado es apto para decolorar los jarabes de azúcar, proceso muy habitual en la industria de gaseosas. Este método ha sido estandarizado por Coca-Cola y se toma como base para determinar dicha propiedad en los carbones activados.

El ensayo consiste en poner en contacto carbón activado en polvo con una solución de azúcar. Después, la solución filtrada es medida con un colorímetro, para determinar la decoloración de la muestra inicial. En todas las pruebas se debe usar una solución hecha con el mismo tipo de azúcar, para poder comparar (CocaCola, 2002).

El método utilizado calcula las Unidades Básicas de Referencia (UBR) para establecer el nivel de decoloración. Estas normas establecen que un jarabe es aceptable cuando su valor de UBR es menor a 35, si el jarabe de azúcar inicial está hecho a base de azúcar refinada (CocaCola, 2002).

Como se había mencionado, el jarabe decolorado después de la prueba debe ser analizado por un colorímetro a dos longitudes de onda diferentes: 430 nm y 710 nm. Una vez determinada la lectura, se debe aplicar la siguiente ecuación para calcular las UBR (CocaCola, 2002):

$$UBR = \frac{1000 * Abs(430\text{ nm}) - 2 * Abs(710\text{ nm})}{0.77188}$$

Cabe resaltar que es necesario el uso de un carbón de referencia para poder comparar los resultados obtenidos después de la prueba. En este caso, se utilizará un carbón activado lignítico cuya marca comercial es DARCO, mismo que es utilizado por Coca-Cola para sus procesos de decoloración de azúcar (de la Torre *com pers*, 2012). Para la prueba se usará una muestra de azúcar morena y otra de azúcar refinada.

Índice de Azul de Metileno

El Índice de Azul de Metileno está basado en las normas CEFIC. Este ensayo permite determinar la capacidad que tiene un carbón activado de adsorber moléculas en sus mesoporos. El ensayo consiste en establecer el volumen de solución de azul de metileno que puede decolorar 0.1 g de carbón activado. La determinación de la decoloración de la muestra inicial se realiza con un colorímetro (CEFIC, Conseil Europeen des Federations de l'Industrie Chimique).

Como en la prueba de decoloración de azúcar, es necesario tener un carbón de referencia que permita comparar los datos obtenidos. Igualmente se usará el carbón activado Darco para dicho cometido (de la Torre *com pers*, 2013).

Densidad aparente y ángulo de reposo

Se determinará la densidad aparente del residuo inicial, del material carbonizado y del producto activado puesto que estos datos serán necesarios para el posterior diseño del proceso de producción. El proceso para determinar este parámetro es simple: consiste en tomar un recipiente de volumen conocido y llenarlo de material. El recipiente lleno es pesado y posteriormente es llenado de agua y se pesa nuevamente. El cociente entre ambos pesos dará como resultado el valor de la densidad aparente del material (de la Torre E. , 2011). Además, se deberá determinar el ángulo de reposo de los 3 materiales: residuo, calcina y carbón activado.

Microscopía Electrónica

Se obtendrán imágenes del material por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con detector de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva. De esta forma se podrá observar la porosidad característica desarrollada por el residuo de tagua tras el proceso de carbonización y activación. Además, se analizará el residuo inicial para poder comparar y describir cuál es el efecto de la pirolisis y la activación en la estructura del material.

Se realizará también un análisis elemental del material gracias al detector de fluorescencia del MEB, para determinar los elementos presentes en el carbón activado de tagua.

Análisis Termo-Gravimétrico

Con una termobalanza analítica, se determinará el poder calorífico de los recortes de tagua y se obtendrá una curva, mediante un análisis termo-gravimétrico, que relacionará la pérdida de peso de la muestra en función a la variación de la temperatura, con una tasa de calentamiento constante. Estos resultados serán fundamentales para las pruebas piloto de carbonización.

Análisis de biopolímeros

Se determinará la composición del residuo (recortes), con el fin de poder comparar la misma, con las composiciones de materias primas semejantes como cuescos de coco. Esto ayudará a explicar el comportamiento del residuo durante las fases del proceso de carbonización y activación, así como el cambio de estructura del mismo, durante estas fases. Además, el objetivo de este análisis es comparar los resultados obtenidos con los encontrados en revisiones bibliográficas.

El presente análisis se realizará basándose en las normas Tappi T-412-M(6), Tapi T-6-os-59, Tapi T-17-M-55 y Tapi-13-os-54. Cabe resaltar que las normas Tappi son aplicadas para análisis de madera. Sin embargo, al no existir una metodología establecida para determinar la composición del residuo de tagua, los análisis serán realizados a condiciones más drásticas (Acuña, 2012).

Técnicas de muestreo

Para asegurar el muestreo representativo del material al realizar los ensayos de laboratorio antes mencionados, se usarán métodos de preparación de muestras. Estos métodos consisten en tres operaciones principales:

- Reducción de tamaño: ciertos ensayos que exigen que la muestra sea pulverizada.
- Homogenización: la muestra será homogenizada mediante el Método sobre Hoja, que consiste en desplazar el material de una extremidad a otra en un soporte flexible como una hoja de papel o plástico.
- Muestreo: El muestreo será realizado mediante un divisor de rifles tipo Jones, como el de la Figura 18 (de la Torre E. , 2011).

Figura 18: Divisor de rifles tipo Jones. Fuente: Autor



3.1.2 Ensayos piloto

A nivel piloto, se realizarán los siguientes ensayos en un horno Nichols de Mono Solera, que puede controlar su atmósfera de operación de acuerdo al factor lambda. El horno opera con GLP y puede trabajar en atmósfera oxidante ($\lambda > 1$, rica en oxígeno) o en atmósfera reductora ($\lambda < 1$, pobre en oxígeno):

Pruebas de carbonización

Las pruebas de carbonización se llevarán a cabo con los 2 tipos de recortes en atmósfera pobre en oxígeno ($\lambda = 0.92$). El objetivo de este ensayo es determinar la cinética de la pirólisis y el rendimiento del proceso. Se trabajará a diferentes temperaturas, mismas que oscilarán entre 400°C y 500°C. Estas temperaturas referenciales son determinadas mediante el análisis termo-gravimétrico realizado con la termobalanza.

El proceso de carbonización busca eliminar la mayor cantidad de volátiles en la materia prima. Por ende, el ensayo que indicará el tiempo óptimo de carbonización es el Análisis Próximo. Para esto, se tomará varias muestras durante el proceso de pirólisis. Además, como ya se había mencionado, se tomarán en cuenta los datos del análisis termo-gravimétrico, donde se mostrará una referencia de la temperatura óptima a la que se debe trabajar para realizar la carbonización.

Se trabajará en lecho fijo, mediante el uso de un tiesto de barro, donde se colocará el material. El tiesto irá girando a razón de 4 RPM, para asegurar una homogénea carbonización. La Figura 19 muestra el residuo de tagua maciza en el tiesto que será colocado en el horno y la Figura 20 muestra dicho residuo en proceso de carbonización.

Figura 19 : Tagua maciza en tiesto lista para ser carbonizada. Fuente: Autor



Figura 20 : Tagua maciza dentro de Horno Nichols en proceso de carbonización. Fuente: Autor



Pruebas de activación

El material carbonizado será después activado en una atmósfera pobre en oxígeno ($\lambda=0.92$), mediante la inyección de vapor de agua. Se realizará pruebas a 2 temperaturas diferentes: 850°C y 920°C, inyectando 15 L/h de vapor en ambos casos. Se buscará determinar el tiempo que se demora el material pirolizado en activarse y el rendimiento del proceso.

La prueba que indicará el momento en que el material ya está activado y debe ser descargado es el Índice de Yodo. Un carbón activado con Índice de Yodo mayor a 900 g I₂ / g CA ya es comercializable y considerado apto para tratamiento de aguas. Además, se dice que los microporos son los primeros en aparecer en el proceso de activación, razón por la cual, el Índice de Yodo es el valor determinante para esta prueba (de la Torre, *com.pers*, 2012).

Se tomará muestras cada hora durante el proceso de activación, para determinar el Índice de Yodo del carbón en el momento y poder decidir si se descarga el producto o si se deja una hora más. Se trabajará con lecho agitado a 4 RPM. La Figura 21 muestra el carbón de tagua dentro del Horno Nichols antes de la activación.

Figura 21 : Carbón en Horno Nichols listo para ser activado. Fuente: Autor



3.2 Presentación y análisis de resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a nivel laboratorio y piloto son los siguientes:

Análisis de biopolímeros del residuo inicial

Tabla 1 : Resultados de los análisis de biopolímeros. Muestra: Materia prima inicial. Fuente:

Autor

Análisis de Biopolímeros	
Parámetro	Resultados (%)
Celulosa	5,26
Lignina	21,54
Manano**	71,9
Ceniza	1,3

** El valor del manano en la muestra fue calculado por diferencia.

El análisis de biopolímeros muestra que la tagua está compuesta primordialmente por manano, corroborando los datos encontrados en referencias bibliográficas donde se menciona que el principal componente de la pared celular del endosperma de la semilla de tagua es este polisacárido, constituyendo el 70% de la fruta madura (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). Esto diferencia a la tagua de otras materias primas que se usan para la producción de

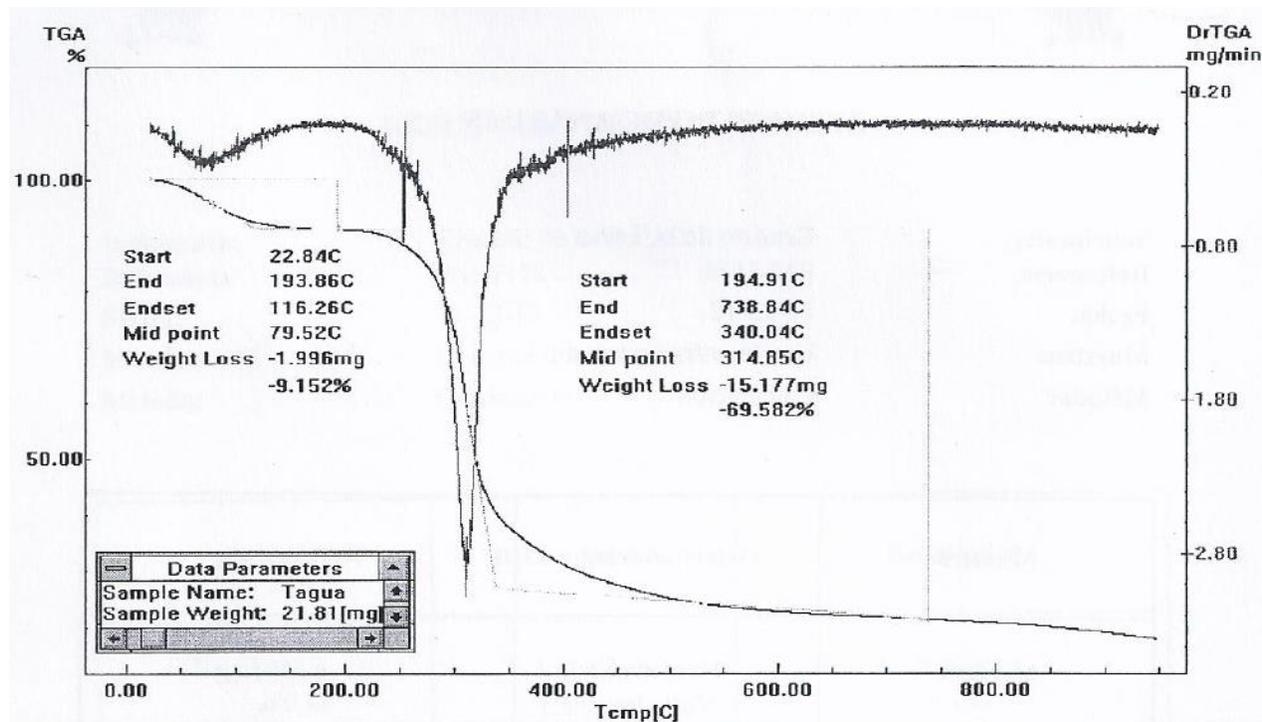
carbón activado como el coco o el cuesco de palma, cuyo principal constituyente es la celulosa.

La dureza de la tagua se debe, justamente, a la cantidad de manano que la misma posee. Sin embargo, según lo observado en las pruebas de laboratorio, cuando la tagua se piroliza y se activa, dicha dureza desaparece totalmente, obteniendo un carbón activado extremadamente frágil.

Análisis Termo-Gravimétrico

- *Poder calorífico de los recortes de tagua:* 15840.4 (J/g)
- *Análisis termo-gravimétrico* (Figura 22)

Figura 22 : Análisis Termo-Gravimétrico de los recortes de tagua. Fuente: Autor



La Figura 22 muestra el resultado del análisis termo-gravimétrico. En esta figura se puede observar que el material volátil es eliminado de la materia prima inicial a una temperatura de aproximadamente 300°C, provocando la pérdida de un 70% del peso de la muestra a esa temperatura. Estos datos servirán como referencia para establecer las condiciones de trabajo a las cuales se deberá operar el horno Nichols durante las pruebas a nivel piloto. Además, este análisis permite inferir el rendimiento que se logrará en la pirolisis a nivel industrial.

Resultados Carbonización

La Tabla 2 y Tabla 3 muestran a detalle los resultados obtenidos en la carbonización. Después de efectuar esta prueba, se pudo determinar que 1 kg de residuo de tagua, sin importar su morfología (maciza o agujereada) se demora media hora en carbonizarse aproximadamente, trabajando a temperaturas entre los 400 y 500 °C, $\lambda= 0.9$ y lecho fijo. El rendimiento promedio para ambos tipos de recortes es muy similar también. Adicionalmente, se realizó una prueba de carbonización a 900 °C.

Tabla 2 : Resultados de la prueba de pirolisis a 400-500 °C. Condiciones de trabajo:

Temperatura: 400-500 °C, $\lambda= 0.9$, tipo de lecho: fijo, Carga: 1 kg. Fuente: Autor

Resultados de la pirolisis (carbonización)	
Parámetro	Resultado
Muestra	Tagua Maciza y agujereada
Rendimiento Promedio	29,95%
Tiempo promedio	30 min

Tabla 3 : Resultados de la pirólisis a 900 °C. Condiciones de trabajo:

Temperatura: 900 °C, $\lambda= 0.9$, tipo de lecho: fijo, Carga: 1 kg. Fuente: Autor

Resultados de la pirólisis (carbonización)	
Parámetro	Resultado
Muestra	Tagua maciza y agujereada
Rendimiento Promedio	28,64%
Tiempo promedio	15 min

Resultados activación

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en las pruebas de activación del carbón de tagua, trabajando a dos diferentes temperaturas en atmósfera reductora con $\lambda= 0.9$. Para dichas pruebas se usó indistintamente carbón de tagua maciza o agujereada puesto que ambos residuos dieron resultados muy similares durante la carbonización.

Tabla 4: Resultados de la prueba de activación del carbón de tagua Prueba 1 y Prueba 2. Fuente:

Autor

Resultados de activación		
Número de Ensayo	Prueba 1	Prueba 2
Temperatura de trabajo	920 °C	850 °C
Tiempo de activación	3 h	4 h
Vapor Alimentado	15 L/h	15 L/h
Carga inicial	4000 g	3329 g
Carga final (Carbón Activado)	1177,4 g	1283 g
Gasificación	70,57%	61,4 %
Rendimiento	29,43%	38,6 %
# Iodo	1000 mg I ₂ /g CA	1009 mg I ₂ /g CA
Atmósfera	$\lambda= 0,9$	$\lambda= 0,9$

Como se puede observar, a una temperatura de trabajo de 920 °C, el tiempo de activación es de 3 horas, obteniendo un rendimiento de 29.43%, mientras que cuando la temperatura de activación baja a 850 °C, el tiempo de activación sube a 4 horas y se obtiene un rendimiento mayor de 38.6%. En ambas condiciones se produce un carbón activado con un índice de yodo de 1000 mg I₂/g CA, mismo que podría ser comercializable para tratamiento de aguas y gases.

La Figura 23 ilustra la descarga de carbón activado de tagua del horno Nichols mono solera.

Figura 23: Descarga carbón activado. Temperatura de trabajo: 920°C; atmósfera reductora $\lambda=$

0.9. Fuente: Autor



Análisis Próximo

La Tabla 5, Tabla 6 y Figura 24 muestran los resultados obtenidos en el análisis próximo tanto de la materia prima inicial como del carbón de tagua durante el proceso de pirolisis.

Tabla 5 : Análisis próximo de una muestra de tagua. Fuente: Autor

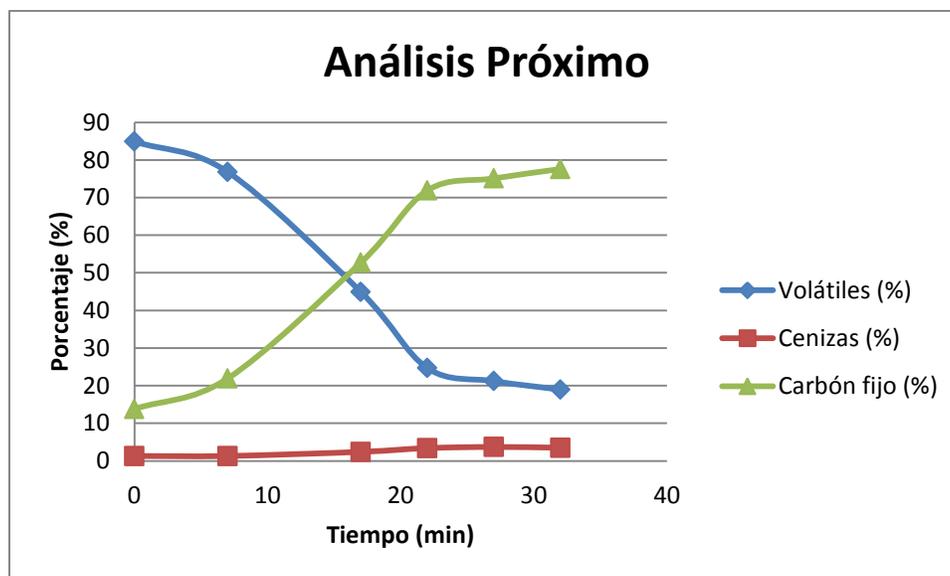
Análisis Próximo	
Muestra: Tagua materia prima inicial (MI)	
Parámetro	Resultados (%)
Humedad	6,3
Volátiles	84,9
Cenizas	1,3
Carbón Fijo	13,8

El análisis próximo de la materia prima inicial (Tabla 5) muestra que la tagua está compuesta en su mayor parte por material volátil. El objetivo de la carbonización es eliminar dicho material y formar una estructura carbonácea antes de la activación. Esto significa que, durante este proceso, se tratará de eliminar la mayor parte del contenido de material volátil de la materia prima, lo que explicaría el 30% de rendimiento obtenido durante las pruebas de pirolisis.

Tabla 6 : Análisis próximo detallado de muestras de carbón de tagua durante el proceso de pirolisis. Fuente: Autor.

Análisis Próximo				
Número Muestra	Tiempo (min)	Volátiles (%)	Cenizas (%)	Carbón fijo (%)
Materia prima Inicial	0	84,9	1,3	13,8
Muestra 1	7	76,82	1,3	21,9
Muestra 2	17	44,94	2,4	52,7
Muestra 3	22	24,68	3,4	71,9
Muestra 4	27	21,21	3,7	75,1
Calcina	32	18,94	3,5	77,6

Figura 24: Análisis próximo detallado de muestras de carbón de tagua tomadas en varios momentos durante el proceso de pirolisis. Fuente: Autor



Como se puede ver en la Tabla 6 y en la Figura 24, conforme pasa el tiempo de carbonización, existe una disminución del contenido de material volátil y un incremento del contenido de carbón fijo (correspondiente al cuerpo carbonáceo desarrollado durante la pirolisis). Asimismo, se puede observar que el tiempo óptimo de carbonización es 30 minutos, puesto que después de este instante ya no se observa una disminución sustancial del contenido de material volátil de la muestra, volviéndose la curva casi constante. Además, durante el ensayo, el contenido de cenizas (correspondiente al material mineral del residuo) incrementa su porcentaje levemente.

Índice de Yodo

La Tabla 7 y la Figura 25 muestran los resultados obtenidos de los análisis del índice de yodo para la Prueba 1 de activación y la Tabla 8 y la Figura 26 ilustran estos resultados para la Prueba 2 de activación.

La prueba del índice de yodo realizada a diferentes tiempos durante el proceso de activación permite observar el desarrollo de la cinética de activación, puesto que dicho índice mide la formación de microporos en el carbón.

Tabla 7 : Resultados de los análisis del índice de yodo realizados durante el proceso de activación en la Prueba 1. Fuente: Autor.

Muestra	Tiempo (horas)	Índice de Yodo mg I₂/g CA
Carbón Inicial	0	< 233
1hC1	1	437
2hC1	2	960
3hC1	3	973
C1	3,1	1000

Figura 25: Cinética de activación de la Prueba 1 basada en la medición del índice de yodo a diferentes momentos. Fuente: Autor

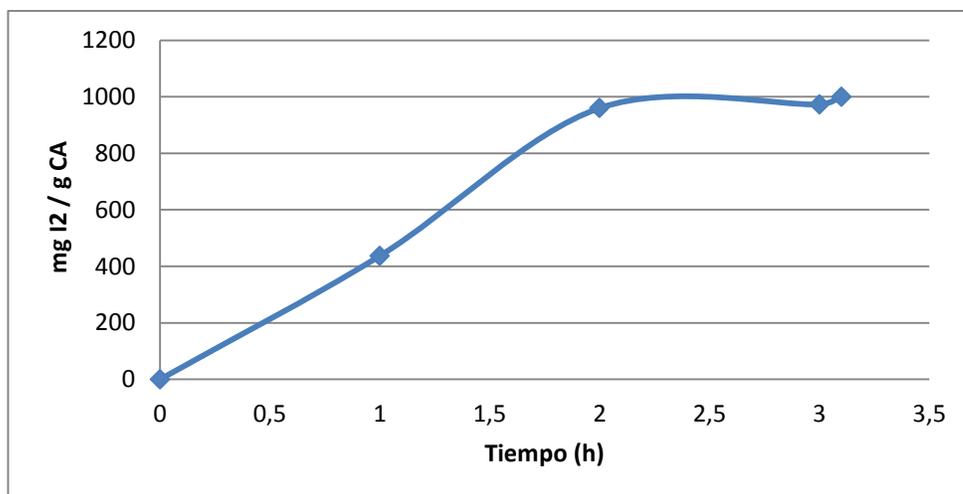
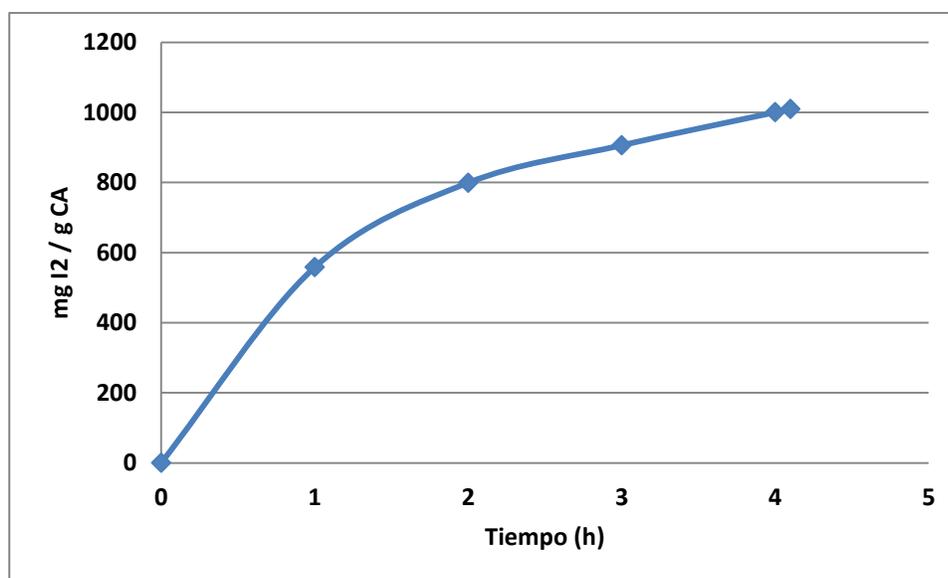


Tabla 8 : Resultados de los análisis del índice de yodo realizados durante el proceso de activación en la Prueba 2. Fuente: Autor.

Muestra	Tiempo (horas)	Índice de Yodo mg I ₂ /g CA
Carbón Inicial	0	< 233
1hC2	1	558
2hC2	2	799
3hC2	3	906
4hC2	4	1000
C2	4,1	1009

Figura 26 : Cinética de activación de la Prueba 2 basada en la medición del índice de yodo a diferentes momentos. Fuente: Autor



La Tabla 7 y la Figura 25 muestran la cinética de activación a 920 °C, medida gracias al parámetro del índice de yodo. Como se puede observar, a las 3 horas de activación se alcanza un índice de yodo superior a 1000 mg I₂/g CA, tiempo después del cual, la curva se vuelve casi constante, por lo que se concluye que la activación es óptima en este tiempo. Asimismo, la Tabla 8 y la Figura 26 muestran que trabajando a una temperatura 850 °C, el tiempo óptimo de activación es 4 horas, obteniendo un índice de yodo superior a 1000 mg I₂/g CA.

Índice de Azul de Metileno

La Tabla 9 presenta los resultados del índice de azul de metileno para el carbón activado de tagua identificado como C2. Como se puede ver, también se reportan los resultados encontrados en la prueba para el carbón de referencia Darco.

Tabla 9 : Resultados del índice de azul de metileno para el carbón activado de tagua. Fuente:

Autor.

Muestra	Absorbancia (%)	Índice de AM (g AM/100 g CA)
Darco	0,46	19
C2	0,53	17

Con esta prueba se puede observar que el carbón activado de tagua puede ser utilizado para la decoloración de aguas residuales con colorantes orgánicos como el azul de metileno, práctica común en las industrias textiles. El carbón activado de tagua obtiene una decoloración muy similar al carbón de referencia Darco.

Índice de Decoloración de Azúcar

La Tabla 10 y la Tabla 11 presentan los resultados del índice de decoloración de azúcar para el carbón activado de tagua. Como se puede ver, también se reportan los resultados encontrados en la prueba para el carbón de referencia Darco.

Tabla 10 : Resultados del índice de decoloración de azúcar para el carbón activado de tagua con jarabe inicial de azúcar morena. Fuente: Autor.

Muestra	Absorbancia (%) a 430 nm	Absorbancia (%) a 710 nm	Unidades básicas de referencia (UBR)
Solución inicial de azúcar morena 60° Brix	0,70	0,10	906,62
Darco	0,10	0,01	129,53
C2	0,78	0,17	1010,08

Tabla 11 : Resultados del índice de decoloración de azúcar para el carbón activado de tagua con jarabe inicial de azúcar refinada. Fuente: Autor.

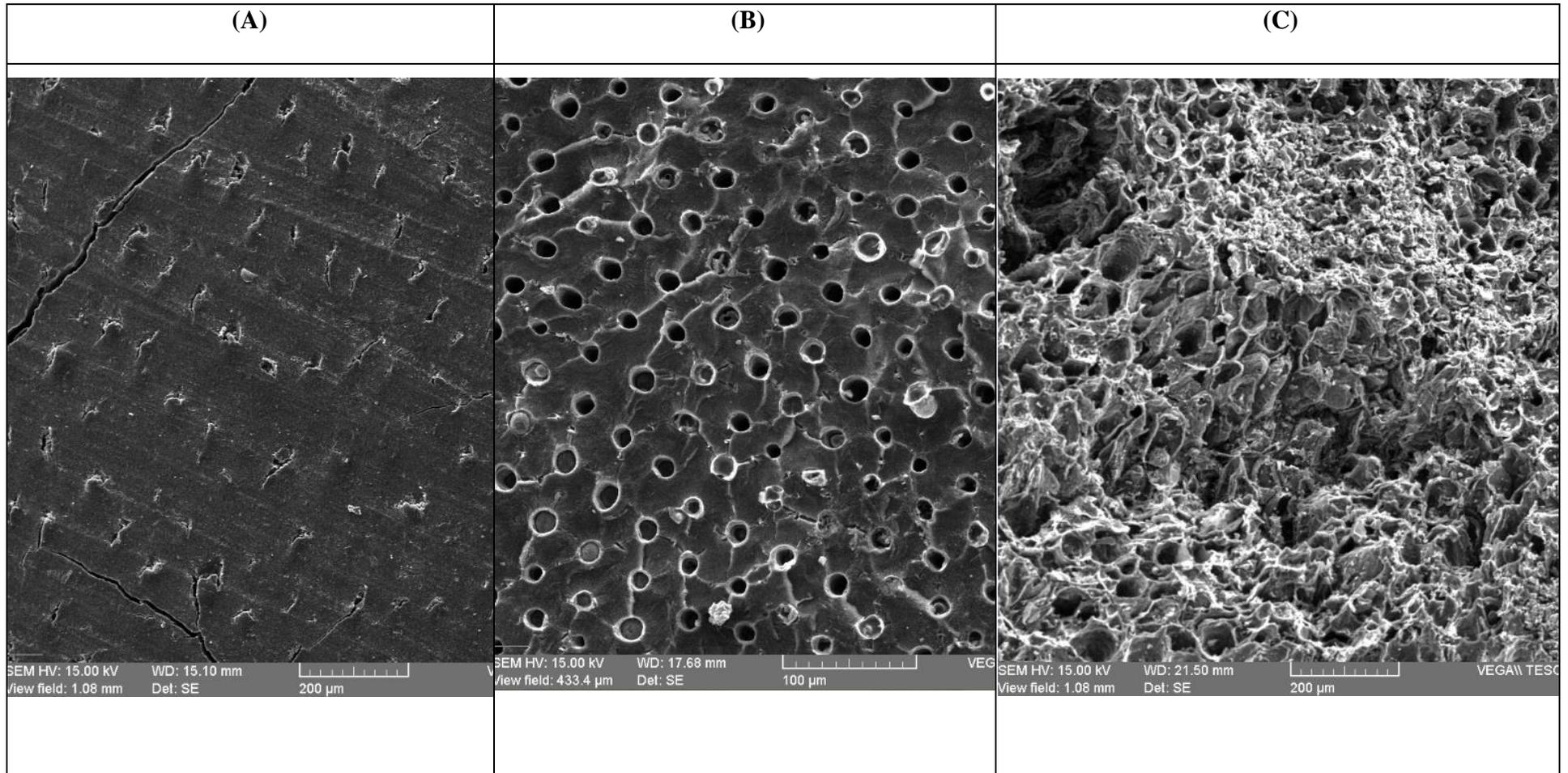
Muestra	Absorbancia (%) a 430 nm	Absorbancia (%) a 710 nm	Unidades básicas de referencia (UBR)
Solución inicial de azúcar refinada 60° Brix	0,12	0,02	148,94
Darco	0,01	0,00	12,96
C2	0,14	0,07	181,19

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos en la decoloración del jarabe de azúcar morena. Como se puede observar, el carbón de referencia Darco logra una decoloración mucho mayor que el carbón activado de tagua C2. La Tabla 11, correspondiente a la prueba de decoloración de azúcar blanca, corrobora que el carbón activado de tagua no podrá ser utilizado para la decoloración de azúcar debido a que no logra decolorar la solución inicial a un grado inferior a 35 UBR, a diferencia del carbón de referencia Darco. Incluso se puede observar que para ambos casos, el carbón de tagua C2 obtiene una solución final con un grado UBR más alto que el de la solución inicial, lo que significa que carbón ultrafino pasa el filtro y no puede ser retenido. Este resultado muestra también que el carbón activado de tagua es un carbón microporoso esencialmente, y no que posee un tamaño de poro que permita atrapar macromoléculas.

Microscopía electrónica

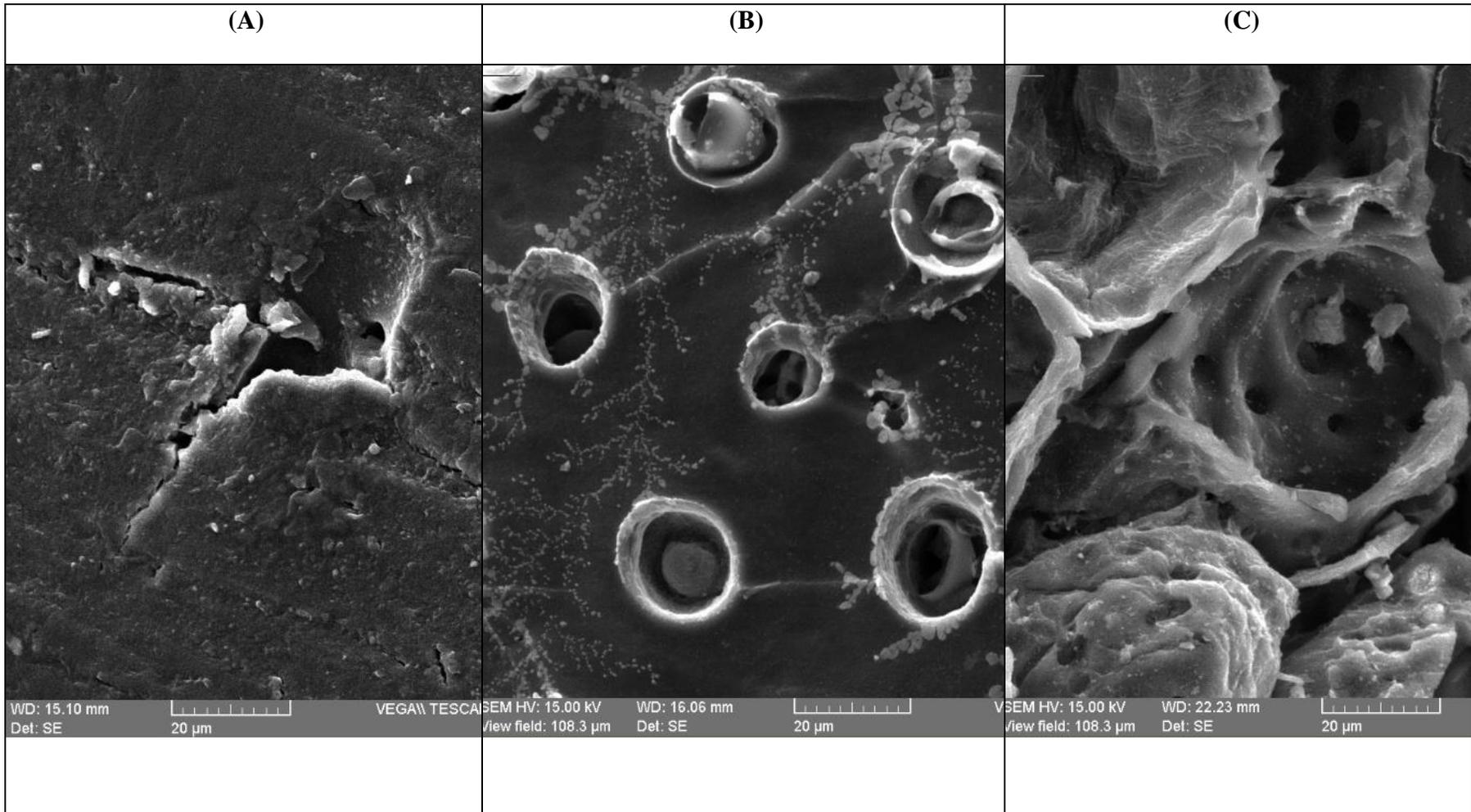
Por medio del uso del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con detector de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva se pudo observar la porosidad característica desarrollada por el residuo de tagua tras el proceso de carbonización y activación. Además, se analizó el residuo inicial para poder comparar y describir cuál es el efecto de la pirólisis y la activación en la estructura. La Figura 27 y la Figura 28 muestran el residuo de tagua en todas las fases del proceso de producción. La Figura 29 indica una muestra de cuesco de palma, materia prima común utilizada para la producción de carbón activado, para poder realizar una comparación entre la estructura de la tagua y la estructura del cuesco de palma, durante todo el proceso. Por último, la Figura 30 muestra una comparación entre la distribución celular del endosperma de la tagua y la estructura del carbón de tagua después de la pirólisis.

Figura 27: Imágenes MEB (aumento 200 x) en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de tagua: a) materia prima inicial, b) carbón de tagua, c) carbón activado de tagua. Fuente: Autor



DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE TAGUA PROVENIENTES DE MANTA, EN EL PERIODO 2012 -2013.

Figura 28: Imágenes MEB (aumento 2000 x) en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de tagua: a) materia prima inicial, b) carbón de tagua, c) carbón activado de tagua. Fuente: Autor



DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS DE TAGUA PROVENIENTES DE MANTA, EN EL PERIODO 2012 -2013.

Figura 29: Imágenes MEB en las diferentes etapas de producción de carbón activo a partir de cuesco de palma: a) materia prima inicial, b) carbón de cuesco de palma, c) carbón activado de cuesco de palma. Fuente: Autor

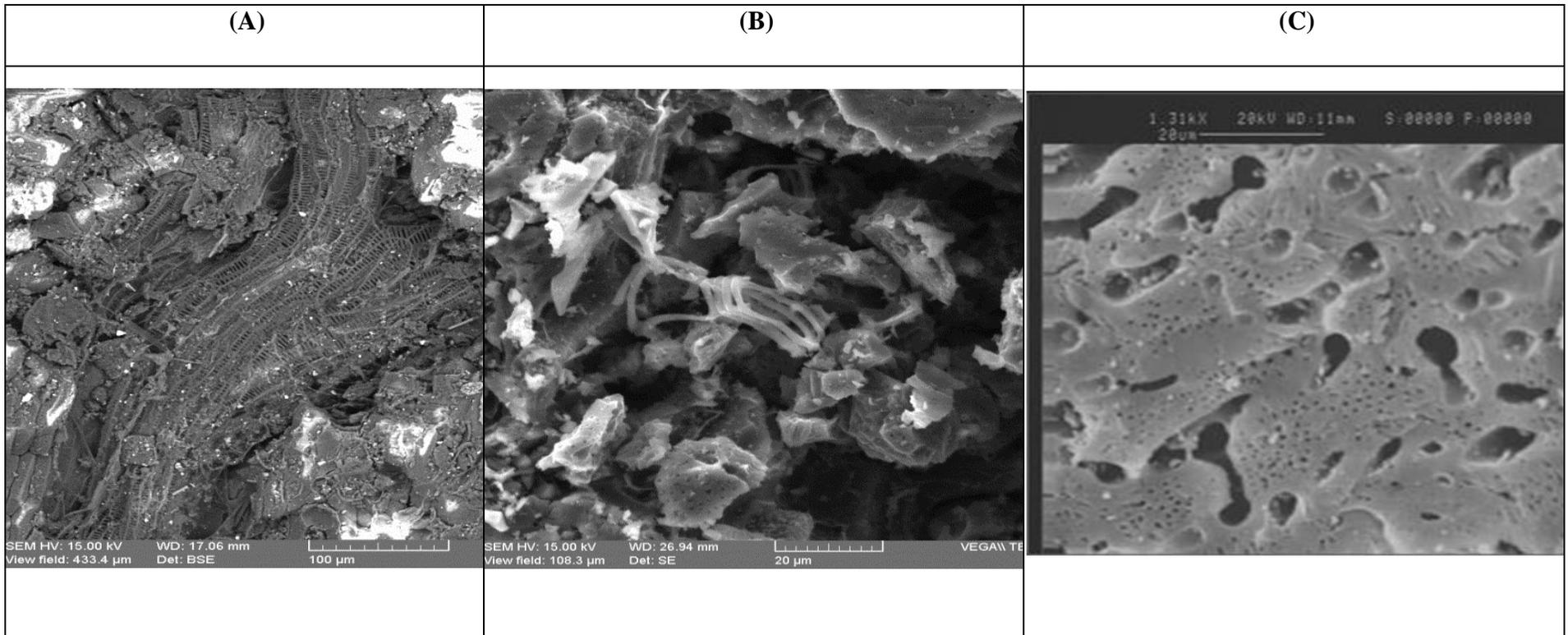
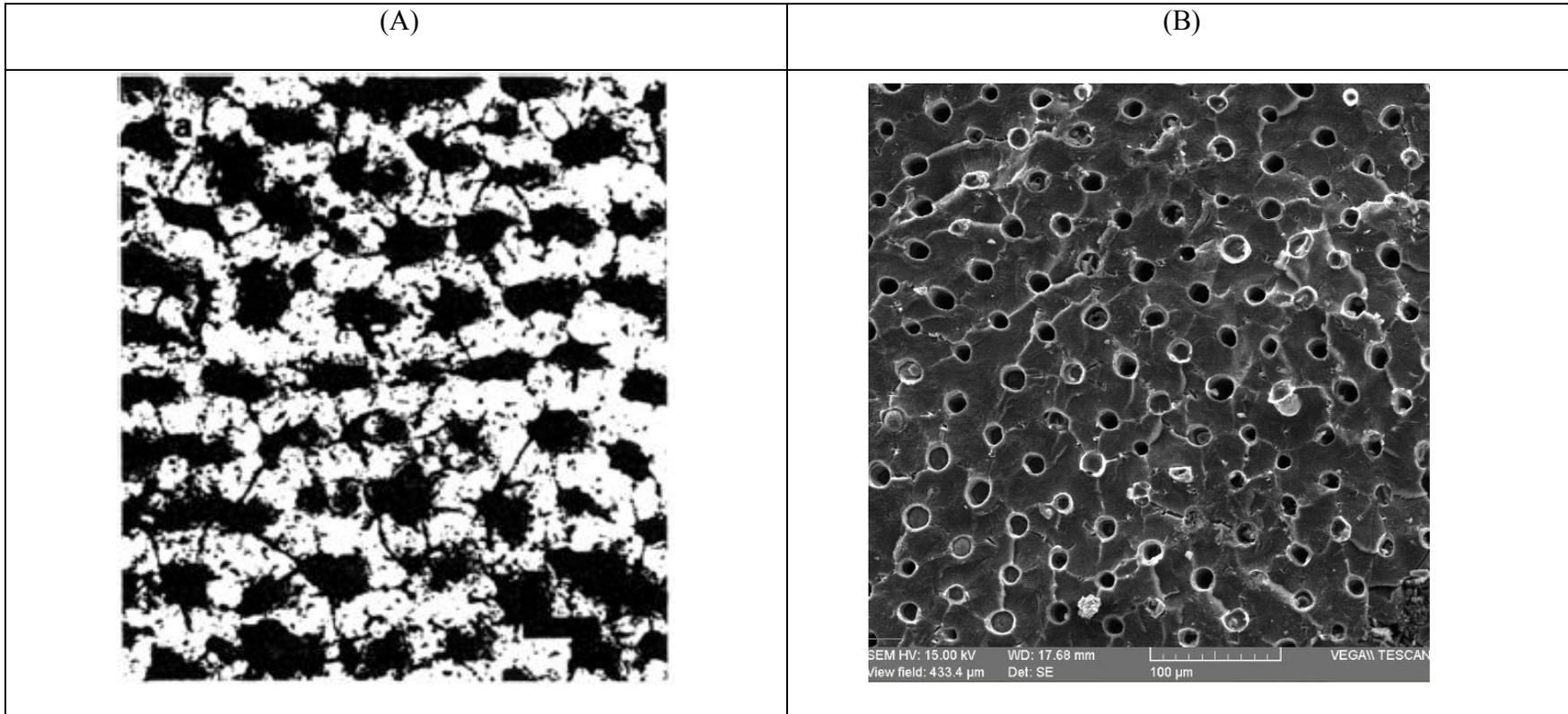


Figura 30: (A) Imagen de la distribución celular del endosperma de la semilla de tagua. Corte transversal. (Barfod, Bergmann, & Pedersen, 1990). (B) Imágenes MEB (aumento 200 x) del carbón de tagua. Fuente: Autor.



Como se puede observar, el carbón de tagua ya presenta porosidad después del proceso de pirólisis, lo que no sucede con otras materias primas como el cuesco de palma, mismo que desarrolla poros solo después de la activación. Los poros formados en el carbón de tagua tienen un tamaño de aproximadamente $10\ \mu\text{m}$, diámetro muy superior a los macroporos cuyo diámetro es de alrededor de $50\ \text{nm}$.

También, se puede ver que después de la activación, la estructura ordenada y simétrica del carbón de tagua es reemplazada por una mucho más caótica, observándose la formación de poros con diferentes diámetros.

Debido a la similitud que existe entre la disposición celular de la tagua y los poros que se forman después de la pirólisis (Figura 30), se puede decir que la ubicación simétrica y ordenada de los poros del carbón de tagua se debe a la lisis celular por las altas temperaturas durante la carbonización. Las células se rompen por la temperatura pero conservan su estructura.

Análisis químico por Microscopio Electrónico de Barrido

La Tabla 12 ilustra los resultados obtenidos en el análisis químico elemental realizado a una muestra de carbón activado de tagua en el microscopio electrónico de barrido con detector de rayos X. Cabe resaltar que este es un análisis semicuantitativo.

Tabla 12 : Composición elemental del carbón activado de tagua. Resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido. Fuente: Autor.

Composición elemental de una muestra de carbón activado de tagua	
Elemento	Porcentaje (% p/p)
Carbono	91,97
Potasio	3,42
Calcio	2,20
Fósforo	1,34
Oxígeno	1,07

La Tabla 12 muestra que el carbón activado de tagua está conformado de varios elementos además del carbono, que es su principal constituyente. La presencia de potasio, calcio y fósforo indica que el material tiene potencial nutricional, razón por la cual, esta se utiliza como alimento para el ganado en forma de polvillo.

Densidad aparente, Ángulo de reposo, tamaño de partícula

La Tabla 13 indica datos importantes de la materia prima, carbón de tagua y carbón activado de tagua, que serán usados posteriormente para el diseño del horno rotatorio.

Tabla 13 : Caracterización de la materia prima, carbón y carbón activado. Fuente: Autor.

Muestra	Ángulo de reposo (grados)	Tamaño de partícula promedio (cm)	Densidad Aparente (g/cm³)
Materia prima inicial tagua maciza	14,93	3,66	0,64
Materia prima inicial tagua agujereada	18,50	3,83	0,35
Carbón de tagua	38,42	3,00	0,44
Carbón Activado	24,92	2,80	0,52

3.3 Aplicación Práctica

Con los datos obtenidos en la parte experimental, se procederá a realizar el diseño conceptual de una planta para la producción de carbón activado a partir de animelas de tagua.

3.3.1 Capacidad y localización de la planta

Como se había mencionado anteriormente, el 90% de las animelas de tagua hechas en el Ecuador son elaboradas en la ciudad de Manta para satisfacer la demanda local y exportar a diferentes lugares del mundo incluyendo Latinoamérica, Europa y Estados Unidos. La producción promedio mensual de animelas de tagua de la ciudad de Manta es de 150.000 gruesas (equivalente a 21.600.000 unidades) (Ortiz, 2009). Además, se sabe que de toda la semilla de tagua, solo el 7% es usado para producir las animelas. El 93% restante constituye residuo, principalmente recortes (Montufar, 2008). Adicionalmente, se puede decir que cada animela pesa en promedio 1 gramo. A partir de esta información, se realizará el cálculo del dimensionamiento de la fábrica, determinando la cantidad de residuo que se tendrá disponible para la elaboración de carbón activado de tagua.

La Tabla 14 muestra los datos relevantes que han sido tomados en cuenta para la determinación del tamaño de la planta.

Tabla 14 : Tamaño de la planta para producir carbón activado de tagua. Fuente: Autor.

Estimación del tamaño de la planta de producción de carbón activado a partir de residuos de tagua	
Producción nacional de animelas estimada mensual	24.000.000 unidades/mes
Peso producción total de animelas	24 TM/mes
Cantidad de recortes generados	319 TM/mes
Tamaño de la fábrica	10 TM de recortes/día

3.3.1.1 Participación en el mercado

Desde enero del año 2012 hasta diciembre del mismo año, Ecuador importó 753.33 toneladas de carbón activado para consumo interno. Durante ese mismo año, existió una exportación del producto de tan solo 42 toneladas, cifra muy inferior al total de importaciones, lo que da como resultado una balanza comercial negativa para este rubro (Banco Central del Ecuador, 2012). Lo que se buscará es que la planta capte una parte del mercado que actualmente está importando carbón activado. La planta será capaz de producir 360 TM/año de carbón activado a partir de las 10 TM/ día de recortes de tagua. Se estima por esta razón que la planta tendrá la demanda suficiente para la venta de su producción.

Las principales empresas que importan carbón activado son mostradas a continuación (Banco Central del Ecuador, 2012). Dichas empresas podrían constituir el mercado potencial para la venta de carbón activado de tagua dentro del país:

- Aditivos, solventes y sustancias químicas ADISOL C.L.
- Brenntag Ecuador S.A.

- ARCA Ecuador.
- Empresa Minera Emicor C.A.
- Espectrocrom CIA. LTDA.
- Halliburton Latin America S.A.
- Lafarge Cementos S.A.
- Oroporto S.A.
- Refrescos Sin Gas S.A. “RE.S.GA.SA.”
- Sinohydro Corporation.
- Tabacalera Andina S.A TANASA.

3.3.1.2 Localización de la planta

En cuanto a la localización de la industria, se estima que la misma debería estar ubicada cerca de la ciudad de Manta, donde la materia prima se encuentra mayoritariamente. Se ha hecho esta consideración porque los recortes están formados principalmente por material volátil (84.9% según análisis próximo). El material volátil, por lo tanto, constituye el mayor peso de la materia prima, que posteriormente será eliminado en los procesos de carbonización y activación. Por lo tanto, si la planta está localizada lejos de la ciudad de Manta, se pagaría mucho dinero en transporte de material que no formará parte del producto final.

Los servicios básicos que requerirá la planta para su operación serán los siguientes:

- Agua.
- Alcantarillado.

- Energía eléctrica trifásica.
- Teléfono.

3.3.2 Descripción del proceso

La planta de producción de carbón activado a partir de residuos de tagua tendrá una capacidad de procesamiento de 10 TM de recortes/día y trabajará continuamente en un régimen de 24 horas. El proceso de producción de carbón activado empieza con el arribo de la materia prima (recortes). Después, los recortes serán transportados hacia un horno rotatorio donde se llevará acabo la carbonización y activación. El horno, que trabajará con fuel oil, tendrá una atmósfera rica en vapor de agua, ya que la activación del material será hecha por medios físicos. Además, en el quemador del horno se introducirá aire para la combustión del fuel oil. Dicho equipo deberá alcanzar una temperatura de aproximadamente 1000 °C, para asegurar la correcta carbonización y activación de la materia prima. El horno siempre deberá estar encendido y caliente para conservar en buen estado su refractario.

El carbón activado de tagua que saldrá del horno será transportado por medio de un tornillo sin fin hacia la molienda. Este tornillo permitirá que el carbón activado que sale a 1000 °C del horno, se enfríe para poder ser manipulado y pulverizado. Dicho enfriamiento se logrará gracias al intercambio de calor con agua como refrigerante.

Una vez frío, el producto será transportado hacia un molino de martillos para su pulverización. Después, el carbón activado en polvo ($dp= 74 \mu\text{m}$) será descargado del molino y puesto en sacos de 25 kg para la venta.

Con el fin de asegurar que la planta de carbón activado de tagua tenga un adecuado manejo de sus emisiones, los gases producidos en el horno tanto por la combustión del fuel oil

como por la carbonización y activación, recibirán un tratamiento previo a ser enviados al ambiente.

En primer lugar, los gases que salen del horno serán conducidos a una cámara de post-combustión. El objetivo de esta cámara es lograr una combustión completa de los gases producidos, para lo cual se inyectará la cantidad necesaria de aire. La composición de los gases permite que estos se auto-inflamen, por lo que no será necesario agregar combustible extra para dicho propósito (Wark & Warner, 2002).

Los gases que salen de post-combustión, formados principalmente por CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , y SO_2 , se encuentran a altas temperaturas (aproximadamente $1700\text{ }^\circ\text{C}$). Es por esta razón que pueden ser utilizados para la producción del vapor de agua que se requiere en el horno para la activación. Para esto, dichos gases serán llevados a un caldero donde intercambiarán calor con agua y producirán el vapor requerido. Sin embargo, la cantidad de energía que tienen dichos gases permite que estos produzcan más vapor del que se necesita para la activación. Por dicha razón, el vapor producido en excedente va a ser utilizado para la generación de energía eléctrica que la planta necesitará para su operación.

Después de pasar por el caldero, los gases se dirigirán a un lavador Venturi cuyo objetivo principal es eliminar el material particulado que se encuentra asociado a las emisiones. Después, dichos gases se dirigirán a una torre de absorción donde, mediante la inyección de NaOH , el SO_2 de los gases será eliminado de la corriente. Por último, los gases tratados serán expulsados por una chimenea gracias a un ventilador.

Como el lavado de los gases y el enfriamiento del carbón activado en el tornillo sin fin requieren gran cantidad de agua, será necesario añadir una torre de enfriamiento, la misma que permitirá la recirculación de agua fría en los equipos.

3.3.3 Diagrama de bloques y diagrama de flujo de la planta de producción de carbón activado de tagua

A continuación se mostrará el diagrama de bloques y el diagrama de flujo del proceso de producción de carbón activado de tagua.

3.3.3.1 Diagrama de bloques

[*diagramas BFD y PFD\diagrama de bloques planta.pdf*](#)

3.3.3.2 Diagrama de flujo

[*diagramas BFD y PFD\PFD parte 1.pdf*](#)

[*diagramas BFD y PFD\PFD parte 2.pdf*](#)

3.3.4 Sumario de propiedades de las corrientes

Tabla 15 : Sumario de las propiedades de las corrientes del diagrama de flujo. Fuente: Autor.

Número de Corriente	Descripción	Flujo másico (kg/día)	Temperatura (°C)
1	Recortes de tagua	10000	20
2	Carbón activado $\phi = 2.8$ cm	1040,51	1000
3	Carbón activado $\phi = 2.8$ cm	1040,51	50
4	Carbón activado en polvo $dp = 74 \mu\text{m}$	1040,51	50
5	Sacos de 25 kg carbón activado	42* no flujo másico	30
6	Gases de combustión, carbonización, activación	41793,86	1000
7	Fuel oil	1920,90	20
8	Vapor de agua	2081,78	120
9	Aire	65673,72	20
10	Gases post-combustión: $\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{SO}_2$	107467,58	1723,52
11	Agua	70985,99	20
12	Gases post-combustión: $\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{SO}_2$	107467,58	300
13	Agua fría + Na_2SO_3	116456,57	26

Tabla 15 (cont.)

14	Agua caliente + Na ₂ SO ₃	116456,57	70,30
15	Gases post-combustión sin material particulado: H ₂ O, CO ₂ , N ₂ , O ₂ , SO ₂	107467,58	100
16	Vapor de agua	68904,22	120
17	Agua de reposición	10153,87	20
18	NaOH	22,67	20
19	Aire	28813,56	20
20	Pérdida de Agua	10153,87	100
21	Agua	13220,89	26
22	Agua fría + NaOH	92057,90	26
23	Agua caliente + Na ₂ SO ₃	92076,03	40,01
24	Gases tratados H ₂ O, CO ₂ , N ₂ , O ₂	107449,45	50
25	Agua caliente + Na ₂ SO ₃	221753,49	55,15
26	Agua fría + Na ₂ SO ₃	116456,57	26
27	Agua fría + Na ₂ SO ₃	92053,24	26
28	Agua caliente	13220,89	55

3.3.5 Identificación de equipos en el diagrama de flujo

Tabla 16 : Identificación de equipos en el diagrama de flujo. Fuente: Autor.

Código	Descripción del equipo
H-101	Horno Rotatorio
E-101	Tornillo de enfriamiento
M-101	Molino de martillos
K- 101	Ensayado
P- 201	Cámara de post- combustión
E- 201	Caldera
L- 201	Lavador venturi
V- 201	Ventilador
A- 101	Tanque de agua
T- 201	Torre de enfriamiento
G -201	Generador eléctrico
B-201	Torre de Absorción
A-201	Tanque de agua
A-202	Tanque de agua

3.3.7 Diseño básico de equipos principales de la planta de producción de carbón activado de tagua

El diseño básico de los equipos de la planta fue hecho basándose principalmente en los datos experimentales obtenidos en el laboratorio, en fuentes bibliográficas conocidas y en los datos de diseño de la planta de carbón activado Agrigasesa.

3.3.7.1 Horno

El dimensionamiento del horno rotatorio, el equipo más importante para la planta de producción de carbón activado, se realizó usando la siguiente ecuación (Colina, Caballero, & Costa, 2002):

$$t = \frac{1.77 * L * \sqrt{\theta} * F}{p * D * N}$$

Dónde:

- t: tiempo de residencia total
- θ : Talud molecular: forma en la que el material está apilado en el horno en reposo
- F: constante que toma un valor unitario si el diámetro del horno es constante
- p: pendiente que depende del diámetro del horno. Se estima que es 5% para hornos con diámetro menor a 2.8 m
- N: velocidad de giro. Según estudios realizados, la velocidad de la mayoría de los hornos rotatorios que operan en la industria es de 3 rpm
- L: longitud
- D: diámetro

Las pruebas a nivel piloto del material permitieron obtener los siguientes datos, para poder aplicar la fórmula antes nombrada:

Tabla 17 : Datos usados para el dimensionamiento del horno rotatorio. Fuente: Autor.

Datos para dimensionamiento del horno rotatorio	
Tiempo de carbonización a 900 °C	15 min
Tiempo de activación a 850 °C	4 h
Ángulo de reposo del material	18,5 °

Tomando en cuenta estas consideraciones y comparando los resultados obtenidos con los de la fábrica Agrigasesa, las dimensiones del horno serán mostradas en la Tabla 18:

Tabla 18 : Dimensiones del horno rotatorio. Fuente: Autor.

Dimensiones del horno rotatorio	
Diámetro	1,5 m
Longitud	12,6 m

3.3.7.2 Molino de martillo

Se ha escogido un molino de martillos para la pulverización del carbón activado de tagua. Basándose en el diseño del molino de martillos que se empleaba en la planta Agrigasesa, se ha estimado que el molino a utilizar deberá tener un factor de 1,3 de sobredimensionamiento por posibles paras que ocasionen trabajo acumulado. Tomando en cuenta lo antes expuesto, la capacidad del molino se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19 : Molino de martillos para pulverización de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.

Diseño preliminar del molino de martillos para pulverización de carbón activado de tagua	
Cantidad de carbón activado a procesar (kg/ día)	1040,51
Cantidad de carbón activado a procesar (kg/ h)	43,35
Factor de seguridad	1,3
Capacidad final del molino (kg/h)	56,36
Tamaño de partícula de la alimentación (cm)	2,8
Tamaño de partícula a la salida del molino (μm)	74

3.3.7.3 *Ensacado*

El carbón activado que sale del molino de martillos será después puesto en sacos para la venta. La presentación comercial más común al por mayor es en sacos de 25 kg. El ensacado será hecho de forma manual.

La Tabla 20 muestra la cantidad de sacos que serán necesarios de acuerdo a la cantidad de carbón activado que produce la planta al día.

Tabla 20: Dimensionamiento del proceso de ensacado. Fuente: Autor.

Ensacado	
Carbón activado producido (kg/h)	43,35
Número de sacos de carbón activado (sacos/h)	Aprox. 2
Número de sacos de carbón activado (sacos/día)	Aprox. 42

3.3.7.4 *Cámara de Post Combustión*

Como se había mencionado anteriormente, el objetivo de la cámara de post-combustión es hacer que los gases que salen del horno se combustionen completamente, obteniendo como producto solamente dióxido de carbono, agua y dióxido de azufre, el cual posteriormente recibirá el debido tratamiento.

La composición y cantidad de los gases que salen del horno y van a post-combustión ha sido calculada usando reacciones estequiométricas de carbonización y activación. Asimismo, se

ha tomado en cuenta la cantidad de gases que se producen por la quema del fuel oil y un 30% de exceso de aire, que debe ser introducido en la cámara para asegurar la combustión completa de los gases (dato tomado de la empresa Agrigasesa). Adicionalmente, se ha considerado que la atmósfera del horno debe tener un 18% de vapor de agua para que se lleve a cabo la activación, y por lo tanto, los gases que irán a post-combustión serán ricos en agua (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006). Cabe resaltar que para este cálculo se usó como referencia las reacciones de carbonización y activación de la madera, al no disponer datos bibliográficos de la composición de la tagua ni de los productos en los que la misma se transforma después de recibir estos tratamientos. Las reacciones utilizadas para este propósito son las siguientes:

Reacción de carbonización de la madera: (Mantilla, 1993)

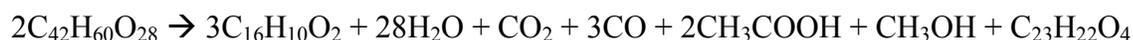
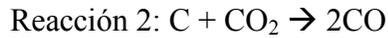
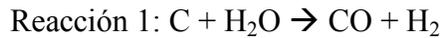


Tabla 21 : Elementos de la reacción de carbonización de la madera. Fuente: Autor.

Identificación de los elementos de la reacción de carbonización de la madera	
$C_{42}H_{60}O_{28}$	Madera = Tagua
$C_{16}H_{10}O_2$	Carbón
H_2O	Agua
CO_2	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
CH_3COOH	Ácido acético
CH_3OH	Metanol
$C_{23}H_{22}O_4$	Alquitrán

Reacciones de activación: (Mantilla, 1993)

Es importante mencionar que el 80% del carbón producido en la pirólisis reacciona según la Reacción 1 y el 20% según la Reacción 2 (Kunii & Chisaki, 2008).

Reacciones dentro de la cámara de post- combustión:

Las reacciones que se llevarán a cabo dentro de la cámara de post-combustión son las siguientes:

- **Combustión del monóxido de carbono:** $2 CO + O_2 \rightarrow 2 CO_2$
- **Combustión del ácido acético:** $C_2H_4O_2 + 2 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$
- **Combustión del metanol:** $CH_3OH + 1.5 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$
- **Combustión del alquitrán:** $C_{23}H_{22}O_4 + 26.5 O_2 \rightarrow 23 CO_2 + 11 H_2O$
- **Combustión del hidrógeno:** $2H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$

Composición de los gases del fuel oil y masa de gases producida por la quema del combustible

La composición de los gases del fuel oil se muestra en la Tabla 22:

Tabla 22: Composición de los gases del fuel oil (Perry J. , 1981)

Composición	Porcentaje (%)
CO ₂	14,17
H ₂ O	12,34
N ₂	73,49
SO ₂	0,059
Total	100,00

Además, se considera que trabajando con un 10% de exceso de aire, la masa de gases producida por la combustión del fuel oil puede ser calculada por la siguiente ecuación (Perry J. , 1981):

$$mgases = x(15 + 1)$$

Donde x es la cantidad de fuel oil que se está combustionando.

Dimensionamiento de la cámara de post-combustión

Tomando en cuenta todas estas consideraciones, se ha calculado la cantidad y composición de los gases que van a ser tratados en post-combustión. De acuerdo a esto también, se ha dimensionado la cámara. La Tabla 23 muestra la composición de los gases que salen del horno después de la activación y la carbonización y que van a ser llevados a la cámara de post-combustión para su respectivo tratamiento. La Tabla 24 indica la composición de los gases dentro de la cámara de post-combustión, considerando un 30% de exceso de aire. De acuerdo a este

volumen de gases se realizará el dimensionamiento de la cámara. Por último, la Tabla 25 mostrará la composición de los gases a la salida de la cámara de post-combustión.

Tabla 23: Composición de los gases que salen del horno y van a tratamiento de post-combustión.

Fuente: Autor.

Componente	Flujo másico (kg/día)	Porcentaje (%)
Agua	5451,09	18,71%
CO ₂	3661,60	8,19%
CO	7213,04	16,13%
Ac. Acético	592,89	1,33%
Metanol	158,10	0,35%
Alquitrán	1788,54	4,00%
H ₂	323,72	0,72%
N ₂	22586,76	50,52%
SO ₂	18,13	0,04%
Total	41793,86	100,00

Tabla 24: Composición de los gases dentro de la cámara de post-combustión tomando en cuenta un 30% de exceso de aire. Fuente: Autor.

Componente	Flujo másico (kg/día)	Porcentaje (%)
Agua	5451,09	5,07%
CO ₂	3661,60	3,41%
CO	7213,04	6,71%
Ac. Acético	592,89	0,55%
Metanol	158,10	0,15%
Alquitrán	1788,54	1,66%
H ₂	323,72	0,30%
N ₂	72958,50	67,89%
O ₂	15301,98	14,24%
SO ₂	18,13	0,02%
Total	107467,58	100,00%

Tabla 25: Composición de los gases a la salida de la cámara de post-combustión. Fuente: Autor.

Componente	Flujo másico (kg/día)	Porcentaje (%)
Agua	9876,39	9,19%
CO ₂	21083,34	19,62%
N ₂	72958,50	67,89%
O ₂	3531,23	3,29%
SO ₂	18,13	0,02%
Total	107467,58	100,00%

Por último, la Tabla 26 indicará el volumen que deberá tener la cámara de post-combustión, considerando un tiempo de residencia de los gases de 3 segundos (Castells, 2005). La ecuación utilizada para el cálculo del volumen de la cámara es la siguiente (Fogler, 2001):

$$\text{Volumen cámara} = \text{volumen de gases} * \text{tiempo de residencia}$$

Tabla 26: Dimensionamiento de la cámara de post-combustión. Fuente: Autor.

Dimensionamiento de la cámara de post-combustión	
Gases dentro de la cámara (kg/día)	107467,58
Volumen de gases (L/día)	418781058,90
Volumen de gases (m ³ /h)	17449,21
Tiempo de residencia (s)	3,00
Volumen cámara de post-combustión (m ³)	14,54

3.3.7.5 Caldero

El caldero será utilizado para producir el vapor de agua que se empleará tanto en la activación como para generación de energía eléctrica. Se aprovechará el calor que tienen los gases de la cámara de post- combustión para dicho propósito.

La temperatura de los gases se determinó por medio de un balance de energía donde se consideró las entalpías de combustión de los compuestos que se oxidan en la post-combustión (monóxido de carbono, ácido acético, metanol, alquitrán e hidrógeno) (Perry J. , 1981). El calor generado fue calculado según la siguiente ecuación:

$$\sum \Delta H_c = \sum m_{gases} C_{p_{gases}} (T_2 - T_1)$$

Dónde:

- ΔH_c es la entalpía de combustión de los componentes antes indicados.
- m_{gases} : masa de los gases que se encuentran en la cámara de post-combustión.

- $T1$: temperatura de los gases al ingresar a la cámara de post-combustión.
- $T2$: temperatura de los gases al salir de la cámara de post-combustión.
- $Cp \text{ gases}$: Capacidad calorífica a presión constante de los gases presentes en la cámara de post-combustión.

Aplicando la ecuación antes mencionada, se encontró que la temperatura de salida de los gases ($T2$) es de 1734.16 °C. Debido a su elevada temperatura, este calor se puede utilizar para generar el vapor deseado.

Por otro lado, el equipo de tratamiento Venturi (proceso posterior al caldero) requiere, según diseño, que los gases de entrada tengan una temperatura máxima de 300 °C (Perry J. , 1981). Es por esta razón que se ha decidido que dentro del caldero se produzca vapor hasta disminuir la temperatura de los gases a la deseada para ingresar al Venturi.

La cantidad de vapor que se generará para lograr este enfriamiento de los gases será calculada según la siguiente ecuación:

$$m_{\text{gases}} * C_{p\text{gases}} (T2 - T1) = m_{\text{agua}} * C_{p\text{agua}} (T4 - T3) + m_{\text{vapor}} * C_v + m_{\text{vapor}} * C_{p \text{ vapor}} (T6 - T5)$$

Dónde:

- m_{gases} : masa de los gases que salen de post-combustión
- $C_{p \text{ gases}}$: capacidad calorífica a presión constante de los gases
- $T2$: Temperatura de salida de la cámara de post-combustión: 1734.16 °C
- $T1$: Temperatura de salida de los gases del caldero: 300 °C
- m_{agua} : masa del agua a vaporizar

- Cpagua: capacidad calorífica a presión constante del agua líquida
- T4: Punto de ebullición del agua: 100°C
- T3: Temperatura inicial del agua líquida: temperatura ambiente
- mvapor: masa de vapor
- Cv: calor de vaporización
- Cpvapor: capacidad calorífica a presión constante del vapor de agua
- T6: Temperatura final del vapor sobresaturado: 120 °C
- T5: Punto de ebullición del agua: 100°C

Tras aplicar esta ecuación se determinó la capacidad del caldero y la cantidad de vapor de agua generado tanto para activación como para generación eléctrica. La Tabla 27 muestra estos resultados:

Tabla 27 : Dimensionamiento del caldero. Fuente: Autor.

Dimensionamiento del caldero		
Propiedad	Unidades	Flujo másico
Masa de vapor generado (mvapor)	kg/día	70985,99
Masa de vapor necesaria para tener una atmósfera del 18% en el horno	kg/día	8364,53
Masa de vapor que debe meter el caldero al horno	kg/día	2081,78
Masa de vapor remanente para generación eléctrica	kg/día	68904,22
Consumo de agua	m ³ /h	2,96
Potencia del caldero	BHP	200

El tipo de caldero que se recomendaría para este proceso es un Piro tubular ya que dichos equipos son empleados para producciones relativamente pequeñas de vapor. Los calderos acu tubulares son mucho más costosas que las piro tubulares (2 a 1) y son utilizados para generar flujos de hasta 454000 kg vapor/ h (Perry J. , 1981), por lo que no serían los más apropiados.

3.3.7.6 Lavador Venturi

La instalación de un Lavador Venturi tiene como objetivo la eliminación del material particulado asociado a los gases con una eficiencia del 99.5% (Wark & Warner, 2002). Dicho material particulado se generaría por la disgregación del carbón durante su tratamiento dentro del horno y por la quema del combustible. Se estima que el tamaño de dicho material será mayor o igual a 5 μm (dato tomado de operación en Agrigasesa). Durante la etapa de diseño, es complicado determinar la cantidad de material particulado que vendrá asociado a los gases, ya que esta variará de acuerdo a las características del combustible y a los procesos de carbonización y activación (de la Torre *com. pers*, 2013).

Un venturi es un canal de flujo circular que converge a una garganta de sección estrecha y luego diverge nuevamente a su área original de la sección transversal. La relación de áreas entre la entrada y la garganta es típicamente 4:1 (Wark & Warner, 2002). La Tabla 28 muestra datos importantes que fueron tomados para determinar el consumo de agua que tendrá el venturi y las dimensiones del mismo.

Tabla 28 : Datos para diseño del lavador Venturi. Fuente: Autor.

Propiedad	Valor	Referencia
Consumo de agua (L agua/m ³ de gas)	0,4 – 1	(Perry J. , 1981)
Velocidad de gas (m/s)	60 – 90	(Perry J. , 1981)
Relación de áreas entrada –garganta	4:1	(Wark & Warner, 2002)
Ángulo del cono	5-7°	(Wark & Warner, 2002)
Eficiencia de remoción de partículas con d80 = 5 µm	99,5 %	(Wark & Warner, 2002)
Temperatura de entrada de los gases	300 °C	(Perry J. , 1981)
Temperatura de salida de los gases	100 °C	(Perry J. , 1981)

La Tabla 29 muestra las dimensiones finales del lavador venturi para el tratamiento de gases de la planta de carbón activado de tagua.

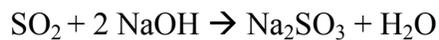
Tabla 29: Dimensionamiento del lavador venturi. Fuente: Autor.

Diseño del lavador venturi	
Consumo de agua (m ³ /h)	4,85
Diámetro de la garganta con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m)	0,20 - 0,17
Área de la garganta con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m ²)	0,032 - 0,021
Diámetro de la boca con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m)	0,40 - 0,33
Área de la boca con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m ²)	0,128 - 0,085
Diámetro inferior con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m)	0,40 - 0,33
Área inferior con velocidad de gas: 60 m/s - 90 m/s (m)	0,128 - 0,085

3.3.7.7 Torre de Absorción

La torre de absorción permite la eliminación del dióxido de azufre de los gases mediante la inyección de sosa cáustica en el agua que utiliza el equipo para lavar (Rodríguez, Echegaray, Castro, Palacios, Hektor, & Udaquiola, 2008).

La reacción que se llevará a cabo en dicha torre es la siguiente:



Los datos de diseño se presentan en la Tabla 30:

Tabla 30: Datos para diseño de la torre de absorción. Fuente: Autor.

Propiedad	Valor	Referencia
Consumo de agua (L agua/m ³ de gas)	0,4 – 1,3	(Perry J. , 1981)
Velocidad de gas (m/s)	1,2 - 2,4	(Perry J. , 1981)
Relación Diámetro- Altura	1 : 2,7	Planta Agrigasesa

Además, basados en la reacción estequiométrica antes mencionada, se calculó la cantidad de sosa cáustica que requerirá el lavado de gases. La Tabla 31 muestra el dimensionamiento de la torre de absorción según los datos antes mencionados.

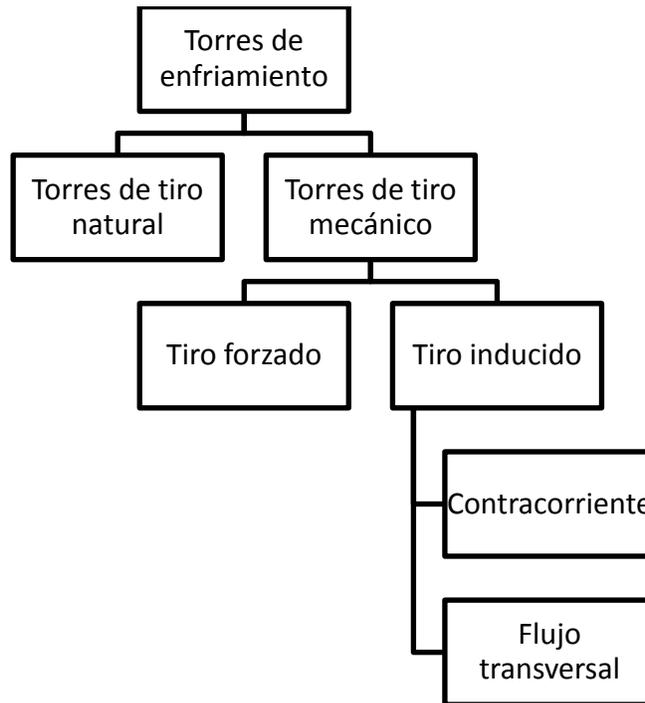
Tabla 31: Diseño de la torre de absorción. Fuente: Autor.

Diseño de la torre de absorción	
Diámetro de la torre con velocidad de gas: 1,2 m/s (m)	1,15
Diámetro de la torre con velocidad de gas: 2,4 m/s (m)	0,815
Altura de la torre con velocidad de gas: 1,2 m/s (m)	3,11
Altura de la torre con velocidad de gas: 2,4 m/s (m)	2,20
Consumo de agua (m ³ /h)	3,83
Cantidad de sosa cáustica a inyectar (kg/día)	18,13

3.3.7.8 Torre de enfriamiento

Con el fin de poder recircular el agua utilizada en el lavador venturi, torre de absorción y tornillo de enfriamiento, se debe instalar una torre de enfriamiento de agua. La Figura 31 muestra los tipos de torres de enfriamiento que pueden encontrarse en el mercado.

Figura 31 : Tipos de Torres de enfriamiento (Perry, Green, & Maloney, 2001).



Las torres de tiro natural son apropiadas esencialmente para caudales muy grandes de agua de enfriamiento y por lo general son estructuras de cemento reforzado con diámetros del orden de 80.7 m y alturas hasta de 103.6 m. En contraste, las torres de tiro mecánico se utilizan en la industria para enfriar caudales de agua más pequeños y pueden ser de dos tipos: de tiro forzado y de tiro inducido (Perry, Green, & Maloney, 2001).

Las torres de tiro forzado se caracterizan porque el ventilador se monta en la base de la torre, permitiendo la entrada de aire a baja velocidad. Esta disposición tiene la ventaja de que el motor propulsor está fuera de la torre, sitio conveniente para su inspección, mantenimiento y reparación. Además, debido a su posición, el ventilador no está sometido a condiciones corrosivas. Sin embargo, este tipo de torre tienen la gran desventaja de que, debido a la baja

velocidad del aire de salida, existe una recirculación excesiva de vapores húmedos. Esto ocasiona que la temperatura del bulbo húmedo del aire de salida sea mucho mayor que la del aire ambiente, lo que causa que la torre tenga un bajo rendimiento, evidenciándose en el incremento de la temperatura del agua fría (Perry, Green, & Maloney, 2001).

Las torres de tiro inducido son las más utilizadas en la industria por sus características intrínsecas y altos rendimientos. Este tipo de torres se subdividen en de flujo contracorriente y de flujo transversal, dependiendo de las direcciones relativas del flujo de aire y agua. Si se compara entre los dos tipos, las torres con diseño a contracorriente son las más eficaces y son empleadas, por lo general, cuando el intervalo de enfriamiento es grande. Por otro lado, las torres de tipo flujo transversal requieren áreas de contacto muy amplias, por lo que necesitan material de relleno y son más altas. Esto ocasiona que sus ventiladores tengan un mayor consumo energético, lo que les vuelve más costosas (Perry, Green, & Maloney, 2001).

Por las características antes indicadas, se ha decidido escoger una torre de tiro inducido tipo contracorriente para el enfriamiento de agua en el proceso de producción de carbón activado de tagua. En este diseño preliminar se determinó, primordialmente, el área mínima necesaria para el funcionamiento específico de dicho tipo de torre y la potencia del ventilador que deberá tener la misma. Los datos empleados para los cálculos se muestran en la Tabla 32.

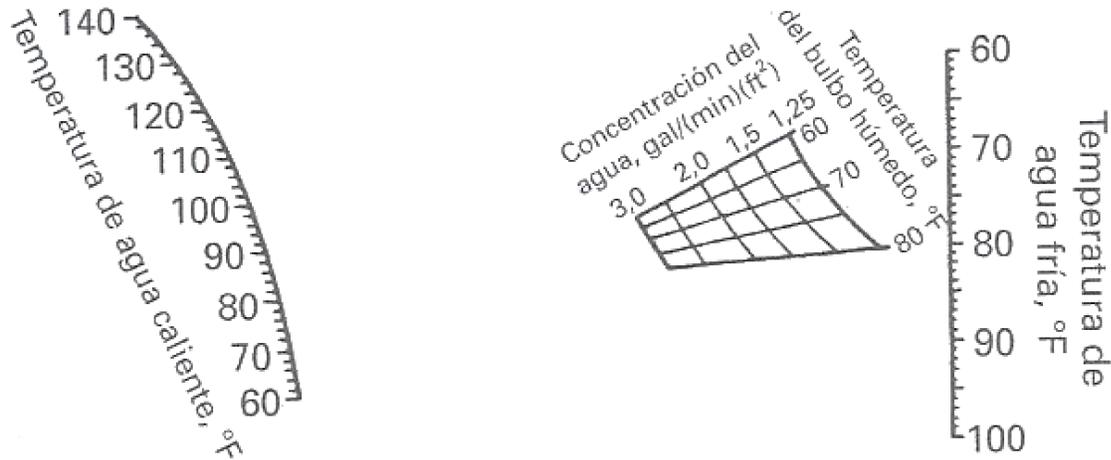
Tabla 32 : Datos empleados para el diseño de una torre de enfriamiento tipo contracorriente.

Fuente: Autor.

Parámetro	Magnitud
Temperatura del agua caliente	131,29 °F
Temperatura del agua fría	78,8 °F
Temperatura del bulbo húmedo	71,6 °F
Porcentaje de humedad relativa en Manta	77%
Temperatura del aire seco	77 °F
Caudal de agua a enfriar W_c	40,68 gal/min

Para el cálculo del área de torre se necesita primero determinar la concentración del agua dentro de la torre. Este parámetro determina el volumen de agua por min y pie² de suelo que debe existir en la torre para su operación óptima y el correcto intercambio de calor agua-aire. Una vez determinada la concentración de agua, el cálculo para encontrar el área de torre consiste en dividir el caudal del agua a enfriar entre la concentración de agua. La concentración de agua se encontró usando la Figura 32 y se determinó que para las condiciones antes indicadas dicho parámetro tomaba un valor de 1.5 gal/(min*pie²) (Perry, Green, & Maloney, 2001). De esta forma se encontró que el área de torre es de 27.12 pie².

Figura 32 : Gráfica para determinar las dimensiones de una torre de enfriamiento de tiro inducido a contracorriente (Perry, Green, & Maloney, 2001).



Para el cálculo de la potencia del ventilador se utilizó la Figura 33, misma que muestra la potencia que debe tener el equipo por pie^2 de área de torre (Perry, Green, & Maloney, 2001). De esta forma se encontró que se requería un ventilador de 1.11 hp para el enfriamiento de agua.

Figura 33: Gráfica de caballos de potencia para una torre de enfriamiento de tiro inducido y contracorriente (Perry, Green, & Maloney, 2001).



Otro parámetro importante a considerar es las pérdidas de agua que tendrá la torre de enfriamiento durante su operación. Se pueden encontrar pérdidas de agua debido a tres circunstancias: evaporación, arrastre, por el viento. Los requisitos de reposición para una torre de enfriamiento consisten en la sumatoria de la masa de agua que se pierde por las razones antes nombradas, según la siguiente ecuación (Perry, Green, & Maloney, 2001):

$$W_m = W_e + W_d + W_b$$

Dónde:

- W_m : agua de reposición (gal/min)

- W_e : pérdidas por evaporación (gal/min)
- W_d : pérdidas por arrastre (gal/min)
- W_b : pérdidas a causa del viento (gal/min)

Las pérdidas por evaporación W_e se pueden calcular con la siguiente ecuación (Perry, Green, & Maloney, 2001):

$$W_e = 0.00085 * W_c (T_1 - T_2)$$

Dónde:

- W_c : Flujo de agua a la entrada de la torre (gal/min)
- T_1 : Temperatura de entrada (°F)
- T_2 : Temperatura de salida (°F)

El arrastre se produce por los vapores de descarga de la torre y aunque dependen del diseño propio de la torre, esta pérdida normalmente varía entre 0.1 y 0.2 por ciento del agua de entrada a la torre, W_c . En cuanto a las pérdidas por el viento, W_b , estas dependen primordialmente del número de ciclos que se permitirá que el agua circule dentro de la torre. La siguiente ecuación muestra la fórmula para calcular dichas pérdidas: (Perry, Green, & Maloney, 2001).

$$W_b = \frac{W_e}{\text{Ciclos} - 1}$$

En el caso específico de este proceso, dicha pérdida se considera despreciable ya que el agua no necesitará un cambio constante. De hecho, en la planta de producción Agrigasesa, se

necesitaba un cambio total del agua de enfriamiento una vez al año de operación. Basados en las consideraciones antes expuestas, la Tabla 33 muestra las pérdidas totales de agua del sistema.

Tabla 33 : Pérdidas de agua en la torre de enfriamiento de agua. Fuente: Autor.

Tipo de Pérdida	gal/min	m³/h
We	1,81	0,41
Wd	0,041	0,009
Wb	0,00	0,00
Total Wm	1,856	0,423

Por último, las características más importantes de la torre de enfriamiento que deberá ser instalada en la planta de producción de carbón activado de tagua se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34 : Características de la torre de enfriamiento de agua. Fuente: Autor.

Características importantes de la torre de enfriamiento tipo contracorriente	
Cantidad de agua a enfriar (m ³ /h)	9,24
Temperatura de entrada del agua a la torre (°C)	55,16
Temperatura de salida del agua de la torre (°C)	26
Masa de agua a reponer por pérdida (m ³ /h)	0,42
Área de torre (pie ²)	27,12
Potencia del ventilador (hp)	1,11

3.3.7.9 Tornillo de enfriamiento

El tornillo de enfriamiento permitirá que el carbón activado que sale del horno a 1000 °C se enfríe para poder ser pulverizado y ensacado. Dicho tornillo constará de una tubería doble. Por un lado, en el interior existirá un tornillo transportador que llevará al material hacia el molino. Por otro lado, en la tubería más externa, se inyectará agua de enfriamiento para permitir el intercambio de calor con el carbón y lograr que este baje su temperatura hasta que pueda ser manipulado.

Para la elección del tornillo más adecuado se han considerado varios aspectos. En primer lugar se determinó el tamaño de hélice necesaria para el transporte y su velocidad. Después se calculó la cantidad de agua que será necesaria para el enfriamiento.

La siguiente tabla muestra los tipos de tornillos sin fin disponibles en el mercado, de acuerdo al tamaño de partícula que tenga el material que se va a transportar:

Tabla 35: Tipos de tornillos sin fin (de la Torre E. , 2011)

Diámetro de la hélice (cm)	Tamaño de partícula (mm)	Velocidad de giro (rpm)
10	6	40
35	32	20
61	63	15

Según pruebas experimentales, el carbón activado de tagua tiene un diámetro de partícula de 30 mm aproximadamente, por lo que se considera que el tornillo sin fin para este proceso deberá tener un diámetro de hélice de 35 cm y una velocidad de giro de 20 rpm.

Por otro lado, la cantidad de agua que se requerirá para el enfriamiento del tornillo fue calculada mediante un balance de energía teórico, donde se consideró que el agua, como ente de enfriamiento, debe retirar el calor suficiente para poder enfriar el carbón, es decir:

$$Q_{\text{carbón}} = Q_{\text{agua}}$$

$$m_{\text{carbón}} C_p \Delta T_{\text{del carbón}} = m_{\text{agua}} C_p \Delta T_{\text{del agua}}$$

Bajo estas consideraciones, se determinó que el tornillo tendrá las siguientes características:

Tabla 36 : Características del tornillo de enfriamiento. Fuente: Autor.

Parámetro	Magnitud
Velocidad de giro (rpm)	20
Diámetro de la hélice (cm)	35
Masa de agua de enfriamiento (kg/día)	13220,89
Temperatura de entrada del agua (°C)	26
Temperatura de salida del agua (°C)	55,16

3.3.8 Análisis económico preliminar

A continuación se desarrollará un análisis económico preliminar del establecimiento de una planta de producción de carbón activado de tagua en la ciudad de Manta, con una capacidad de procesamiento de 10 TM/día de recortes.

Para este análisis se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

En cuanto a los ingresos:

- Se considera que la empresa tiene ingresos provenientes de dos fuentes: la venta del carbón activado de tagua y la energía eléctrica producida por el vapor excedente en el caldero.

En cuanto a los egresos:

- Los egresos que se han tomado en cuenta para este análisis económico son:
 - ✓ Inversión inicial: costo de equipos, terreno de la planta, galpón y costos legales de apertura incluyendo costo de la patente municipal (Presidencia de la República del Ecuador, 2013), permiso de funcionamiento (Ministerio del Salud, 2008), pago estimado de abogados para la constitución de la compañía y pago del Licenciamiento Ambiental.
 - ✓ Amortización de la inversión a 10 años.
 - ✓ Costo del combustible.
 - ✓ Costo de la energía eléctrica.
 - ✓ Costo de la materia prima.
 - ✓ Salarios de los trabajadores.
 - ✓ Insumos: Agua y teléfono.

✓ Costo del embalaje del carbón.

- Para determinar el costo de la inversión inicial, se han solicitado cotizaciones referenciales a los fabricantes de los equipos necesarios para el proceso de producción, guardando las características establecidas en el diseño. Además, se ha buscado el costo de un terreno y galpón en la ciudad de Manta y se ha consultado páginas oficiales para determinar el precio de la patente municipal y del permiso de funcionamiento de la empresa. También se ha tomado en cuenta el costo del Licenciamiento Ambiental que incluye honorarios profesionales y tasas como costo por el seguimiento del Plan de Manejo Ambiental, costos operativos del proyecto y garantía de fiel cumplimiento del Plan de Manejo Ambiental por el 100% del valor del proyecto.
- Además se ha considerado un costo de amortización a 10 años para poder cubrir la depreciación de los equipos.
- El vapor producido por el caldero es suficiente para la alimentación del horno en el proceso de activación, para el suministro de energía eléctrica de los demás equipos de la planta e incluso existe un remanente que puede ser vendido como energía eléctrica al alumbrado público. Por esta razón, se considera que la energía eléctrica para este proceso no es un egreso sino un ingreso.
- Se ha considerado que el personal total necesario para la operación de la planta será: un jefe de producción y 6 obreros. Se trabajará en un turno de 24 horas cambiando el personal cada 8 horas.

En cuanto al precio de venta:

- Se ha tomado un precio de venta del carbón activado de \$4/kg. Este es el precio comercial para un carbón activado con las características y aplicaciones del carbón activado de tagua (Miranda, S. *com pers*, 2013).
- Además, se ha considerado un precio de venta de la energía eléctrica de \$0.08/kwh, costo comercial del servicio en la ciudad de Manta (El Diario, 2013).

Basándose en los puntos antes expuestos se han calculado las siguientes variables:

- Total ingresos.
- Total egresos.
- Costos fijos y variables.
- Costos totales.
- Utilidad.
- Relación Costo/Beneficio.
- Balance de energía de los equipos y su consumo diario.
- Cálculo del TIR y el VAN tomando en cuenta una tasa de interés activa actual del 11.20% y una tasa de interés pasiva del 4.53% (Banco Central del Ecuador, 2013).
- Además, se ha establecido una comparación entre el precio de venta de carbón activado y el precio de venta del polvillo de tagua.

La Tabla 37 muestra los parámetros de producción en los que se ha basado el cálculo de las diferentes variables y la Tabla 38 detalla el costo de la inversión inicial de la planta.

Tabla 37 : Parámetros de operación de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.

Parámetros de producción	
Tipo de producto a producir	Carbón Activado de tagua en polvo
Materia Prima	Recortes de tagua
Cantidad de recortes a alimentar (kg/día)	10000
Cantidad de recortes a alimentar (kg/mes)	300000
Horas al día de operación (h/día)	24
Cantidad de producto a producir (Kg C.A./día)	1041
Días por mes de operación (días/mes)	30

Tabla 38 : Inversión inicial de la planta de carbón activado. Fuente: Autor.

Inversión fija	\$ USA	Referencia
Organización legal	2228,96	(Ministerio del Salud, 2008) (Presidencia de la República del Ecuador, 2013)
Permisos Ambientales	5000,00	(Jami <i>com.pers</i> , 2013)
Terreno: \$300/m ²	100000,00	(Mitula Casas, 2013)
Obra civil	100000,00	(Mitula Casas, 2013)
Equipos		
Horno	300000,00	(Korea Trade, 2011)
Caldero	78950,00	(Fabritec Engineering, 2013)
Cámara de post-combustión- venturi - torre absorción	300000,00	(Korea Trade, 2011)
Molino	30360,00	(Shanghai Zenith Company, 2013)
Torre de enfriamiento	20000,00	(HBA, 2013) (Marley, 2013)
Tornillo intercambiador	20000,00	(Rufnek, 2013)
Selladora de sacos	180,00	(Fischben, 2013)
Total	956718,96	

La Tabla 39 enseña en detalle el pago de la inversión inicial en 10 años tomando en cuenta una tasa de interés anual del 11.2% y la Tabla 40 indica los egresos e ingresos mensuales de la planta considerando el pago anual de la inversión.

Tabla 39 : Detalle de pago de la inversión inicial de la planta. Fuente: Autor.

Total de Inversión	956718,96				
Año	Saldo inicial	Dividendo	Pago Capital	Interes	Saldo Final
1	956718,96	202824,42	95671,90	107152,52	861047,06
2	861047,06	192109,17	95671,90	96437,27	765375,17
3	765375,17	181393,91	95671,90	85722,02	669703,27
4	669703,27	170678,66	95671,90	75006,77	574031,38
5	574031,38	159963,41	95671,90	64291,51	478359,48
6	478359,48	149248,16	95671,90	53576,26	382687,58
7	382687,58	138532,91	95671,90	42861,01	287015,69
8	287015,69	127817,65	95671,90	32145,76	191343,79
9	191343,79	117102,40	95671,90	21430,50	95671,90
10	95671,90	106387,15	95671,90	10715,25	0,00

Tabla 40 : Ingresos y egresos totales anuales. Fuente: Autor.

Año	Ingresos mensuales	Egresos de Operación mensuales	Dividendo	Ingresos Anuales	Egresos de Operación Anuales	Egresos Anuales totales
1	25608,88	47282,60	202824,42	307306,55	567391,14	770215,56
2	38413,32	47282,60	192109,17	460959,82	567391,14	759500,31
3	51217,76	47282,60	181393,91	614613,10	567391,14	748785,06
4	64022,20	47282,60	170678,66	768266,37	567391,14	738069,81
5	76826,64	47282,60	159963,41	921919,65	567391,14	727354,55
6	102435,52	47282,60	149248,16	1229226,19	567391,14	716639,30
7	115239,96	47282,60	138532,91	1382879,47	567391,14	705924,05
8	128044,40	47282,60	127817,65	1536532,74	567391,14	695208,80
9	128044,40	47282,60	117102,40	1536532,74	567391,14	684493,54
10	128044,40	47282,60	106387,15	1536532,74	567391,14	673778,29

La Tabla 41 muestra los indicadores TIR y VAN de la inversión. Se puede observar que el TIR toma un valor del 27% y el VAN un valor positivo, lo que demuestra que la planta es rentable. Además, se puede determinar que la inversión termina de pagarse en el octavo año de operación de la planta.

Tabla 41 : Cálculo TIR, VAN y pago final de la inversión. Fuente: Autor.

Año	Ingresos Anuales	Egresos Anuales	Saldo	Saldo Acumulado
1	307306,55	770215,56	-462909,02	-462909,02
2	460959,82	759500,31	-298540,49	-761449,50
3	614613,10	748785,06	-134171,96	-895621,47
4	768266,37	738069,81	30196,56	-865424,90
5	921919,65	727354,55	194565,09	-670859,81
6	1229226,19	716639,30	512586,89	-158272,92
7	1382879,47	705924,05	676955,42	518682,50
8	1536532,74	695208,80	841323,95	1360006,45
9	1536532,74	684493,54	852039,20	2212045,64
10	1536532,74	673778,29	862754,45	3074800,09
TIR	27%			
VAN	996385,82			

La Tabla 42 presenta el flujo de caja de la operación de la empresa. En esta se muestra en detalle los ingresos y egresos de la compañía que se generan mensualmente.

Tabla 42 : Flujo de caja mensual detallado. Fuente: Autor.

Análisis Económico Preliminar detallado				
1.-	Ingresos			
	Carbón activado a producir (Kg C,A./mes)	31215,42		
	Precio de Venta CA (\$/Kg)	4,00		
	Precio de Venta CA (\$/mes)	124861,66		
	Precio de Venta Energía eléctrica (\$/mes)	3182,74		
	Precio de Venta Energía eléctrica (\$/kg C,A)	0,10		
	Total Ingresos (\$/mes)	128044,40		
2.-	Egresos			
2.1.	Costos referentes a la Inversion Inicial			
	Inversion fija	\$ USA	\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
	Depreciacion por mes a 10 años	7972,66	7972,66	0,26
	Amortización mensual a 10 años	17539,85	17539,85	0,56
2.2.	Combustible			
	BBL fuel oil/día	Días	\$/BBL	\$/mes
	14,21	30	35,74	15240,99
				0.488
2.3	Energia Electrica que se debe comprar			
	Potencia (Kw)	Tiempo de operación (h)	Kwh/mes	\$/mes
	0,00	24	0,00	0,00
				0.000
2.4	Materia Prima (recortes)			
	Kg/mes	\$/kg	\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
	300000	0,001	300,0	0,010

Tabla 42 (cont.)

2.5	Sueldos y salarios				
	Personal	Número	\$/empl,	\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
	Jefe de prod,	1	2000,00	2000,00	
	Total Ingenieros			2000,00	0,06
	Obrero operación	3	350,00	1050,00	
	Obrero ensacado	3	350,00	1050,00	
	Total Obreros			2100,00	0,07
	Total sueldos			4100,00	0,13
2.6	Insumos				
	Tipo de Insumo	m3/día	m3/mes	\$/mes: \$0,7/m3	Costo (\$/kg C,A)
	Agua	81,14	2434,19578	1703,94	0,05
	Tipo de Insumo			\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
	Telefono			100,00	0,003
	Total Insumos			1803,94	0,06
2.7	Embalaje				
	Saco/mes	\$/saco		\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
	1301	0,25		325,16	0,01
	Total de los egresos			47282,60	1,51
3.-	Ingresos – egresos			\$/mes	Costo (\$/kg C,A)
				80761,80	2,59

La Tabla 43 y la Tabla 44 detallan los costos fijos y variables que se derivarán de la operación normal de la planta. La Tabla 45 muestra la utilidad neta que se obtendrá por kilogramo de carbón activado producido.

Tabla 43 : Costos fijos de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.

Costos Fijos	
Detalle	Costos (\$/ Kg CA)
Inversión total fija	0,255
Amortización	0,562
Insumos	0,058
Salarios	0,131
Luz Eléctrica	0,000
TOTAL	1,006

Tabla 44 : Costos variables de la planta de carbón activado de tagua. Fuente: Autor.

Costos Variables	
Detalle	Costos (\$/ Kg CA)
Combustible	0,488
Materia Prima	0,010
Embalaje	0,010
TOTAL	0,508

Tabla 45 : Resumen de la utilidad de la planta por kilo de carbón activado vendido. Fuente:

Autor.

Detalle de la utilidad	
Variable	\$/ Kg CA
Costos Totales: Costos fijos + Costos Variables	1,51
Ingresos totales: Precio de Venta del carbón + Energía Eléctrica	4,10
Utilidad	2,59
Relación beneficio/costo	1,64

La Tabla 46 indica el balance de energía de los equipos de la planta calculado con la potencia de los mismos y su el tiempo de operación. Como se había mencionado anteriormente, el vapor producido por la caldera será suficiente para cubrir la demanda de energía de la planta y además existirá una cantidad de energía remanente que podrá ser vendida.

Tabla 46 : Balance de energía de los equipos de la planta e ingresos generados por la venta de energía eléctrica producida por el vapor excedente. Fuente: Autor.

Balance de energía de los equipos de la planta			
Equipo	Potencia (kw)	Tiempo de operación (h/día)	Energía (kwh)
Venterol horno	0,55	24	13,2G
Venterol Cámara post-combustión	0,55	24	13,2
Caldero	0,05	24	1,2
Molino	75	24	1800
Venterol Torre de enfriamiento	0,83	24	19,90
Tornillo	4,47	24	107,28
Selladora de sacos de yute	0,1495	12	1,794
Total	81,60		1956,57

Por último, la Tabla 47 compara la diferencia del precio de venta de los recortes de tagua como combustible, polvillo de tagua y del carbón activado de tagua. Como se puede observar, el carbón activado de tagua tiene un precio de comercialización mucho mayor que el polvillo de tagua y los recortes, lo que justificaría nuevamente la inversión en la planta propuesta.

Tabla 47 : Precios de venta de los productos derivados de los residuos de tagua. Fuente: Autor.

Comparación de precios de los productos derivados de los residuos de tagua	
Precio de venta de los recortes de tagua (\$/kg)	0,01
Precio de venta del polvillo de tagua (\$/kg)	0,08
Precio de venta del carbón activado de tagua (\$/kg)	4

CAPITULO IV

DISCUSION

4.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que la tagua es un material interesante para la producción industrial de carbón activado debido a sus características intrínsecas, que lo diferencian de las materias primas tradicionales usadas para producir carbón. Se puede observar que:

- Aunque la materia prima inicial tiene una dureza muy alta, el material después de ser carbonizado y activado presenta mucha fragilidad, por lo que el carbón obtenido solo podrá ser utilizado como carbón en polvo, no en forma granular.
- La materia prima inicial está formada en su mayoría por el polisacárido manano, a diferencia de otros residuos agroindustriales utilizados para la producción de carbón activado, cuyo principal constituyente es la celulosa.
- Las pruebas de decoloración de azúcar indican que el carbón activado de tagua no es un buen material para la decoloración de azúcar morena. Por esta razón, no podría ser usado en la industria de gaseosas o bebidas para dicho propósito.
- El índice de azul de metileno, en contraste, indica que el carbón activado de tagua es apto para la despigmentación de colorantes orgánicos. Por lo tanto, este carbón activado puede ser utilizado en la industria de textiles para el tratamiento de sus efluentes.
- Por su elevado índice de yodo y microporosidad, el carbón activado de tagua puede ser utilizado para potabilizar aguas residuales y también para el tratamiento de gases que contengan compuestos orgánicos, por ejemplo, como parte de filtros de chimeneas y filtros de cigarrillos.

- La microscopía electrónica de barrido MEB muestra que la estructura de la tagua es especial en todas las fases del proceso. La tagua ya presenta porosidad después de la carbonización, y micro, meso y macroporosidad después de la activación. En cambio, otros materiales como el cuesco de palma, no presentan ningún tipo de poro después de la pirolisis y solo después de la activación, sufren la formación de micro, meso y macroporos.
- Además, la simetría que presentan los poros del carbón de tagua es sui-generis. Posiblemente, la creación de estos macroporos “ordenados” después de la carbonización del material, se debe a la ruptura de las células del tejido del endosperma. Los poros conservan la estructura del tejido preliminar. Esto se ha inferido al comparar la distribución celular del tejido de la semilla de tagua y los macroporos encontrados después de la carbonización del material.
- Las pruebas de carbonización muestran que los dos tipos de residuos de tagua (tagua hueca y maciza) tardan el mismo tiempo en pirolizarse y presentan el mismo rendimiento. Esto significa que estas variables no dependen de la forma del residuo, por lo que pueden ser procesadas bajo condiciones iguales.
- El análisis próximo muestra que los recortes de tagua tiene un gran contenido de material volátil (84.9%), mismo que será eliminado durante el proceso de carbonización. Esta es la razón principal por la que se debería establecer la planta industrial cerca de las fábricas de animelas. En este caso, en la ciudad de Manta.
- El proceso de producción de carbón activado de tagua a nivel industrial comprenderá dos fases. La primera fase tendrá como objetivo la producción del carbón activado propiamente dicho y estará formada de diferentes operaciones: carbonización y

activación en un horno rotatorio, enfriamiento, molienda y ensacado. La segunda fase tendrá como objetivo el tratamiento de los gases producidos en el horno y estará formada por varias operaciones: post-combustión, enfriamiento, limpieza de material particulado y limpieza de dióxido de azufre. Además, la planta constará de un sistema de enfriamiento de agua que permitirá su recirculación.

- Se ha elegido un horno rotatorio para este proceso debido a que este tipo de horno permite realizar la carbonización y activación del material al mismo tiempo. Además, a diferencia de los demás tipos de hornos, el horno rotatorio permite el procesamiento del material de forma continua, eliminando la generación de stocks en proceso que pueden llegar a ser costosos y ocupan espacio.
- El carbón activado de tagua presenta poca dureza, por lo que su pulverización resultará ser bastante sencilla. Es por esta razón que se ha escogido un molino de martillos para dicha operación, que permitirá la molienda del material en seco. Además, por la fragilidad del producto, los martillos del molino no deberán ser cambiados constantemente, ya que no presentarán gran desgaste.
- El sistema de tratamiento de gases se encuentra diseñado de tal manera que las emisiones al ambiente de esta industria tengan una composición que cumpla con las normativas ambientales nacionales vigentes. Esto asegurará que la planta no tenga problemas con las autoridades pertinentes durante su operación y que cumpla con su responsabilidad ambiental y ética, generando riqueza para el país pero a su vez asegurando un desarrollo sostenible.
- El establecimiento de la planta de producción de carbón activado de tagua con la configuración planteada promete ser rentable. Se obtuvo un TIR del 27%, un VAN

positivo y una utilidad neta de 2.59 dólares por kilogramo de carbón activado vendido. Además, se estima que se recuperará la inversión en el octavo año de operación de la planta.

- Se puede concluir que la producción de carbón activado de tagua realmente genera un valor agregado al residuo producido en el proceso de producción de animelas. La diferencia entre el precio comercial de los recortes de tagua, del polvillo de tagua y del carbón activado de tagua es muy notable. Mientras que el valor de los recortes de tagua como combustible se encuentra en un dólar por quintal y el precio del polvillo de tagua es ocho dólares el quintal, el carbón activado de tagua puede ser vendido a cuatro dólares el kilogramo.

4.2 Recomendaciones

- En estudios posteriores, se recomendaría realizar pruebas especializadas al carbón de tagua para establecer su potencial para ser utilizado como catalizador. La simetría de poros que presenta el producto podría llegar a ser muy interesante para este campo y también, utilizar el carbón activado como base de catalizador sería quizás una aplicación más lucrativa.
- Se recomendaría realizar estudios para establecer la composición elemental real de la tagua y comprobar los gases que la misma genera al carbonizarse y activarse. Una vez hecho esto, se debería realizar un recálculo del dimensionamiento de los equipos de la planta.
- Para el establecimiento de la planta de producción de carbón activado de tagua, se debe hacer estudios de diseño de los equipos en mayor detalle, donde se muestre información

como planos de construcción de los instrumentos, puntos críticos de control, planos de tuberías e instalaciones, entre otros.

- Se debería hacer un estudio económico a mayor profundidad para determinar segmentos específicos de mercado y comprobar con mayor exactitud la demanda que tendrá el carbón activado de tagua.
- Asimismo, se debería realizar un estudio de disponibilidad de la materia prima, para determinar la cantidad real de recortes de tagua que estará disponible para el procesamiento en la planta de producción.

Referencias

- A, A. G., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirolisis de Biomasa*. Alemania: Kassel university press GmbH, Kassel.
- Acelas, N., Ruiz, R., & López, L. (2010). *Quim Nova*, 33(7), 1500.
- Acosta, M. (1990). Tagua or Vegetable Ivory- A forest product of Ecuador. *Economic Botany*, 46-57.
- Acuña, O. (2012). *Informe de resultados de análisis cuesco de tagua*. Quito: DECAB Escuela Politécnica Nacional.
- ASTM. (s.f.). *Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon*. USA.
- ASTM. (s.f.). *Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon d 2862-82*. USA.
- ASTM. (s.f.). *Test Methods for Moisture in Activated Carbon D 2867-91*. USA.
- Banco Central del Ecuador. (2012). *Comercio Exterior*. Ecuador: Banco Central del Ecuador.
- Banco Central del Ecuador. (2013). *Tasas de Interés*. Quito: Banco Central del Ecuador.
- Bansal, R., & Goyal, M. (2005). *Activates Carbon Adsorption*. Estados Unidos: Taylor & Francis.
- Bansal, R., Donnet, J., & Stoeckli, F. (1988). *Active Carbon*. Estados Unidos: Ed. Marcel Dekker.
- Barfod, A., Bergmann, B., & Pedersen, H. (1990). The vegetable ivory industry: surviving and doing well in Ecuador. *Economic Botany*, 44(3), 293-300.
- Bernadis et al. (2008). Efecto de la quema prescrita de un pastizal sobre el balance de CO₂. *Agrotecnia*, 18, 11-16.

- Borgtoft, H., & Balslev, H. (1992). *Palmas útiles: Especies ecuatorianas para agroforestería y extractivismo*. Ecuador: Abya-Yala.
- Capelle, A., & de Vooy, F. (1983). *Activated carbon ... a fascinating material*. Netherlands: Norit N.V. Amersfoort.
- Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Diaz de Santos.
- CEFIC, Conseil Europeen des Federations de l'Industrie Chimique. (s.f.). *Methodes de controle d'évaluation des charbons actifs*.
- Choct, M. (2007). *Role of Biotechnology in utilization of alternative feed ingredients for monogastric animals*. Australia: University of New England.
- CocaCola. (2002). *The Coca Cola Quality System. Norma interna "Prueba de campo para carbón activado"*.
- Colina, F., Caballero, I., & Costa, J. (2002). *Diseño básico de hornos rotatorios para el tratamiento de minerales*. España: Universitat de Barcelona.
- de la Torre, E. (2011). *Predrito aprende a ser ingeniero. Operaciones Unitarias Básicas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- de la Torre, E., & González, M. (2007). Estudio del proceso para la producción de carbón activado a partir de cuescos de palma africana. *Revista Politécnica*, 27, 27-37.
- de la Torre, E., & Guevara, A. (2005). *Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados*. Lima: Universidad Católica del Perú.
- El Diario. (8 de Junio de 2013). Incrementarán las tarifas para quienes consuman más de 500 kwh. *El Diario Manabita de libre pensamiento*, pág. 1.
- Espinoza, E., & Mann, M. (1999). *Identification guide for ivory and ivory substitutes*. Estados Unidos: CITES Secretariat.
- Fabritec Engineering. (2013). *PowerFire DH2-200*. Quito: Farbitec.
- FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. Italia: Departamento de Montes.
- Fischben. (2013). *Cosedora portátil*. Fischben.

- Flores, R., & Quinteros, H. (2008). *Diseño de horno tipo retorta para elaborar carbón vegetal*. (Tesis de grado de Ingeniería Mecánica): Obtenido del repositorio digital de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
- Fogler, S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. México: Prentice Hall.
- Gómez et al. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*. Alemania: Kassel University Press.
- Gomez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de la biomasa*. Alemania: Kassel University press GmbH.
- Guevara, A., de la Torre, E., & Criollo, E. (2007). Tratamiento de aguas superficiales con carbón activado granular, una alternativa de purificación con bajos costos. *Revista Politécnica*, 27(2), 53.
- Hägglund, P. (2002). *Mannan-hydrolysis by hemicellulases*. Sweden: Lund University. Department of Biochemistry.
- HBA. (2013). *Ventilador helicodal bifurcado*. España: Sodeca.
- Hussain, A., Nasir, A., Darus, A., & Zainal, A. (2006). (U. T. Malaysia, Ed.) *Jurnal Teknologi*, 45(A), 43.
- Klein, C., & Hurlbut, C. (1999). *Manual of Mineralogy*. S.L: John Wiley & Sons Inc.
- Korea Trade. (2011). *Planta de carbón activado*. Korea: Lucky Goldstar International Corp.
- Kunii, D., & Chisaki, T. (2008). *Rotary Reactor Engineering*. The Netherlands: Elsevier.
- Lleó, A. (2008). *Tratamiento térmico de residuos*. Ponencia presentada en el Centro de Tecnologías Limpias VAERSA: Valencia.
- Ludlow, D. (2001). *Missouri University of Science and Technology*. Obtenido de <http://chemeng.mst.edu/research/facultyresearch.html>
- Mantilla, M. (1993). *Diseño de una planta para la producción de carbón activado a partir de cuescos de mani de árbol*. . (Tesis de grado de Ingeniería Química) : Recuperada de la facultad de Ingeniería Química de la EPN.
- Mardesen, J., & House, I. (1992). *The chemistry of gold extraction*. England: Ellis Horwood.
- Marley. (2013). *Torre de enfriamiento*. AN SPX Brand.

- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*. Gran Bretaña: Ed. Elsevier.
- Medina, B., Villegas, P., & de las Posas, C. (2003). Estudio sobre la factibilidad de preparar carbones activados a partir de recursos biomásicos tropicales. *III Concurso Taller "absorbentes para la protección ambiental"* (págs. 1-10). Argentina: Universidad de la Plata.
- Menéndez, A. (2007). *El carbón en la vida cotidiana*. España: CSIS.
- Ministerio del Salud. (2008). *Acuerdo No. 0818*. Quito: Ministerio de Salud.
- Mintegui, S. et al. (2003). Uso del carbón activado en las sospechas de intoxicación en urgencias de pediatría. *Arch Pediatr Urug* 2003, 3, 166- 175.
- Mitula Casas. (2013). *Plusvalía*. Recuperado el 05 de 08 de 2013, de <http://casas.mitula.ec/offer-detalle/10083/96665187977144881/9/1/terreno-industrial-manta/Plusvalia.com>
- Mohd, A., & Wan, S. (2004). Comparison on pore development of activated carbon produced from palm shell and coconut shell. *Bioresource Technology*, 93(1), 63-69.
- Montufar, P. (2008). *Estudio de factibilidad para la producción y exportación de animelas de tagua al mercado italiano con perspectiva de crecimiento hacia otros mercados europeos*. (Tesis de grado de Ingeniería Empresarial): Recuperada del Repositorio de la EPN.
- Mutzke, T. (2012). *Patente n° EP2510100A1*. Europa.
- Navarro, F. (2006). *Estudio de las cadenas productivas de aguaje y tagua Reserva Nacional Pacaya Samiria, Loreto – Perú*. Perú: Pro-Naturaleza.
- Ocon, J., & Tojo, G. (1982). *Problemas de Ingeniería Química*. Aguilar.
- Ortiz, F. (2009). *Proyecto de factibilidad para la exportación de bisutería de tagua con incrustación de piedras semipreciosas al mercado de Georgia (EEUU) periodo 2009-2018*. (Tesis de grado en Comercio Exterior e Integración): Recuperada de Repositorio de la UTE.
- Oudenne, P. (1990). La experiencia en la carbonización, activación y regeneración de carbón activado. *Simposio Metalurgia Extractiva, TECSUP*, (pág. 4). Peru.

- Pazmiño, J. (2007). *Estudio de la adsorción de oro en carbón activado a diferentes condiciones y modelado de la cinética de adsorción en función del tamaño de partícula*. (Tesis de grado de Ingeniería Química): Recuperada del repositorio digital de la USFQ (86340).
- Perry, J. (1981). *Manual del ingeniero químico Tomo II*. México: McGraw- Hill Book Company.
- Perry, R., Green, D., & Maloney, J. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. España: McGraw Hill.
- Presidencia de la República del Ecuador. (05 de 08 de 2013). *Trámites Ciudadanos*. Recuperado el 05 de 05 de 2013, de <http://www.tramitesciudadanos.gob.ec/tramite.php?cd=582>
- Raveendran, K., Anuradda, G., & Kartic, C. (1995). *Fuel*, 74(12), 1812.
- Raveendran, K., Anuradda, G., & Kartic, C. (1996). *Fuel*, 75(8), 987.
- Reboiras, M. (2006). *Química, la ciencia básica*. España: Thomson.
- Rodriguez, R., Echegaray, M., Castro, M., Palacios, C., Hektor, K., & Udaquiola, S. (2008). Modelo y diseño de tren de lavado de gases provenientes de la incineración de residuos. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 12(3), 5-14.
- Rodriguez-Reinoso, F., & Molina, M. (2004). Adsorbentes en la solución de algunas problemas ambientales. *CYTED*, 3(38).
- Rufnek. (2013). *Tornillos sin fin*. EEUU: Rufnek.
- Sarmiento et al. (2004). Preparación del carbón activado mediante la activación química del carbón mineral. *Ciencia*, 12(1), 52-63.
- Shanghai Zenith Company. (2013). *Cotización trituradora de martillos*. China: Shanghai Zenith Company.
- Smith, J. (1998). *Ingeniería de la cinética química*. Mexico: Continental.
- Timel, T. (1957). Vegetable Ivory as a source of mannan polysaccharide. *Canadian Journal of Chemistry*, 35, 333-338.
- Velásquez, J. (1998). Productivity and sustainability of a vegetable ivory plant (*Phytelephas Aequatorialis*, *Arecaceae*) under three management regimes in Northwestern Ecuador. *Economic Botany*, 52, 168-182.

- Viswanathan, B., Sivasanker, S., & Ramaswamy, A. (2009). *Catalysis Principles and Applications*. New Delhi: Norosa Publishing House Pvt. Ltd.
- Wark, K., & Warner, C. (2002). *Contaminación del aire*. México: Limusa S.A.
- Yang, H., Yan, R., Chin, T., Liang, T., Chen, H., & Zheng, C. (2004). *Energy and Fuels*, 18, 1814.
- Zambrano, M., & Martínez, C. (2005). *Proyecto de inversión agro-artesanal para la producción y exportación de joyas de fantasía a base de tagua*. (Tesis de grado de Ciencias Humanísticas y Económicas): Recuperada del repositorio digital de la ESPOL.

Anexo A : Registros de operación del horno Nichols

Condiciones Operatorias Día 1 CARBONIZACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H ₂ O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H ₂ O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H ₂ O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Carga 1 tagua maciza: 1 kg. Peso calcina: 317,5 g, Rendimiento: 31,75%</i>								
1	11h15	20	30	25	0,9	-1,0	4	42
	11h25	218	30	25	0,9	-1,0	4	42
	11h45	294	25	20	0,9	-1,0	4	2
2	12h15	290	30	25	0,9	-1,0	4	60
	12h45	382	30	25	0,9	-1,0	4	48
	13h05	402	30	25	0,9	-1,0	4	42
	13h15	409	30	25	0,9	-1,0	4	38
3	13h30	422	30	25	0,9	-1,0	4	35
	14h45	484	30	25	0,9	-0,5	4	20
4	14h53	490	30	25	0,9	-0,5	4	20
<i>Carga 2 tagua agujereada: 1 kg. Peso calcina: 264,2 g, Rendimiento: 26,42%</i>								
5	15h05	470	30	25	0,9	-0,5	4	19
6	15h20	497	30	25	0,9	-1,0	4	18
7	15h35	500	30	25	0,9	-1,0	4	17
<i>Carga 3 tagua maciza: 1 kg. Peso calcina: 283,9 g, Rendimiento: 28,39%</i>								
8	15h45	336	30	25	0,9	-0,5	4	17
9	16h00	480	30	25	0,9	-0,5	4	12
10	16h15	496	30	25	0,9	-0,5	4	10

Observaciones Día 1
1. Se arranca el horno con Carga 1 de 1 kg
2. Se cambia gas
3. Se toma Muestra 1
4. Se saca Carga 1
5. Se introduce Carga 2 de 1 kg
6. Se toma Muestra 2
7. Se saca Carga 2
8. Se introduce Carga 3 de 1 kg
9. Se toma Muestra 3
10. Se saca Carga 3

Condiciones Operatorias Día 1 CARBONIZACIÓN (Continuación)								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H₂O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H₂O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H₂O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Carga 4 tagua aguhereada: 1 kg. Peso calcina: 313,4 g, Rendimiento: 31,34%</i>								
1	17h10	302	30	25	0,9	0,5	4	20
2	17h17	423	30	25	0,9	0,5	4	18
3	17h27	449	30	25	0,9	0,5	4	15
4	17h32	465	30	25	0,9	0,5	4	15
5	17h37	471	30	25	0,9	0,5	4	12
6	17h42	480	30	25	0,9	0,5	4	12
<i>Carga 5 tagua maciza: 1 kg. Peso calcina: 297 g, Rendimiento: 29,7%</i>								
7	17h45	415	30	25	0,9	0,5	4	9
8	17h55	475	30	25	0,9	0,5	4	9
9	18h00	492	30	25	0,9	0,5	4	10
10	18h05	497	30	25	0,9	0,5	4	10
11	18h10	502	30	25	0,9	-1,0	4	10
12	18h17	511	30	25	0,9	-1,0	4	8

Observaciones Día 1 (Continuación)
1. Se introduce Carga 4 de 1 kg
2. Se saca Muestra 4: M4
3. Se saca Muestra 5: M5
4. Se saca Muestra 6: M6
5. Se saca Muestra 7: M7
6. Se saca Carga 4 y muestra MCF4
7. Se introduce Carga 5 de 1 kg
8. Se saca Muestra 8
9. Se saca Muestra 9
10. Se saca Muestra 10
11. Se saca Muestra 11
12. Se descarga Carga 5

Condiciones Operatorias Día 2 CARBONIZACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H₂O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H₂O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H₂O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Carga 6 tagua agujereada: 3 kg. Peso Calcina: 898.5 g.</i>								
1	9h00	171	30	25	0,9	-0,5	4	40
	9h15	325	30	25	0,9	-1,0	4	38
2	9h30	375	30	25	0,9	-1,5	4	34
3	9h45	405	30	25	0,9	-1,025	4	32
	10h00	434	30	25	0,9	-1,025	4	28
4	10h15	445	30	25	0,9	-1,025	4	26
	10h30	467	30	25	0,9	-1,025	4	24
5	10h45	487	30	25	0,9	-1,025	4	23
6	11h00	501	30	25	0,9	-1,0	4	22

Observaciones Día 2
1. Se introduce Carga 6 de 3 kg
2. Hay gases en la chimenea
3. Aumenta gases en la chimenea
4. Todavía hay humo en la chimenea
5. Todavía hay humo en la chimenea
6. Para de salir gases. Se descarga Carga 6

Condiciones Operatorias Día 3 CARBONIZACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H2O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H2O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H2O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Carga 7 tagua maciza: 3 kg. Peso calcina: 801,6 g,</i>								
1	12h15	170	30	25	0,9	-0,5	4	40
	12h23	310	30	25	0,9	-1,0	4	35
2	12h40	375	25	25	0,9	-1,0	4	30
	13h30	488	30	25	0,9	-1,0	4	22
	13h50	525	30	25	0,9	-1,0	4	19
3	14h00	548	30	25	0,9	-1,0	4	21
<i>Carga 8 tagua maciza: 3 kg. Peso calcina: -----</i>								
4	14h10	355	30	25	0,9	-1,0	4	21
	14h20	485	30	25	0,9	-1,0	4	12
	14h30	506	30	25	0,9	-1,0	4	10
	14h40	534	30	25	0,9	-1,0	4	2
5	14h55	550	30	25	0,9	-1,0	4	58
<i>Carga 8 y 9 tagua maciza. Peso Carga 9: 3 kg. Peso Calcina: -----</i>								
6	15h25	350	30	25	0,9	-0,5	4	58
	15h40	533	30	25	0,9	-0,5	4	50
	15h55	545	30	25	0,9	-1,0	4	45
	16h10	591	30	25	0,9	-1,0	4	40
	16h35	635	30	25	0,9	-1,0	4	34
7	16h45	650	30	25	0,9	-1,0	4	30
<i>Carga 10 tagua maciza: 3 kg. Peso Calcina total carga 8, 9, 10: 2262,8 g</i>								
8	16h55	475	30	25	0,9	-1,0	4	30
	17h10	614	30	25	0,9	-1,0	4	28
	17h25	657	30	25	0,9	-1,0	4	25
	17h50	690	30	25	0,9	-1,0	4	20
9	18h05	700	30	25	0,9	-1,0	4	18

Observaciones Día 3
1. Se arranca el horno con carga 7
2. Empieza a salir humo de la chimenea
3. Se descarga carga 7
4. Se introduce carga 8
5. Se descarga carga 8 pero falto tiempo de carbonización
6. Se mete al horno carga 8 nuevamente y 9
7. Se descarga carga 8 y 9

8. Se mete al horno carga 10
9. Se descarga carga 10

Condiciones Operatorias Día 3 y 4 CARBONIZACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H₂O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H₂O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H₂O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Carga 11 tagua maciza : 3 kg</i>								
1	18h05	508	30	25	0,9	-1,0	4	20
	18h40	729	30	25	0,9	-1,0	4	15
2	19h15	748	30	25	0,9	-1,0	4	10
<i>Carga 12 tagua maciza : 3 kg</i>								
3	19h30	531	30	25	0,9	-1,0	4	10
	20h20	772	30	25	0,9	-1,0	4	2
4	20h35	786	30	25	0,9	-1,0	4	0
<i>Carga 13 tagua maciza : 3 kg</i>								
5	11h55	136	35	30	0,9	-1,0	0	30
	12h20	398	35	30	0,9	-1,5	0	19
	12h35	443	35	30	0,9	-1,5	0	12
	13h00	500	30	25	0,9	-1,5	0	2
6	14h00	534	30	25	0,9	-1,5	0	55
	14h30	573	30	25	0,9	-1,5	0	45
7	17h30	620	30	25	0,92	-1,5	0	40

Total producción de carbón para activar: 7853 g
--

Observaciones Día 3 y 4
1. Se introduce carga 11
2. Se descarga carga 11
3. Se introduce carga 12
4. Se descarga carga 12
5. Se introduce carga 13
6. Se cambia de cilindro
7. Se descarga carga 13 por arriba

Condiciones Operatorias Día 4 y 5 ACTIVACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H₂O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H₂O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H₂O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
<i>Calentamiento del horno día 4</i>								
1	17h40	630	45	30	1,05	-1,5	0	60
2	17h40	688	35	15	1,26	-1,0	0	32
<i>Calentamiento del horno día 5</i>								
	07h00	838	35	10	1,55	-1,0	0	2
3	11h03	848	40	29	0,99	-2,0	0	70
4	11h31	906	40	29	0,99	-2,0	0	78
	11h35	909	40	29	0,99	-2,0	0	78
	11h55	926	35	29	0,9	-2,0	0	78
	12h50	962	40	30	0,98	-2,0	0	55
5	13h05	970	35	30	0,92	-2,0	0	53

Observaciones Día 4 y 5
1. Se arranca el horno para dejarle toda la noche para calentarse
2. Se deja la noche con 2 cilindros llenos y 2 a la mitad
3. Se cambia de cilindros. 2 cilindros llenos
4. Se cambia 2 cilindros llenos
5. Se cambia de atmósfera a reductora y se abre vapor a 1/4 de valvula

Condiciones Operatorias Día 5 ACTIVACIÓN								
Observación	Hora	Temp. (°C)	Caudal Aire Δ Pa (mm H2O)	Caudal Gas Δ Pa (mm H2O)	Lambda (λ)	Presión Horno (mm H2O)	Agitador (RPM)	Presión Alta Gas (psig)
Carga 1 C1: Carbón de tagua 4 kg								
Burn off: 70.57%. Peso CA: 1177.4 g								
# Yodo: 1000. Tiempo: 3 h. Vapor: 1/4 válvula = 15 L/h								
1	13h30	893	35	30	0,9	-2,5	4	50
	13h35	895	35	30	0,9	-2,5	4	50
	13h45	915	35	30	0,9	-2,5	4	48
	13h55	921	35	30	0,9	-2,5	4	46
	14h05	925	35	30	0,9	-2,5	4	45
	14h15	925	35	30	0,9	-2,5	4	43
2	14h30	924	35	30	0,9	-2,0	4	42
	14h32	911	35	30	0,9	-2,0	4	40
	14h35	920	35	30	0,9	-2,0	4	40
	15h15	923	35	30	0,9	-2,0	4	38
	15h20	923	35	30	0,9	-2,0	4	38
3	15h30	923	35	30	0,9	-2,0	4	37
	16h00	922	35	30	0,9	-2,0	4	36
4	16h30	923	35	30	0,9	-2,0	4	32
Carga 2 C2: Carbón de tagua 3329 g								
Burn off: 61.4%. Peso CA: 1283 g								
# Yodo: 1009. Tiempo: 4 h. Vapor: 1/4 válvula = 15 L/h								
5	17h00	917	20	15	0,94	-2,0	4	30
	17h05	860	12,5	10	0,94	-2,0	4	30
	17h30	840	20	15	0,94	-1,5	4	30
	17h35	850	20	15	0,94	-1,5	4	30
6	18h00	860	20	15	0,94	-1,5	4	30
	18h05	850	20	15	0,94	-1,5	4	30
	18h15	852	20	15	0,94	-1,5	4	30
	18h30	852	20	15	0,94	-1,5	4	30
7	19h00	851	20	15	0,94	-1,5	4	28
8	20h00	840	20	15	0,94	-1,5	4	22
	20h10	840	30	25	0,9	-1,4	4	22
	20h15	860	25	20	0,9	-1,5	4	22
9	21h05	865	25	20	0,9	-1,5	4	20

Observaciones Día 5
1. Se introduce Carga 1 C1 de 4 kg de carbón de tagua (maciza y hueca)
2. Se toma la muestra 1hC1
3. Se toma la muestra 2hC1
4. Se descarga carga 1 C1 y se toma muestra 3hC1
5. Se introduce Carga 2 C2
6. Se toma muestra 1hC2
7. Se toma muestra 2hC2
8. Se toma muestra 3hC2
9. Se toma muestra 4hC2. Se descarga C2

Anexo B: Detalle de cálculo del diseño de los equipos de la planta

[diseño planta.xlsx](#)

Anexo C: Muestra de los certificados de calibración de los equipos de investigación utilizados

[catálogos equipos\CERTIFICADO DE CALIBRACION balanza.pdf](#)

Anexo D: Detalle del análisis económico preliminar

[hoja de cálculo análisis económico.xls](#)

Anexo E: Detalle de cálculo TIR y VAN

[calculo TIR y amortizacion.xlsx](#)

Anexo F: Muestra de cotizaciones referenciales utilizadas para estimar la inversión inicial de la planta

[catálogos equipos\CALDERO DE 200 BHP NATHALIE DE LA TORRE 18 - 5 - 2013.pdf](#)

[catálogos equipos\cosedora de sacos de yute.pdf](#)

[catálogos equipos\COTIZAICON DE HM4008-75 DESDE ZENITH 2013-4-4.pdf](#)

[catálogos equipos\tornillo sin fin.pdf](#)

[catálogos equipos\SE07 HBA 2012ES.pdf](#)