

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO  
USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Producción de hidrocarbón activado a partir de residuos  
lignocelulósicos para la remoción de contaminantes emergentes  
orgánicos presentes en aguas residuales**

**Rafaela Contreras Guerrero**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniera Química

Quito, 20 de diciembre de 2023

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO  
USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Producción de hidrocarbón activado a partir de residuos lignocelulósicos  
para la remoción de contaminantes emergentes orgánicos presentes en  
aguas residuales**

**Rafaela Contreras Guerrero**

**Nombre del profesor, Título académico    Andrea Carolina Landázuri Flores, Ph.D.**

Quito, 20 de diciembre de 2023



## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

## **RESUMEN.**

El proyecto se enfoca en la producción de hidrocarbón activado a partir de cáscaras de banana mediante ácido cítrico, con el objetivo de eliminar fármacos, considerados contaminantes emergentes, presentes en aguas residuales. La elección de la cáscara de banana como materia prima se basa en su amplia disponibilidad y propiedades fisicoquímicas, aprovechando los residuos agrícolas generados en Ecuador, uno de los principales exportadores de banano. Los fármacos, al ser considerados contaminantes emergentes, plantean desafíos significativos en los procesos tradicionales de tratamiento de aguas residuales en el país. Este proyecto aborda esta problemática al diseñar un proceso innovador que utiliza la carbonización hidrotermal (HTC) para obtener hidrocarbón activado con propiedades adsorbentes específicas para estos compuestos farmacéuticos. La planta industrial diseñada transforma las cáscaras de banana en un producto de alto valor, destinado a su implementación en plantas de tratamiento de aguas. El análisis económico demuestra la viabilidad financiera del proyecto, anticipando ganancias a partir del sexto año con una producción inicial de 2478 toneladas anuales. Este proyecto no solo ofrece una solución sostenible e innovadora para la gestión de residuos agrícolas, sino que también aborda de manera específica la problemática de los contaminantes emergentes, como los fármacos, en aguas residuales, destacando la importancia de una respuesta integral y económicamente viable.

**Palabras clave:** hidrocarbón, carbonización hidrotermal asistida, adsorbente, cáscaras de banana, contaminantes emergentes, ácido cítrico

### **ABSTRACT**

The project focuses on the production of activated carbon from banana peels using citric acid, aiming to remove pharmaceuticals, considered emerging contaminants, from wastewater. The choice of banana peels as a raw material is based on their wide availability and physicochemical properties, leveraging agricultural waste generated in Ecuador, one of the leading banana exporters. Pharmaceuticals, classified as emerging contaminants, pose significant challenges in the traditional wastewater treatment processes in the country. This project addresses this issue by designing an innovative process that utilizes hydrothermal carbonization (HTC) to obtain activated carbon with specific adsorbent properties for these pharmaceutical compounds. The designed industrial plant transforms banana peels into a high-value product intended for implementation in water treatment plants. The economic analysis demonstrates the financial viability of the project, anticipating profits from the sixth year with an initial production of 2478 tons annually. This project not only offers a sustainable and innovative solution for agricultural waste management but also specifically addresses the issue of emerging contaminants, such as pharmaceuticals, in wastewater, emphasizing the importance of a comprehensive and economically viable approach.

**Keywords:** hydrochar, hydrothermally assisted carbonization, adsorbent, banana peels, emerging contaminants, citric acid

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	11
1.1.1 Contaminantes emergentes en aguas residuales .....	11
1.1.2 Métodos de Tratamiento de aguas residuales para la eliminación fármacos.....	12
1.1.3 Carbonización hidrotermal .....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2. BASES DEL DISEÑO .....</b>	<b>19</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO.....	19
2.2 HIDROCARBÓN (HC) ACTIVADO .....	19
2.3 DESCRIPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....	19
2.4 LIMITACIONES .....	20
2.5 LIMITACIONES FIJAS O EXTERNAS .....	20
2.6 LIMITACIONES VARIABLES O INTERNAS .....	21
<b>3. DISEÑO DEL PROCESO.....</b>	<b>22</b>
3.1 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA .....	22
3.1.1 Pretratamiento de los residuos.....	22
3.1.2 Proceso de reacción.....	23
3.1.3 Proceso de purificación.....	25
3.1.4 Diagrama del proceso .....	26

<b>4. DISEÑO DE LA PLANTA.....</b>	<b>28</b>
4.1 BASE DE CÁLCULO .....	28
4.2 BALANCE DE MASA .....	29
4.3 BALANCE DE ENERGÍA .....	29
4.4 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS .....	30
4.5 UBICACIÓN DE LA PLANTA .....	31
<b>5. ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>33</b>
5.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO .....	33
5.1.1 Inversión de capital fijo .....	33
5.2 CAPITAL DE TRABAJO Y COSTO DE PRODUCCIÓN .....	34
5.3 FLUJO DE CAJA Y RENTABILIDAD .....	35
5.4 ANÁLISIS DE FLEXIBILIDAD.....	37
<b>6. IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL .....</b>	<b>38</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>41</b>
<b>8. REFERENCIAS.....</b>	<b>43</b>
<b>ANEXO A: MÉTODOLÓGÍA .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO B: BALANCE DE MASA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO C: DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO D: ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>66</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen del balance de masa para proceso propuesto .....	28
Tabla 2: Consumo energético equipos de cada subproceso .....	29
Tabla 3: Diseño de tanques .....	31
Tabla 4: Diseño del reactor .....	31
Tabla 5: Estimación Inversión de Capital Fijo .....	32
Tabla 6: Estimación Capital de Trabajo .....	33
Tabla 7: Estimación de Costos de Producción.....	33
Tabla 8: Ingresos generados en un año.....	33
Tabla 9: Indicadores económicos .....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Procesos aplicados a biomasa .....	21
Figura 2: Ruta de reacción propuesta para la conversión de biomasa en HTC.....	23
Figura 3: Diagrama de flujo del proceso .....	26
Figura 4: Comparación de flujos de caja obtenidos por tres métodos.....	31
Figura 5: Análisis de flexibilidad considerando un caudal mínimo de producción.....	34

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La gestión eficiente del agua es esencial para el bienestar de la humanidad y el equilibrio de los ecosistemas en todo el mundo; sin embargo, la creciente contaminación del agua representa un desafío global que amenaza la disponibilidad de este recurso vital. En este contexto, es crucial encontrar soluciones efectivas y sostenibles para abordar la contaminación del agua y garantizar su calidad para las generaciones presentes y futuras.

#### 1.1.1 Contaminantes emergentes en aguas residuales

La contaminación del agua se refiere a la presencia de sustancias extrañas en los cuerpos de agua, lo que puede tener consecuencias negativas para la vida acuática y para aquellos que dependen del agua para su supervivencia. Se estima que alrededor del 48% de aguas residuales regresan a los diferentes ecosistemas sin pasar por un proceso de tratamiento o reutilización [1], lo que ocasiona una gran problemática global, ya que el agua es esencial para el desarrollo adecuado de la vida humana y la salud de los ecosistemas

En los últimos años, ha surgido un grupo de contaminantes de preocupación creciente: los contaminantes emergentes (CE). Estos son compuestos químicos con diversos orígenes y composiciones que previamente no se consideraban relevantes en términos de su presencia en el medio ambiente, por lo que pasaban desapercibidos. Sin embargo, su detección cada vez más frecuente plantea la posibilidad de impactos negativos en el equilibrio ecológico y la salud humana [2]. Los CE abarcan una diversidad de sustancias químicas que incluyen productos farmacéuticos, artículos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales [3]. Estos elementos no forman parte de la supervisión actual en los programas de tratamiento de aguas, lo que subraya la importancia de considerar su presencia y efectos en la calidad del agua.[3]

Uno de los principales contaminantes emergentes que reportan varios estudios son los fármacos, esto se puede atribuir al crecimiento de la industria farmacéutica, al consumo constante de medicinas y a las propiedades polares y no volátiles que presentan los fármacos. [4]. Si bien es cierto que, gracias al desarrollo de medicinas humanas y veterinarias, el tiempo y calidad de muchas vidas ha mejorado, estos productos también pueden ser causar efectos negativos por su presencia en el agua. Estos agentes contaminantes han sido identificados como disruptores endocrinos, lo que significa que pueden representar amenazas para la salud humana, incluyendo posibles consecuencias como desajustes hormonales, alteraciones en el metabolismo, trastornos neurológicos, problemas inmunológicos y desequilibrios en el sistema reproductor tanto masculino como femenino, entre otros [5]–[7]. Existen muchos tipos de fármacos, sin embargo, los analgésicos y los antiinflamatorios son los que están más presentes en el agua como contaminantes, debido a su producción y consumo, entre los que se puede resaltar al diclofenaco, ibuprofeno, antipirina, prednisolona, naproxeno, acetaminofén, entre otros. [8]

### **1.1.2 Métodos de Tratamiento de aguas residuales para la eliminación fármacos**

Existen varios métodos para el tratamiento de aguas residuales, cada uno de ellos diseñado para abordar contaminantes específicos y adaptarse a diferentes necesidades y condiciones. Los métodos convencionales como los tratamientos de aguas residuales por lodos activados, floculación, filtración biológica, desinfección, entre otros, no cumplen con su propósito para ciertos compuestos emergentes [9] por lo que es importante evaluar otras tecnologías para reducir dichos contaminantes y priorizar un bajo costo económico, energético y ambiental, de ser posible. Algunos de los tratamientos evaluados son fisicoquímicos como la ultrafiltración y oxidación, también se incluyen tratamientos biológicos, con membranas y el uso de adsorbentes [2]. Este último se trata de un proceso en el que un material adsorbente,

atrapa y retiene contaminantes químicos en su superficie. Esta tecnología ha ganado relevancia en los últimos años debido a los resultados confiables y notablemente efectivos que se han obtenido, a esto se suma que los adsorbentes son de sencilla aplicación, alto rendimiento y gran rentabilidad [10]. Uno de los principales adsorbentes utilizados en el tratamiento de agua, es el carbón activado debido a su porosidad que permite capturar en su interior diferentes contaminantes, con respecto a su uso en aguas, se lo utiliza en una proporción de 3,5:1000 [11]. Las tendencias actuales en la ingeniería se centran en la en desarrollar tecnologías sustentables y la utilización de adsorbentes no se han quedado atrás, pues en la búsqueda de nuevos materiales, se ha investigado sobre adsorbentes de origen agrícola, forestales, e agroindustrial en general. Esta es una gran apuesta pues estos pueden ser producidos a partir de residuos provenientes de estas industrias por lo que permite generar productos de alto valor agregado [12] Una posibilidad consiste en someter a la biomasa (lignocelulósica) residual a un proceso de carbonización hidrotérmal (HTC por sus siglas en inglés) para la obtención de hidrocarbón (HC) o hydrochar (en inglés) a partir de un desecho con un valor económico inicial muy bajo, además, cumple con un compromiso de reciclaje y respeto al medio ambiente [13]. La capacidad de adsorción de los HC depende en gran medida de la materia prima empleada y sus características, de igual manera, las condiciones por las que se produce son cruciales [14]. Existen varios métodos de obtención de HC, sin embargo, el proceso HTC presenta varias ventajas comparado con el proceso de pirólisis, y es considerado un proceso “carbono neutro” [15]. El proceso HTC se lleva a cabo en rangos de temperaturas más suaves entre 160°C a 260°C, y a una presión autógena entre 2 y 22 MPa [16], [17]. Además, la carbonización hidrotérmal se lleva a cabo en un ciclo cerrado, donde el agua es fundamental para llevar a cabo el proceso, lo que resulta en una reducción de la emisión de gases y partículas perjudiciales, lo que disminuye la generación de subproductos de la combustión, como los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre [18], [19].

### 1.1.3 Carbonización hidrotermal

La tecnología HTC es un proceso termoquímico en el cual la biomasa se transforma en hidrocarbón (HC) a través de diversas etapas con condiciones de reacción suaves a bajas temperaturas, en ausencia de oxígeno y en condiciones de agua subcrítica, bajo presión de saturación durante varias horas [20]. El producto, es decir, el HC puede ser utilizado para varios propósitos incluyendo la adsorción de impurezas, como se mencionó anteriormente. Si bien es un gran material adsorbente, puede presentar sus limitaciones debido a que la capacidad de competir en la adsorción se ve restringida por una superficie específica reducida y una falta de grupos funcionales en la superficie, lo que conlleva un pobre tratamiento frente a una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos [21], [22]. Tomando en consideración lo mencionado, se han realizado varias investigaciones con la finalidad de modificar y activar el HC para aumentar su capacidad de adsorción de ciertos contaminantes en específico. El uso de ácidos para la activación es una de las propuestas que se plantea para mejorar el HC, en varios estudios se ha logrado confirmar que ciertos ácidos tienen la capacidad de mejorar las características superficiales del HC en lo que respecta a la capacidad de adsorción de diversos compuestos, modificando el tamaño de los poros, los grupos funcionales y los cationes en la superficie [23], [24]. Sin embargo, existen ácidos como el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico y el ácido fosfórico, que, si bien han obtenido buenos resultados en investigaciones sobre activación de HC, son complejos de aplicar a escala industrial debido a la corrosividad y los problemas ambientales que pueden ser asociados a su uso [25]. El ácido cítrico se lo considera como una alternativa útil debido a que es un ácido orgánico débil fácilmente disponible, además es respetuoso con el medio ambiente [26] además, su alto contenido de oxígeno facilita la adsorción eficaz de diversos contaminantes a través de procesos como atracción electrostática, intercambio iónico o formación de complejos en la superficie. [22], [27]

Un factor crítico para tener en cuenta para lograr la eficacia de un HC como adsorbente es la composición del material a partir del cual se produce. De acuerdo con la teoría, el HC puede realizarse a partir de cualquier material con un alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, en consideración de la protección del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos, en la actualidad, las materias primas preferidas son los residuos y desechos de origen agrícola, forestal y alimentario. En particular, los residuos alimentarios, que son ricos en celulosa y azúcares, pero tienen bajos niveles de contaminantes, se consideran uno de los recursos más adecuados para la producción de HC [28].

Tomando en consideración lo mencionado, un buen candidato para producir un HC adsorbente de fármacos, es la cáscara de banano. Los desechos producidos durante el cultivo de plátanos tienen propiedades químicas y físicas apropiadas para la creación de adsorbentes rentables a través de un método que es amigable con el medio ambiente [29]. Esto implica la conversión de los desechos en un recurso valioso mediante una tecnología de bajo costo [30].

## **1.2 Justificación**

Ecuador, conocido a nivel mundial como el principal exportador de banano, desempeña un papel destacado en la producción de esta popular fruta. Su clima favorable y la dedicación de los agricultores han permitido que Ecuador sea un líder en dicha industria [31]. Esta posición en la industria del banano se refleja no solo en términos de volumen exportado, sino también en la calidad del producto, lo que ha llevado a la preferencia de los consumidores a nivel internacional.

Sin embargo, detrás de esta industria de éxito se generan importantes cantidades de desechos agrícolas y productos rechazados que, en lugar de constituir una carga, representan una valiosa oportunidad para el desarrollo de industrias secundarias [13]. Estos residuos, que incluyen principalmente cáscaras de banano, tienen el potencial de ser transformados en una

variedad de productos, como material dieléctrico [13] adsorbentes [21], entre otros, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los recursos.

Este enfoque en la gestión de residuos agrícolas no solo promueve la sostenibilidad, sino que también podría abrir nuevas vías de desarrollo económico. Además, la creciente conciencia ambiental y la búsqueda de prácticas más responsables hacen que esta sea una oportunidad relevante y oportuna para la industria del banano en Ecuador.

Las instalaciones de tratamiento de aguas residuales todavía carecen de la tecnología adecuada para eliminar concentraciones de medicamentos que se encuentran en el rango de nanogramos por litro (ng/L). Por lo tanto, surge la necesidad de crear nuevas soluciones tecnológicas que sean eficaces, económicas y respetuosas con el medio ambiente [32]. Según un estudio reciente, en América Latina se detectaron un total de 51 contaminantes emergentes en investigaciones relacionadas con aguas residuales, y Ecuador se destacó como el país con la mayor cantidad de muestras de agua residual analizadas [33]. En el contexto ecuatoriano, no se ha implementado un control efectivo de los medicamentos emergentes en el agua potable, principalmente debido a la falta de enfoque en este tema en los procesos de tratamiento hasta la fecha. Además, en el documento titulado 'REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA' emitido por el Ministerio del Ambiente del Ecuador [34], no se especifican límites para la presencia de fármacos en el agua. No obstante, es esencial considerar la posibilidad de introducir un adsorbente en una o varias de las etapas de los tratamientos habituales, como la filtración o la floculación. Existen varias plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR por sus siglas) dentro del territorio ecuatoriano, una de ellas es la planta de Paraíso y Valle de la Flor situada en la provincia de Guayas, la cual se ha considerado para el presente estudio debido a su ubicación y caudal de tratamiento. Esta consideración resulta interesante ya que permite aterrizar el proyecto a un panorama real dentro del Ecuador.



La incorporación de un adsorbente a base de HC en estos procesos podría proporcionar una solución efectiva para la eliminación de los medicamentos en el agua potable, contribuyendo a la garantía de un suministro de agua más seguro y libre de contaminantes farmacéuticos. Esta medida no solo sería un paso significativo hacia la protección de la salud pública, sino que también estaría alineada con las tendencias globales en la gestión de la calidad del agua y la sostenibilidad ambiental, fortaleciendo así el compromiso de Ecuador con la preservación de este valioso recurso natural.

En la era actual, la sostenibilidad y la economía circular son fundamentales para abordar los desafíos ambientales y económicos. Es crucial desarrollar métodos de tratamiento de agua que no solo sean técnicamente efectivos, sino también económicamente viables y respetuosos con el medio ambiente. La producción de HC a partir de desechos agroindustriales y su aplicación en el tratamiento del agua encarna estos principios de manera ejemplar. Este enfoque no solo reduce la carga sobre los vertederos y disminuye la contaminación del agua, sino que también promueve la generación de ingresos y empleo a nivel local. Además, la inversión en tecnologías sostenibles de tratamiento de agua puede generar beneficios a largo plazo al reducir los costos asociados con la eliminación de contaminantes y la restauración de cuerpos de agua. La producción de adsorbentes a base de HC a nivel local no solo puede mejorar la calidad del agua en el Ecuador, sino que también puede servir como un modelo replicable en otras regiones con desafíos similares.

El análisis tecno-económico de una planta de producción de adsorbentes a base de HC para el tratamiento de aguas representa una oportunidad única para abordar la contaminación del agua, aprovechar los recursos locales y fomentar la sostenibilidad económica y ambiental. Este proyecto busca no solo mejorar la calidad del agua en el sector, sino también sentar las bases para soluciones más amplias y sostenibles a los desafíos de gestión de residuos y conservación del agua a nivel global.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Realizar el diseño y análisis de pre-factibilidad de un proceso de producción de hidrocabón (HC) activado a partir de residuos lignocelulósicos, para la adsorción de fármacos durante procesos de tratamiento de aguas.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar residuos agroindustriales apropiados para la producción de HC, considerando su disponibilidad y composición.
2. Diseñar el proceso y la planta industrial para la obtención de HC activado a partir de residuos lignocelulósicos considerando variables de proceso que describan los requerimientos básicos, energéticos, y económicos.
3. Analizar la viabilidad económica del proceso durante un período de tiempo predefinido, identificando si genera ganancias y resulta rentable en el plazo establecido.

## 2. BASES DEL DISEÑO

### 2.1 Descripción del Producto

El presente proyecto propone la obtención de HC activado. Este adsorbente se lo produce gracias a la carbonización hidrotérmica de cáscaras de banana junto con una solución ácida, este último permite alcanzar características mejoradas en el HC, especialmente sobre la afinidad del material con fármacos.

### 2.2 Hidrocarbón (HC) activado

El (HC) activado es un material sólido rico en carbono que se produce sometiendo el HC, producto de la carbonización hidrotérmica de la biomasa, a un proceso de activación química mediante agentes como algunos ácidos. El proceso de activación crea una estructura porosa en el (HC), aumentando su superficie y convirtiéndolo en un adsorbente eficaz para diversos contaminantes, incluidos los compuestos orgánicos volátiles y los colorantes. Las propiedades del HC activado dependen del tipo de materia prima de biomasa, del agente de activación y de las condiciones de activación utilizadas. [35]–[37]

### 2.3 Descripción de Materias Primas

Las materias primas que se necesitan para producir el HC activado son dos, cáscaras de banana y ácido cítrico. La banana *Cavendish* es la variación con mayor producción en el Ecuador, por lo que las cáscaras de esta serán las utilizadas para el proyecto. Estos residuos provendrán de diferentes empresas bananeras y de alimentos como CONFOCO S.A. que produce 350 toneladas métricas de cáscaras a la semana [38]. El precio por kilogramo de cáscara de banana ronda entre los 0,09-0,12 USD [39]

El ácido cítrico es un ácido orgánico que se utiliza en la activación química del HC. Este proceso implica el tratamiento del HC con ácido cítrico para contribuir a la generación de porosidad en el HC, lo que a su vez aumenta su área superficial y su capacidad de adsorción de

contaminantes. [4], [13], [40]. Para el presente proyecto, se requiere una cantidad considerable del ácido pues la solución que entrará en contacto con las cáscaras de banana será de una concentración 3 M [4].

## **2.4 Limitaciones**

En esta sección, se abordarán las limitaciones identificadas para el diseño del proceso propuesto. El diseño, aunque exhaustivo y orientado a alcanzar los objetivos definidos, no está exento de restricciones inherentes a factores técnicos, económicos y operativos. Reconocer estas limitaciones es esencial para comprender plenamente el alcance del diseño, así como para proporcionar una base transparente para la toma de decisiones y futuras mejoras. A través de este análisis detallado de las limitaciones del diseño, se busca ofrecer una perspectiva crítica y equilibrada que contribuirá a la optimización continua del proceso en fases posteriores de desarrollo e implementación. Las limitaciones encontradas se enlistan a continuación:

## **2.5 Limitaciones Fijas o Externas**

1. En Ecuador, existen normativas ambientales que limitan las emisiones y los residuos. El proyecto debe cumplir con estas regulaciones, lo que puede influir en los procesos de producción y en la elección de los agentes de activación.
2. Las normas de calidad del agua pueden establecer límites para la concentración de contaminantes, incluyendo fármacos. El proyecto debe asegurarse de que el HC producido cumpla con estas normas.
3. Si el proyecto implica la exportación del HC, las regulaciones de comercio internacional y las tarifas pueden ser una limitación.
4. La obtención de las licencias y permisos necesarios para operar una planta de producción puede ser una limitación externa.

## **2.6 Limitaciones Variables o Internas**

1. Las limitaciones financieras pueden ser una limitación interna. La disponibilidad de fondos para invertir en equipos, tecnología y personal puede influir en el alcance y la capacidad de producción del proyecto.
2. La capacidad de producción de la planta y la infraestructura disponible pueden ser limitaciones internas. Esto afectará la cantidad de HC activado que se puede producir y, por lo tanto, el alcance del proyecto.
3. Pureza del material y nivel de adsorción permitida por el mismo
4. Condiciones de temperatura y presión en el reactor
5. Cantidad de agua requerida en todo el proceso

### 3. DISEÑO DEL PROCESO

#### 3.1 Selección de tecnología

En la Figura 1 se presentan los tratamientos más comunes para la obtención de material carbonizado a partir de biomasa. Así como el hidrocarbón, existen otros tipos de carbones obtenidos mediante otros métodos como la pirólisis y la licuefacción hidrotermal (HTL en inglés). Estos procesos difieren entre sí en las operaciones necesarias, el uso de energía y la producción de carbones. En la HTL, el HC se convierte en un subproducto, a diferencia de la HTC [17]. Por otro lado, la pirólisis es un proceso de descomposición térmica de la biomasa seca en productos gaseosos, líquidos y sólidos, como el biocarbón, sin la presencia de oxígeno [41]. Generalmente, la pirólisis se lleva a cabo en un reactor de lecho fluidizado calentado a temperaturas entre 300-600°C [42]. La presión en la pirólisis es generalmente atmosférica. Este proceso tiene algunas desventajas, como la necesidad de altas temperaturas y la producción de gases de efecto invernadero [41].

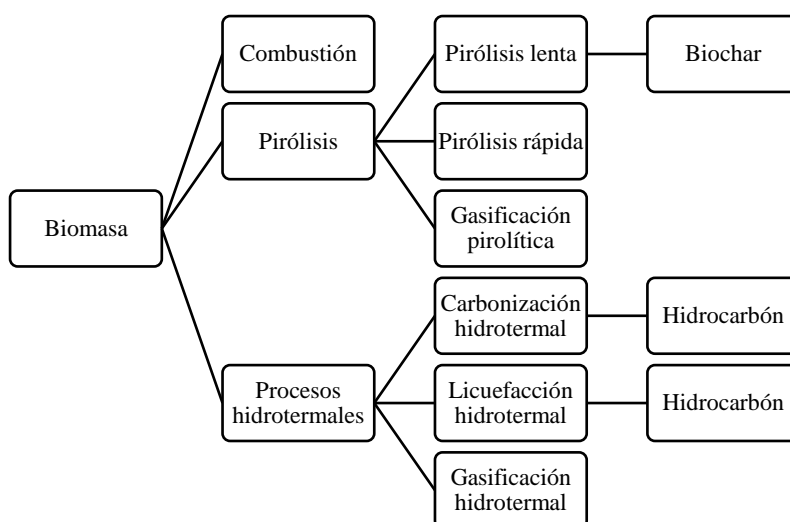


Figura 1. Procesos aplicados a biomasa [43]

#### 3.1.1 Pretratamiento de los residuos

El pretratamiento de las cáscaras de banana se ha concebido con el propósito de acondicionar de manera óptima los residuos antes de ingresar al reactor. Este proceso involucra

operaciones unitarias sencillas. En primer lugar, las cáscaras de banana atraviesan un proceso de lavado con el fin de eliminar cualquier contaminante residual propio de los desechos agroindustriales [44].

Posteriormente, se lleva a cabo un secado de las cáscaras para reducir el elevado contenido de agua presente en estos residuos. Esta medida permite disminuir la energía adicional y el tiempo consumido durante la deshidratación que ocurre en el reactor[45], Además, las cáscaras de banana serán mezcladas con una solución de ácido cítrico; por lo tanto, si se mantienen con su porcentaje de humedad original, la concentración de la solución se verá afectada.

En la etapa final, las cáscaras de bananas secas se someten a un proceso de trituración en un molino de martillo para reducir y homogeneizar el tamaño de partícula [46]

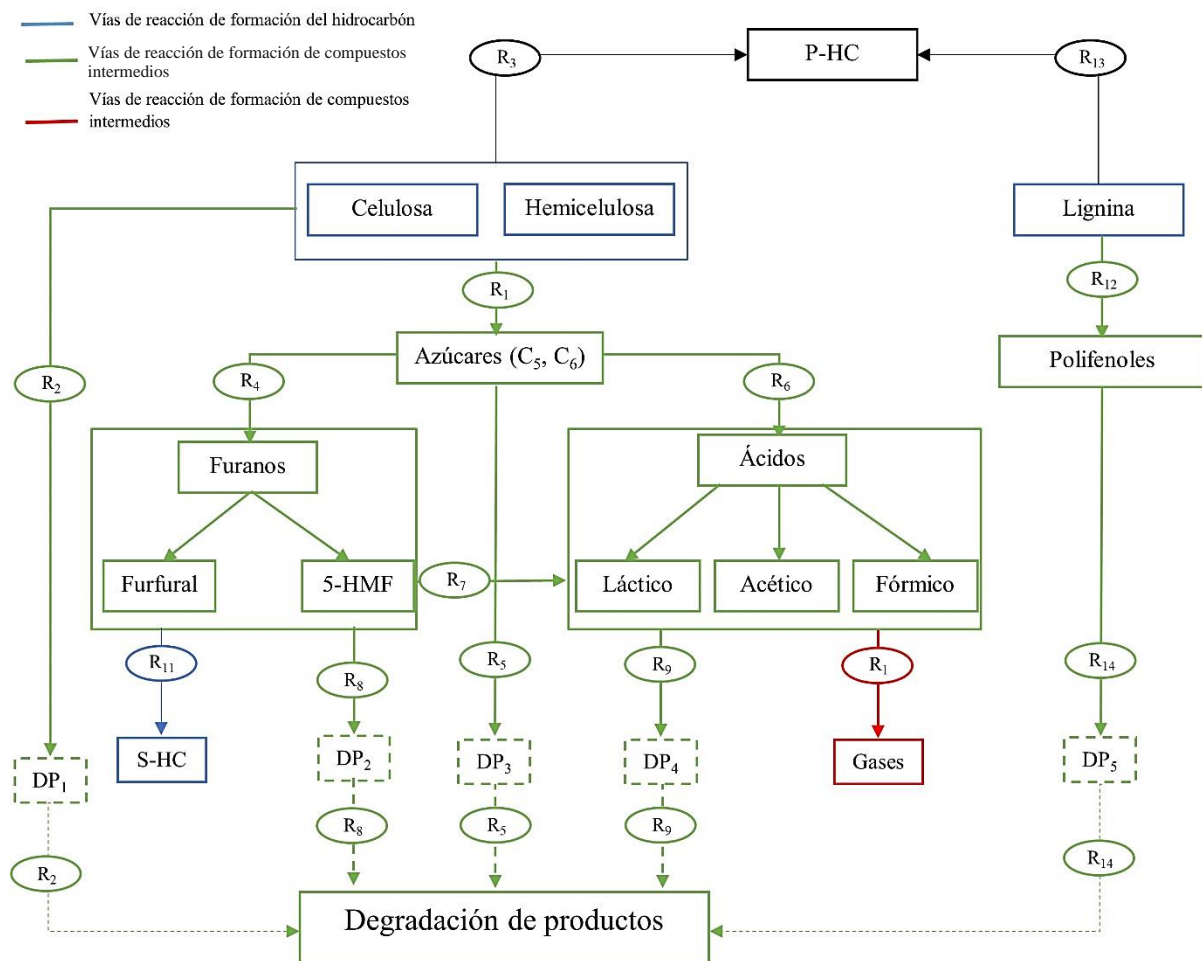
### **3.1.2 Proceso de reacción**

La carbonización hidrotermal (HTC) es una reacción compleja que involucra varias rutas paralelas y consecutivas [47]. Las principales rutas de reacción (Figura 2) son hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización, y condensación [48]. Estas se detallan a continuación [46], [47]:

- **Hidrólisis:** Consiste en la ruptura de los enlaces químicos de la biomasa utilizando agua, que puede dar lugar a la formación de diversos compuestos, como azúcares, ácidos y alcoholes.
- **Deshidratación:** Comprende la eliminación del agua de la biomasa.
- **Descarboxilación:** Promueve la eliminación del dióxido de carbono de la biomasa y da lugar a la formación de compuestos de menor peso molecular e hidrocarbón.
- **Aromatización:** Da lugar a la formación de compuestos aromáticos a partir de la biomasa, lo que puede contribuir al contenido global de carbono del HC.

- Condensación: Consiste en la formación de moléculas más grandes a partir de las moléculas más pequeñas producidas durante el proceso de HTC, que puede conducir a la formación de HC polimérico.

Se han propuesto modelos cinéticos para la HTC que describen las velocidades y los mecanismos de reacción en función de la temperatura, la presión y otros parámetros. Estos modelos pueden ayudar a optimizar las condiciones de la HTC para producir HC de alta calidad [47][49]. Algunas de las principales conclusiones de los estudios apuntan a que la degradación de las hemicelulosas y la celulosa sigue dos reacciones paralelas de primer orden [49]. Por otro lado, sugieren que los parámetros cinéticos y los mecanismos de reacción pueden variar en función de la biomasa específica y de las condiciones utilizadas en el proceso HTC [50].





Existen algunas alternativas cinéticas para llevar a cabo el proceso, entre las cuales destacan el uso de catalizadores a base de ácidos, pues han sido propuestos para mejorar las propiedades de los productos HTC [13]. Como se ha mencionado previamente, el HC es utilizado como un material adsorbente en tratamiento de aguas, sin embargo, su capacidad de adsorción se ve limitada por una baja área superficial y la falta de grupos funcionales en la superficie, lo que resulta en una baja pureza en comparación con diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos [21], [22] Tomando en cuenta lo mencionado, varios estudios, han demostrado que el tratamiento hidrotérmico asistido por ácido puede mejorar significativamente el rendimiento superficial de los materiales adsorbentes al aumentar su riqueza en grupos funcionales que contienen oxígeno, lo que permite una adsorción eficiente de diferentes tipos de contaminantes por atracción electrostática, intercambio iónico o superficie completa [22], [27]

Para este caso de estudio se consideró la carbonización hidrotermal (HTC) de cáscaras de banana con activación de solución 3 M de ácido cítrico, debido a que se lo considera particularmente útil debido a que es un ácido débil, respetuoso con el medio ambiente y rico en oxígeno [4], [13]. El rendimiento obtenido experimentalmente para la obtención de HC activado es de 38,73% a 200°C, 50 bar durante un tiempo de reacción de 3 horas [4], [52].

### **3.1.3 Proceso de purificación**

El proceso de purificación consta de tres operaciones unitarias para garantizar las condiciones finales del HC activado. El primer proceso dentro de la purificación es la decantación y lavado de la mezcla sólido/líquido que resulta del reactor hasta alcanzar un pH neutro en el agua de lavado. Posteriormente, se pasa por un filtro de prensa para eliminar la mayor cantidad posible de licor residual, finalmente el pastel obtenido de la prensa pasa a un secador de lecho fluidizado para bajar el contenido de humedad del HC hasta un porcentaje entre 2-5% máximo [4], [53].

### 3.1.4 Diagrama del proceso

Después de examinar detenidamente cada fase del proceso de producción y las correspondientes operaciones unitarias que intervienen en cada una, se ha desarrollado el diagrama de flujo representado en la Figura 3. El inicio del proceso implica el almacenamiento de las cáscaras de banana, las cuales son transferidas a un tanque de lavado donde se incorpora agua recirculada del proceso de secado. Este último procedimiento, que continúa tras la limpieza de la materia prima, tiene lugar en un secador de bandeja denominado D-101.

Una vez que las cáscaras de banana han sido deshidratadas, se someten a una segunda operación para reducir su tamaño mediante una trituradora de martillo, identificada como G-101. Los residuos pulverizados ingresan al reactor de tipo batch R-101 junto con una solución de ácido cítrico almacenada en el tanque TK-103, manteniendo una proporción de 1:4. Dentro del reactor, se lleva a cabo la carbonización hidrotermal de los residuos lignocelulósicos, generando un 9,73% de gases, un 70,41% de líquido y un 19,87% de sólidos [52]. Los gases producidos durante esta reacción son liberados, mientras que la mezcla sólida/líquida se dirige a un tanque flash denominado TK-104 para despresurizar y recuperar energía, a través de un intercambiador de calor C-101 que recircula hacia el generador de vapor C-102. Cuando la mezcla ha alcanzado una presión y temperatura inferiores, se transfiere a un tanque de lavado TK-105, donde se introduce agua en repetidas ocasiones para neutralizar el material. En este tanque, también se produce la decantación de una porción del líquido obtenido. Tras el proceso de lavado, la mezcla HC /licor se dirige a un filtro de prensa identificado como F-101, con el propósito de eliminar el líquido contenido en el HC activado. Finalmente, se lleva a cabo la última operación unitaria mediante un secador de lecho fluidizado, D-102, con el objetivo de eliminar el contenido de humedad restante en el HC y obtener un polvo seco que se almacena en el tanque TK-106.

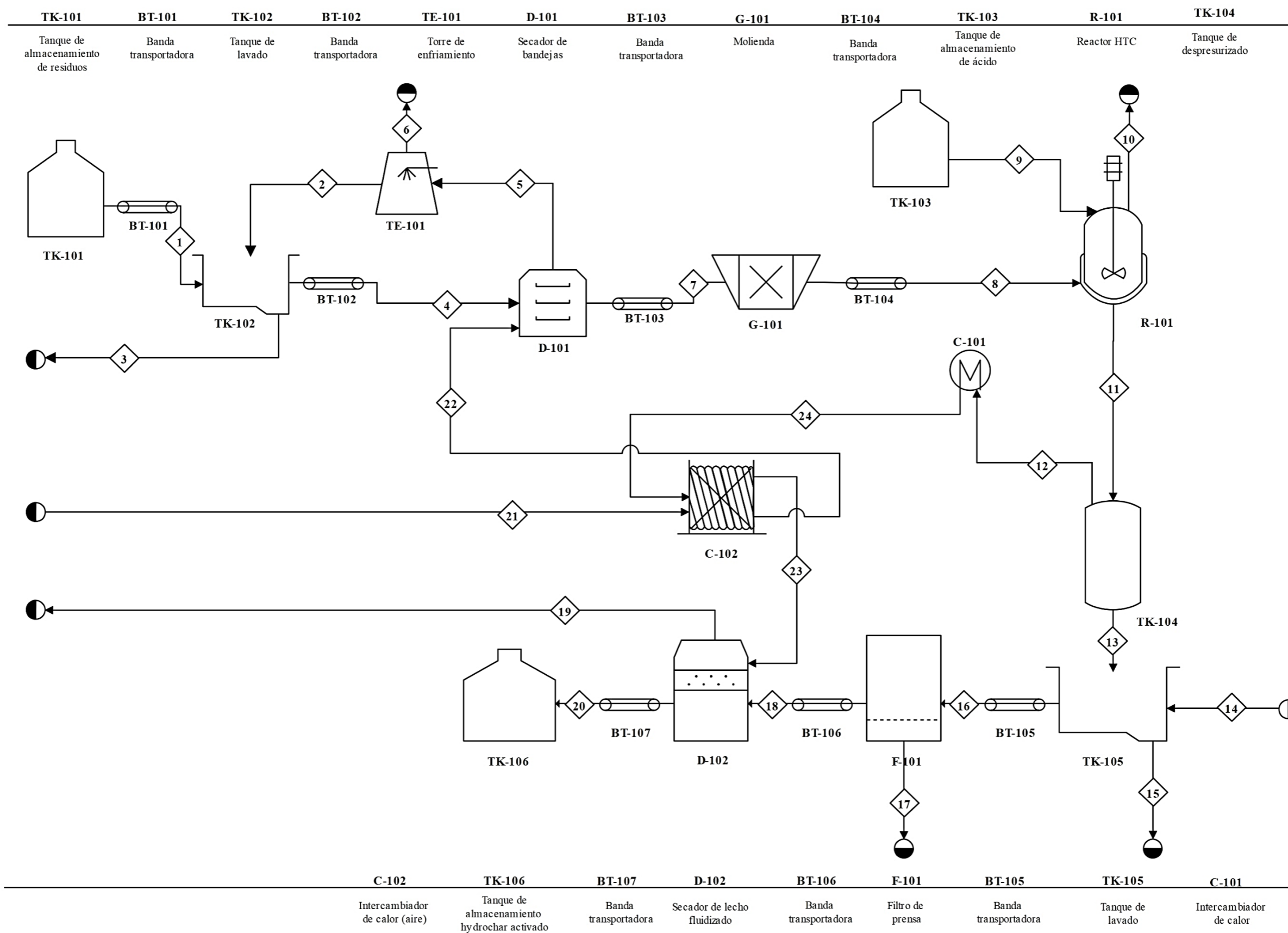


Figura 3: Diagrama de flujo del proceso

## 4. DISEÑO DE LA PLANTA

Esta sección se centra en determinar el caudal de producción con el propósito de realizar posteriormente el balance de masa. Después de obtener los flujos máxicos, se lleva a cabo el dimensionamiento de los equipos como paso previo al análisis económico de la planta.

### 4.1 Base de cálculo

Ecuador es uno de los principales exportadores de banano a nivel mundial. Adicionalmente, existen varias empresas de alimentos que trabajan con la pulpa del banano dejando como residuo las cáscaras de estos. Un ejemplo es la compañía CONFOCO S.A., cuya planta de procesamiento está situada en la Parroquia La Peaña, perteneciente al cantón Pasaje de la Provincia de El Oro, se dedica a la obtención de diversos productos, como harina (flake) y puré de banano. Esta planta genera aproximadamente 315 toneladas métricas de cáscara de banano maduro por semana [38]. Tomando en consideración que una empresa puede generar cientos de toneladas de residuo de banano, se ha considerado este recurso como reactivo en exceso, por lo cual el factor limitante para establecer la base de cálculo es la demanda del adsorbente de HC activado. Se ha tomado como referencia la cantidad necesaria de carbón activado que se necesita para abastecer a una planta de tratamiento de aguas. De acuerdo con la literatura, se recomienda utilizar 3,5 kg de carbón activado por 1 m<sup>3</sup> de agua a tratar [11]. La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Paraíso y Valle de la Flor ubicada en el intercambiador de la Vía a Daule y Vía Perimetral, Provincia de Guayas, maneja un caudal de 21 L/s de aguas negras. Se tomó en consideración los datos de carbón activado y el caudal de la PTAR para conocer que la cantidad de activado que necesitaría Paraíso y Valle de la Flor es un total de 6350,4 kg de /día. Para producir tal cantidad de activado es necesario iniciar con una cantidad de 65918 kg de cáscara de banana/día ya que el rendimiento del proceso es del 38,74%.

## 4.2 Balance de masa

En el contexto de esta investigación, se propone un proceso batch para obtener activado a partir de la cáscara de banana, mediante carbonización hidrotermal asistida por ácido cítrico. Este proceso, diseñado para abordar la eliminación de fármacos en el tratamiento de aguas, tiene una duración de aproximadamente 20 horas, ya que tanto la carbonización hidrotermal (HTC) como el secado requieren tiempo para garantizar la eficacia en la formación del HC activado. Esta sección se centra en el análisis del balance de masa del proceso, proporcionando una comprensión detallada de los flujos en cada etapa en el Anexo 1. El balance de masa es crucial para la optimización y validación del proceso, contribuyendo al diseño eficiente y sostenible de la producción de HC activado a partir de cáscara de banana para la remoción de fármacos en aguas residuales. Todo el detalle del balance de masa se evidencia en el Anexo B.

Tabla 1: Resumen del balance de masa para proceso propuesto

	<b>Cáscaras de banana</b>	<b>Ácido Cítrico</b>	<b>Agua</b>	<b>Hidrocarbón activado</b>
<b>kg/día</b>	65978,18	40418,34	104931,86	6791,0
<b>Tons m/año</b>	24082,03636	14752,69357	38300,1283	2478,715

## 4.3 Balance de energía

En la evaluación del balance energético del proceso en su conjunto, se ha tenido en cuenta el consumo de energía asociado a las operaciones unitarias del proceso. Para la sección de pretratamiento y purificación, se han empleado los requisitos energéticos proporcionados por catálogos comerciales para los equipos estándar. En cuanto al reactor, se ha calculado el consumo de energía considerando tanto la potencia del agitador como el calor necesario para el calentamiento. Se presenta un resumen conciso de la potencia requerida para cada equipo en la Tabla 2.

Tabla 2: Consumo energético equipos de cada subproceso

<b>Subproceso</b>	<b>Equipo</b>	<b>kW/día</b>	<b>Ref</b>
<b>Pretratamiento</b>	Tolva de recepción con banda transportadora	39	[54]
	Torre de enfriamiento	2,09	[55]
	Secador de bandejas	90,8	[56]
	Molienda	74	[57]
<b>Reacción</b>	Reactor HTC	636	Anexo C
<b>Purificación</b>	Intercambiador de calor	9,4	[58]
	Filtro de prensa	5,5	[59]
	Secador de lecho fluidizado	54	[59]
	Generador de vapor	22,02	[60]
	Tanques de lavado	6	[61]
	Bandas transportadoras	288	[59]
	<b>Total</b>	1216,81	

#### 4.4 Selección y dimensionamiento de los equipos

El dimensionamiento de los tanques de almacenamiento y el reactor se llevó a cabo de manera específica y personalizada, es importante destacar que, para otros equipos, se recurrió a catálogos especializados. En esta fase, se consideraron cuidadosamente factores cruciales como el caudal de operación y las condiciones específicas del entorno. La elección de equipos basada en catálogos permitió una selección precisa, garantizando la adecuación a las necesidades operativas y cumpliendo con los estándares requeridos. En el anexo C, se detallará el proceso integral de selección y diseño para asegurar la eficiencia óptima del sistema. En las Tablas 3-4 se resumirá la información de los equipos

Para el caso de los tanques de almacenamiento, se optó por una geometría rectangular tanto para el tanque de recepción de las cáscaras de banana (TK-101), cuyo material seleccionado es acero de carbono, como para el tanque de almacenamiento de hidrocarbón (TK-106). Para los tanques restantes se optó por recipientes cilíndricos de acero inoxidable 316. Con respecto a los cabezales, se optó por terminaciones torisféricas ya que son los más utilizados

Tabla 3. Diseño de tanques

	<b>TK-101</b>	<b>TK-106</b>		<b>TK-103</b>
<b>Configuración</b>	Horizontal	Horizontal	<b>Configuración</b>	Vertical
<b>Material</b>	SS-304	AISI-316	<b>Material</b>	AISI-316
<b>Terminal</b>	Plano	Plano	<b>Terminal</b>	Toriférico
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	94,5	8,43	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	121
<b>Altura [m]</b>	3,61	1,62	<b>Altura [m]</b>	8,5
<b>Longitud [m]</b>	7,22	3,23	<b>Diámetro [m]</b>	4,3
<b>Ancho [m]</b>	3,61	1,62		
<b>Grosor [mm]</b>	15	7	<b>Grosor [mm]</b>	12

Tabla 4. Diseño del reactor

<b>Recipiente</b>	<b>Configuración</b>	Vertical	<b>Agitador</b>	Tipo	Ancla
	<b>Material</b>	AISI-316		N [rev/s]	2
	<b>Terminal</b>	Toriférico		Potencia [kW]	330
	<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	141	<b>Chaqueta</b>	Área [m <sup>2</sup> ]	141,7
	<b>Altura [m]</b>	9		Potencia [kW]	307
	<b>Diámetro [m]</b>	4,5			
	<b>Grosor [mm]</b>	125			

#### 4.5 Ubicación de la planta

La elección estratégica de ubicar la fábrica en la Vía a Daule, en la provincia de Guayas, Ecuador, se basa en consideraciones importantes que maximizan los beneficios logísticos y operativos. La Vía a Daule juega un papel crucial al conectar la ciudad de Guayaquil, el principal centro económico e industrial del país, con Daule y otras áreas cercanas. En esta área

en particular, hay una concentración significativa de plantaciones de plátano alrededor del sector, lo cual destaca la importancia de esta ubicación para garantizar el suministro continuo y cercano de cáscaras de plátano como materia prima clave. Este entorno favorable ofrece una fuente constante y cercana de este componente esencial para nuestro proceso.

Además, la fábrica estaría estratégicamente ubicada cerca de las plantas para el tratamiento del agua Paraíso y Valle de la Flor. Nuestro plan es suministrarles el producto resultante. Esta proximidad asegura eficiencia en la distribución del producto final y fortalece la colaboración entre ambas instalaciones. En lo que respecta a los servicios básicos, el área urbanizada que incluye la Vía a Daule en Guayaquil ofrece buena disponibilidad de servicios como agua potable, electricidad y telecomunicaciones. Los costos específicos han sido detallados por el Ministerio de Minas y Energías en 2022.

La selección de esta ubicación estratégica no solo mejora el acceso al personal y la colaboración con las comunidades locales, sino que también coloca la planta en un entorno favorable para obtener los recursos y servicios necesarios para su funcionamiento efectivo.



## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

La planta de producción de hidrocarbón activado con ácido cítrico a partir de cáscaras de plátano es un proyecto innovador que busca aprovechar un recurso natural subutilizado para la obtención de un producto con potencial en diversas industrias. El análisis económico de este proyecto es fundamental para evaluar su viabilidad financiera, identificar los costos y beneficios asociados, y tomar decisiones informadas sobre su implementación. En esta sección, se presentará una revisión detallada de los costos de inversión, los costos operativos, los ingresos esperados, el punto de equilibrio, el periodo de recuperación de la inversión y otros indicadores financieros relevantes. El análisis económico permitirá determinar la rentabilidad del proyecto y su capacidad para generar valor a largo plazo.

### 5.1 Estimación de costos del proyecto

#### 5.1.1 Inversión de capital fijo

El proceso de calcular los costos para la inversión de capital fijo en tu proyecto, una planta de producción de HC activado con ácido cítrico a partir de cáscaras de plátano, implica estimar detalladamente los gastos asociados a la adquisición e instalación de activos fundamentales. Esto abarca la construcción de la planta, maquinaria, equipo, infraestructura y otros elementos fijos necesarios para la operación.

Esta estimación detallada se realiza considerando cotizaciones de proveedores, costos de construcción, ingeniería y otros gastos asociados. Es un paso fundamental para determinar la viabilidad financiera del proyecto y proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas.

Este proceso también involucra la diferenciación de los costos ISBL (Inside Battery Limits), que son aquellos relacionados directamente con la adquisición y puesta en marcha de equipos y unidades de procesamiento, y los costos OSBL (Outside Battery Limits), que abarcan

infraestructuras y servicios fuera del área central de producción. Se utilizaron cuatro métodos distintos para estimar la inversión total de capital fijo, estos son los factores de Bridgewater, Hand, Lang y el método factorial detallado. Los resultados se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Estimación Inversión de Capital Fijo

<b>Método estimación</b>	<b>Costo ISBL [\$]</b>	<b>Costo OSBL [\$]</b>	<b>Costo por ingeniería y construcción [\$]</b>	<b>Costos imprevistos [\$]</b>	<b>Inversión de capital fijo [\$]</b>
Bridgewater	1225486,49	490194,59	153185,81	612743,24	2481610,14
Factores de Lang	766974,00	306789,60	95871,75	383487,00	1553122,35
Factores de Hand	651700,00	260680,00	81462,50	325850,00	1319692,50
Factorial detallado	714032,44	285612,98	89254,06	357016,22	1445915,69
<b>Promedio</b>					<b>1079682,64</b>

## 5.2 Capital de trabajo y costo de producción

Calcular el capital de trabajo implica determinar los fondos necesarios para respaldar las operaciones diarias y cumplir con las obligaciones a corto plazo de una empresa. Esto se logra evaluando la diferencia entre los activos corrientes, que incluyen efectivo, cuentas por cobrar e inventarios, y los pasivos corrientes, que incluyen cuentas por pagar y otros compromisos a corto plazo. Por otro lado, el cálculo del costo de producción se enfoca en determinar los gastos directos e indirectos necesarios para la fabricación de un bien o la prestación de un servicio. Los costos directos incluyen materiales, mano de obra y otros costos directamente relacionados con la producción, mientras que los costos indirectos incluyen gastos generales como alquiler y servicios públicos. Calcular el costo de producción es crucial para establecer un precio de venta adecuado que garantice la rentabilidad del proyecto. Al considerar ambos cálculos, se obtiene una visión completa de la salud financiera de la empresa, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la liquidez y la viabilidad económica del

negocio. Con respecto a los valores de capital de trabajo y costo de producción obtenidos en el presente proyecto, se los observa en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6. Estimación Capital de Trabajo

<b>Costo</b>	<b>[\$]</b>
Inventario materias primas	378012,31
Inventario productos	396171,11
Efectivo en caja	1386598,87
Cuentas por cobrar	792342,21
Créditos pendientes	831627,08
Inventario repuestos	9996,45
<b>Total [\$]</b>	<b>3794748,04</b>

Tabla 7. Estimación de Costos de Producción

<b>VCOP [\$/año]</b>	<b>FCOP [\$/año]</b>	<b>CCOP [\$/año]</b>
9855320,93	473425,78	10328746,70

### 5.3 Flujo de caja y rentabilidad

El presente proyecto plantea la producción de hydrochar activado para ser utilizado como adsorbente de fármacos en tratamiento de aguas residuales por lo que los ingresos serán por parte de la venta de este producto. El valor por kg de HC activado se fijó en 5 USD tras analizar el precio de carbón activado en el mercado ya que este es el producto al que se pretende reemplazar. Los ingresos generados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Ingresos generados en un año

<b>Caudal producción [kg/año]</b>	<b>Precio aprox. [\$/kg]</b>	<b>Margen [\$/año]</b>
2478715	5	2849844,94

Con respecto al flujo de caja, se lo calculó mediante tres métodos. El primer se basó en un flujo sin depreciación, el segundo ya tomó en cuenta depreciación y el ultimo método es el

de MACRS. Como se puede observar en la Figura 4, según el flujo sin depreciación, el tiempo de recuperación de la inversión se da en el año 4,2 aproximadamente, mientras que, por el flujo con depreciación, el tiempo de retorno asciende a 5 años y finalmente, según el método de MACRS, la inversión se recupera en el año 4,5 aproximadamente.

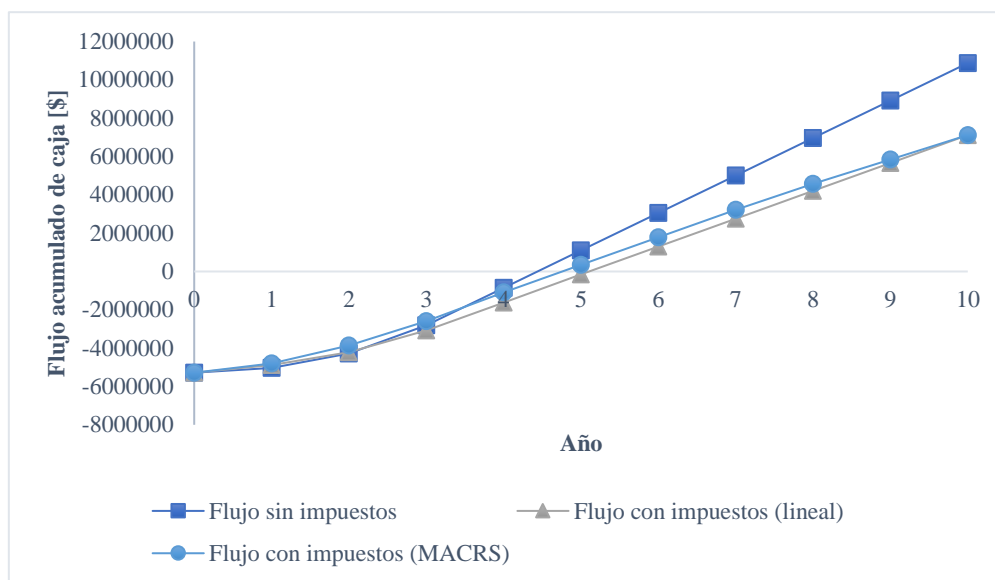


Figura 4. Comparación de flujos de caja obtenidos por tres métodos

Con base en los parámetros calculados en el análisis económico, se estableció el flujo de caja para un período de 10 años, permitiendo obtener indicadores económicos para evaluar la viabilidad económica de la construcción de la planta. Estos indicadores incluyen el VAN (Valor Ajustado Neto), TIR (Tenencia Interna de Retorno), ROI (Retorno sobre la Inversión) y PRI (Retorno sobre el Capital Invertido). Estos indicadores se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Indicadores económicos

<b>VAN</b>	595602,05
<b>TIR</b>	20%
<b>ROI [%]</b>	29,11008417
<b>Tiempo de recuperación [años]</b>	7,5

#### 5.4 Análisis de flexibilidad

Conjuntamente, se llevó a cabo un análisis de flexibilidad en relación con el caudal mínimo de HC que debe comercializarse para mantener la rentabilidad del proyecto, el cual se estableció en 91735,3 kg por año. Este análisis de flexibilidad demuestra la viabilidad financiera de un proyecto al considerar un caudal de producción constante, así como la inversión inicial [62]. Al seleccionar el caudal mínimo de venta, se logró igualar el Valor Actual Neto (VAN) a cero, pero el tiempo de recuperación se extendió a 5 años; esto indica que en ese punto específico del análisis hay indiferencia, pero el proyecto sigue siendo financiable. Si se comercializa por debajo del caudal mínimo establecido, el VAN se vuelve negativo, lo que implica que el proyecto ya no sería rentable. Sin embargo, con ventas superiores a dicho caudal mínimo, el VAN siempre será positivo, demostrando así la rentabilidad del proyecto. El flujo de caja asociado a la venta mínima se presenta a continuación:

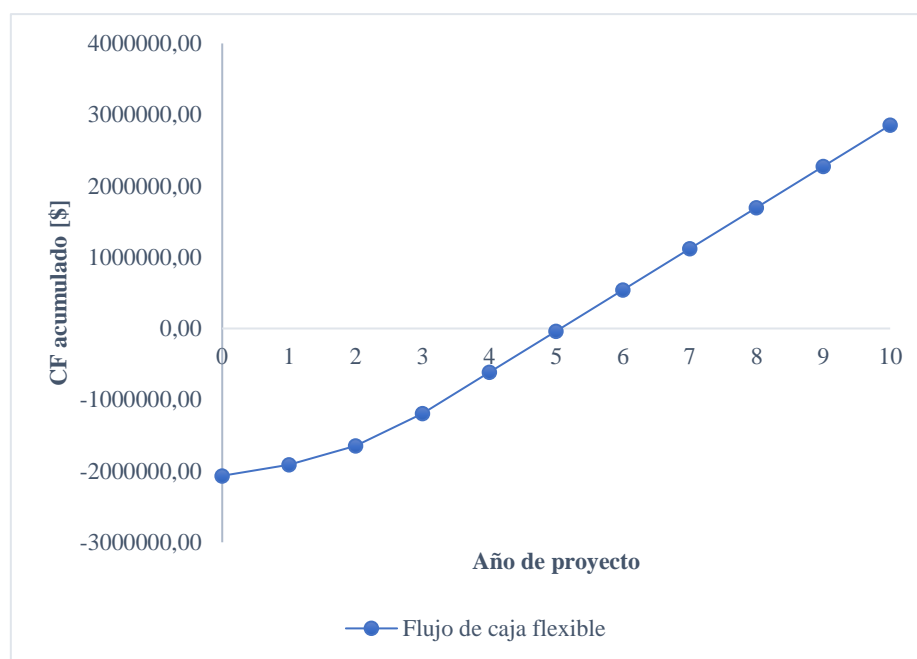


Figura 5. Análisis de flexibilidad considerando un caudal mínimo de producción.

## 6. IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL

La carbonización hidrotermal (HTC) es un proceso de tratamiento térmico que convierte la materia orgánica en hidrocarbón, pero también produce otros subproductos, como gases y una solución acuosa. Aunque el hidrocarbón es un producto valioso, los subproductos de la HTC podrían considerarse contaminantes. Sin embargo, hay varias soluciones propuestas para los subproductos del HTC. La solución acuosa, conocida como producto acuoso (HAP), contiene nutrientes solubles en agua y componentes orgánicos [63]. Estos tienen el potencial de ser utilizados en otras aplicaciones. La solución acuosa producida durante el proceso HTC puede ser utilizada como fertilizante rico en nutrientes para los cultivos, lo que reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos [64]. Además, los subproductos de la carbonización hidrotermal pueden procesarse aún más para producir catalizadores de carbón activado para la oxidación húmeda de microcontaminantes [65]. La destilación por membrana también se puede utilizar para tratar los subproductos líquidos de la carbonización hidrotermal de residuos agrícola para mejorar sus propiedades como combustible [66]. Los gases generados durante la carbonización hidrotermal pueden ser utilizados para diversos propósitos, como, por ejemplo, en la producción de energía en forma de gas natural o biogás, donde el dióxido de carbono y el metano se generan como subproductos principales [67]. Estos gases también pueden ser utilizados como fuente de carbono para el proceso HTC, lo que demuestra la importancia de reciclaje y uso sostenible de los subproductos de este proceso [67]. Además, los gases producidos durante la carbonización hidrotermal pueden ser utilizados en la producción de productos químicos, como el etanol, que se puede obtener a partir de la reacción del dióxido de carbono y la biomasa [4]. También se han investigado el uso de los gases de HTC en la producción de biodiésel, lo que demuestra la versatilidad y valor económico de estos subproductos [66].

Por otro lado, el objetivo primordial de este proyecto radica en la optimización del proceso de producción de HC asistido por ácidos, utilizando cáscaras de plátano, con el propósito de tratar los residuos farmacéuticos presentes en aguas residuales. Esta iniciativa busca abordar dos cuestiones fundamentales: la mejora de la calidad del agua y la eliminación de contaminantes emergentes, cuyos efectos perjudiciales están generando creciente inquietud en la comunidad. Además, el proyecto tiene un enfoque sostenible al aprovechar los residuos agroindustriales, contribuyendo a la reducción de la incorrecta eliminación de estos materiales. El crecimiento de la industria en el país está vinculado a la generación de nuevos puestos de trabajo. En el año 2022, la industria manufacturera se destacó como la principal contribuyente en la creación de empleo, generando más de 107,000 nuevos empleos de calidad [68]. Dado que nuestro proyecto forma parte del sector manufacturero, también contribuirá a estas estadísticas de empleo en Ecuador. La cantidad de empleados requeridos para la planta de producción de lactosa dependerá de su tamaño, pero en consideración de que podría ser una empresa de tamaño mediano a pequeño, se estima que se necesitarán aproximadamente entre 50 y 249 empleados [69]. Es importante destacar que este número solo abarca el personal en la planta, y se anticipa que habrá una necesidad adicional de empleados en áreas como construcción, logística, ventas, proveedores y otros roles relacionados. El proyecto tiene el potencial de reducir la dependencia de la importación de carbón activado, lo que puede beneficiar a la economía local y reducir los costos de importación. En 2021, Ecuador importó \$5,42M en Carbón activado, convirtiéndose en el importador número 63 de carbón activado en el mundo [70], esto sugiere que en Ecuador existe una demanda en diversos sectores que actualmente no está siendo satisfecha por la oferta nacional, lo cual ha llevado a depender de empresas extranjeras. Si el proyecto de aprovechar la cáscara de plátano demuestra ser rentable, podría abrir la posibilidad de producir HC activado a nivel local. Como resultado, las empresas de tratamiento de aguas tendrían la opción de adquirir este producto en el mercado nacional,

reduciendo así la necesidad de importaciones y contribuyendo a mantener el flujo de capital dentro del territorio ecuatoriano. Esto, a su vez, podría desempeñar un papel importante en la reactivación de la economía local



## 7. CONCLUSIONES

En este proyecto, se ha realizado el diseño y análisis de factibilidad de un proceso de producción de hidrocabón (HC) activado a partir de residuos lignocelulósicos, con el objetivo de adsorber fármacos en el tratamiento de aguas residuales. Se han identificado residuos agroindustriales apropiados para la producción de HC, considerando su disponibilidad y composición. Además, se ha diseñado el proceso y la planta industrial para la obtención de HC activado a partir de estos residuos. El diseño del proceso propuesto para la producción de hidrocabón activado con ácido cítrico a partir de cáscaras de plátano ha sido exhaustivo y orientado a alcanzar los objetivos definidos. Se ha considerado la concentración adecuada del ácido y se ha propuesto una ruta de reacción para la conversión de la biomasa en HTC. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones técnicas, económicas y operativas que pueden influir en el proceso y que deben ser abordadas en fases posteriores de desarrollo e implementación.

Se ha llevado a cabo un análisis de viabilidad económica del proceso durante un período de tiempo predefinido, identificando si genera ganancias y resulta rentable en el plazo establecido. Se han considerado las limitaciones técnicas, económicas y operativas inherentes al diseño del proceso propuesto. También se ha tenido en cuenta el cumplimiento de las normativas ambientales y de calidad del agua, así como las regulaciones de comercio internacional y los permisos necesarios para operar una planta de producción. El proyecto de producción de hidrocabón activado generará ingresos a través de la venta del producto. Se estima que se producirán 2,5 millones kg de hidrocabón activado al año, con un precio aproximado de \$5 por kg. Esto resulta en ingresos generados de aproximadamente \$2,849,844.94 al año. De acuerdo con el análisis de flexibilidad, el caudal mínimo necesario de hidrocabón vendido para que el proyecto sea rentable es de 91735 kg/año siempre y cuando el valor en el mercado sea igual a \$5 por kilogramo.

En conclusión, este proyecto busca mejorar la calidad del agua y promover la sostenibilidad económica y ambiental mediante la producción de HC activado a partir de residuos lignocelulósicos. Se espera que este proceso contribuya a la eliminación de fármacos en el tratamiento de aguas residuales y sienta las bases para soluciones más amplias y sostenibles a nivel global en la gestión de residuos y conservación del agua.

Además de las conclusiones presentadas, se pueden hacer algunas recomendaciones para futuras investigaciones y proyectos relacionados con la gestión sostenible de residuos agrícolas y la protección del medio ambiente. En primer lugar, se recomienda realizar una investigación más exhaustiva sobre los residuos agroindustriales disponibles en Ecuador, con el objetivo de diversificar las fuentes de materia prima y optimizar el proceso de producción de hidrocabón activado. Además, es esencial llevar a cabo un análisis detallado del mercado y la demanda tanto en Ecuador como en otros países para identificar oportunidades de negocio y desarrollar estrategias de comercialización efectivas. Para mejorar la eficiencia y calidad del producto final, se sugiere realizar investigaciones y pruebas realistas y en laboratorio para optimizar el proceso de producción, considerando parámetros como la concentración de ácido, el tiempo de reacción y la temperatura. De igual manera, se podría considerar la implementación de nuevos y mejores procedimientos para tener un consumo responsable de agua. Finalmente se recomienda realizar un estudio de impacto ambiental detallado para evaluar y mitigar los posibles efectos ambientales del proceso de producción, garantizando el cumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes.

## 8. REFERENCIAS

- [1] E. R. Jones, M. T. H. Van Vliet, M. Qadir, and M. F. P. Bierkens, “Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse,” *Earth Syst Sci Data*, vol. 13, no. 2, pp. 237–254, Feb. 2021, doi: 10.5194/ESSD-13-237-2021.
- [2] J. I. Usma, O. D. Gutiérrez, M. J. Gil, and A. M. Soto, “Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos,” *Producción más Limpia*, vol. 7, no. 2, 2013.
- [3] M. Janet Gil, A. María Soto, J. Iván Usma, and O. Darío Gutiérrez, “Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos,” 2012.
- [4] B. Hayoun, S. Escudero-Curiel, M. Bourouina, S. Bourouina-Bacha, M. Angeles Sanromán, and M. Pazos, “Preparation and characterization of high performance hydrochar for efficient adsorption of drugs mixture,” *J Mol Liq*, vol. 353, 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.118797.
- [5] R. Garcia-Morales *et al.*, “Biotransformation of Endocrine-Disrupting Compounds in Groundwater: Bisphenol A, Nonylphenol, Ethynylestradiol and Triclosan by a Laccase Cocktail from *Pycnoporus sanguineus* CS43,” *Water Air Soil Pollut*, vol. 226, no. 8, pp. 1–14, Jul. 2015, doi: 10.1007/S11270-015-2514-3/TABLES/4.
- [6] C. Barrios-Estrada *et al.*, “Potentialities of active membranes with immobilized laccase for Bisphenol A degradation,” *Int J Biol Macromol*, vol. 108, pp. 837–844, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2017.10.177.
- [7] M. Bilal, H. M. N. Iqbal, and D. Barceló, “Mitigation of bisphenol A using an array of laccase-based robust bio-catalytic cues – A review,” *Science of The Total*

- Environment*, vol. 689, pp. 160–177, Nov. 2019, doi:  
10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.403.
- [8] I. Y. López-Pacheco *et al.*, “Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects,” *Science of the Total Environment*, vol. 690. 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.052.
- [9] G. Teijon, L. Candela, K. Tamoh, A. Molina-Díaz, and A. R. Fernández-Alba, “Occurrence of emerging contaminants, priority substances (2008/105/CE) and heavy metals in treated wastewater and groundwater at Depurbaix facility (Barcelona, Spain),” *Science of the Total Environment*, vol. 408, no. 17, 2010, doi:  
10.1016/j.scitotenv.2010.04.041.
- [10] A. U. Rajapaksha, K. S. Dilrukshi Premarathna, V. Gunarathne, A. Ahmed, and M. Vithanage, “Sorpitive removal of pharmaceutical and personal care products from water and wastewater,” in *Pharmaceuticals and Personal Care Products: Waste Management and Treatment Technology Emerging Contaminants and Micro Pollutants*, 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-816189-0.00009-3.
- [11] M. Salas *et al.*, “REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO CARBÓN ACTIVADO,” Dec. 2021.
- [12] S. Escudero-Curiel, M. Pazos, and A. Sanromán, “Facile one-step synthesis of a versatile nitrogen-doped hydrochar from olive oil production waste, ‘alperujo’, for removing pharmaceuticals from wastewater,” *Environmental Pollution*, vol. 330, 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121751.
- [13] A. C. Landázuri *et al.*, “Valorization of ripe banana peels and cocoa pod husk hydrochars as green sustainable ‘low loss’ dielectric materials,” *J Clean Prod*, vol. 426, p. 139044, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139044.

- [14] G. Wang, J. Liu, W. Liang, J. Dan, X. Ning, and C. Wang, “Hydrothermal carbonization mechanism of agricultural waste under different conditions: An experimental and ReaxFF molecular dynamics study,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 110, p. 101353, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.JOEL.2023.101353.
- [15] M. K. Hrnčič, G. Kravanja, and Ž. Knez, “Hydrothermal treatment of biomass for energy and chemicals,” *Energy*, vol. 116, pp. 1312–1322, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.148>.
- [16] Z. Liu, Z. Wang, H. Chen, T. Cai, and Z. Liu, “Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: A critical review,” *Environmental Pollution*, vol. 268, p. 115910, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2020.115910.
- [17] J. O. Ighalo *et al.*, “Recent advances in hydrochar application for the adsorptive removal of wastewater pollutants,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 184, pp. 419–456, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.CHERD.2022.06.028.
- [18] S. R. Periyavaram, L. Uppala, S. Sivaprakash, and P. H. P. Reddy, “Thermal behaviour of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of food waste using leachate as moisture source: Kinetic and thermodynamic analysis,” *Bioresour Technol*, vol. 373, p. 128734, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2023.128734.
- [19] W. Wang *et al.*, “Emission reduction of particulate matter from the combustion of biochar via thermal pre-treatment of torrefaction, slow pyrolysis or hydrothermal carbonisation and its co-combustion with pulverized coal,” *Fuel*, vol. 240, pp. 278–288, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2018.11.117.
- [20] L. Zaccariello, D. Battaglia, B. Morrone, and M. L. Mastellone, “Hydrothermal Carbonization: A Pilot-Scale Reactor Design for Bio-waste and Sludge Pre-treatment,”

- Waste Biomass Valorization*, vol. 13, no. 9, pp. 3865–3876, Sep. 2022, doi: 10.1007/S12649-022-01859-X.
- [21] N. Zhou *et al.*, “Effect of phosphoric acid on the surface properties and Pb(II) adsorption mechanisms of hydrochars prepared from fresh banana peels,” *J Clean Prod*, vol. 165, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.111.
- [22] B. W. Lv, H. Xu, J. Z. Guo, L. Q. Bai, and B. Li, “Efficient adsorption of methylene blue on carboxylate-rich hydrochar prepared by one-step hydrothermal carbonization of bamboo and acrylic acid with ammonium persulphate,” *J Hazard Mater*, vol. 421, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126741.
- [23] L. Wang *et al.*, “High surface area porous carbons prepared from hydrochars by phosphoric acid activation,” *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 2, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.100.
- [24] T. M. Abdel-Fattah, M. E. Mahmoud, S. B. Ahmed, M. D. Huff, J. W. Lee, and S. Kumar, “Biochar from woody biomass for removing metal contaminants and carbon sequestration,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 22, 2015, doi: 10.1016/j.jiec.2014.06.030.
- [25] Y. Huang, D. Shen, and Z. Wang, “Preparation of Citric Acid-Sewage Sludge Hydrochar and Its Adsorption Performance for Pb(II) in Aqueous Solution,” *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 968, vol. 14, no. 5, p. 968, Feb. 2022, doi: 10.3390/POLYM14050968.
- [26] Q. Lei, S. Kannan, and V. Raghavan, “Uncatalyzed and acid-aided microwave hydrothermal carbonization of orange peel waste,” *Waste Management*, vol. 126, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.058.

- [27] X. Lu, X. Ma, Z. Qin, C. Ke, L. Chen, and X. Chen, “Co-Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge with Wood Chip: Fuel Properties and Heavy Metal Transformation Behavior of Hydrochars,” *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 19, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02145.
- [28] N. Zhou *et al.*, “Biochars with excellent Pb(II) adsorption property produced from fresh and dehydrated banana peels via hydrothermal carbonization,” *Bioresour Technol*, vol. 232, pp. 204–210, May 2017, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.01.074.
- [29] G. Montes-Atenas and S. L. M. Schroeder, “Sustainable natural adsorbents for heavy metal removal from wastewater: Lead sorption on pine bark (*Pinus radiata* D.Don),” *Surface and Interface Analysis*, vol. 47, no. 10, 2015, doi: 10.1002/sia.5807.
- [30] I. Yusuf, F. Flagiello, N. I. Ward, H. Arellano-García, C. Avignone-Rossa, and M. Felipe-Sotelo, ;“Valorisation of banana peels by hydrothermal carbonisation: Potential use of the hydrochar and liquid by-product for water purification and energy conversion,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 12, 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100582.
- [31] D. F. Quito-Avila *et al.*, “First report of banana bract mosaic virus in ‘Cavendish’ banana in Ecuador,” *Plant Disease*, vol. 97, no. 7. 2013. doi: 10.1094/PDIS-12-12-1154-PDN.
- [32] A. K. Gautam, S. Kumar, and P. C. Sabumon, “Preliminary study of physico-chemical treatment options for hospital wastewater,” *J Environ Manage*, vol. 83, no. 3, 2007, doi: 10.1016/j.jenvman.2006.03.009.
- [33] M. Checa Artos, D. Sosa del Castillo, O. Ruiz Barzola, and M. Barcos-Arias, “Presencia de productos farmacéuticos en el agua y su impacto en el ambiente,” *Bionatura*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.21931/rb/2021.06.01.27.

- [34] Ministerio del Ambiente, “REVISION DEL ANEXO 1 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA REVISIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE LA NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES : RECURSO AGUA 0 INTRODUCCIÓN,” 2015.
- [35] F. Zhou *et al.*, “Efficient removal of methylene blue by activated hydrochar prepared by hydrothermal carbonization and NaOH activation of sugarcane bagasse and phosphoric acid,” *RSC Adv*, vol. 12, no. 3, pp. 1885–1896, Jan. 2022, doi: 10.1039/D1RA08325B.
- [36] X. Zhang *et al.*, “Chemically activated hydrochar as an effective adsorbent for volatile organic compounds (VOCs),” *Chemosphere*, vol. 218, pp. 680–686, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.11.144.
- [37] W. Tu *et al.*, “A novel activation-hydrochar via hydrothermal carbonization and KOH activation of sewage sludge and coconut shell for biomass wastes: Preparation, characterization and adsorption properties,” *J Colloid Interface Sci*, vol. 593, pp. 390–407, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JCIS.2021.02.133.
- [38] H. Romero Bonilla, O. Tinoco Gómez, / Kerly, and D. Dávila, “Diseño y Tecnología Hidrólisis enzimática de residuos agroindustriales del banano para la obtención de jarabe glucosado aplicando tres pretratamientos,” *Ind. data*, vol. 18, no. 1, pp. 101–107, 2015.
- [39] Vargas Yadira, “OBTENCIÓN DE PRODUCTOS CON VALOR AGREGADO A PARTIR DE BANANO DE RECHAZO EN EL CONTEXTO ECUATORIANO.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available:



- <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/2807/Tesis%20Yadira%20Vargas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [40] C. De Bibliotecas, “APROVECHAMIENTO DE SARGAZO SPP COMO FUENTE DE HIDROCHAR,” Dec. 2018, Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://riudg.udg.mx//handle/20.500.12104/92067>
- [41] H. S. Min and B. Dunn, “Electrodes | 3-D Electrodes Batteries,” *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, pp. 83–91, Jan. 2009, doi: 10.1016/B978-044452745-5.00889-3.
- [42] L. M. Cómo Citar: Romero Millán, M. A. Cruz Domínguez, and F. E. Vargas, “Effect of temperature on energy potential of pyrolysis products from oil palm shells,” *Revista Tec-nura*, vol. 20, no. 48, 2016.
- [43] S. Masoumi, V. B. Borugadda, S. Nanda, and A. K. Dalai, “Hydrochar: A review on its production technologies and applications,” *Catalysts*, vol. 11, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/CATAL11080939.
- [44] A. J. Haro-Velasteguí <sup>1</sup>, A. E. Borja-Arévalo <sup>2</sup>, and S. Y. Triviño-Bloisse <sup>3</sup>, “Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables Analysis on the use of banana waste, as raw material for the production of biodegradable plastic materials Análise da utilização da bananeira resíduos como matéria-prima para a produção de plásticos biodegradáveis,” vol. 3, no. 2, pp. 506–525, 2017, doi: 10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525.
- [45] H. S. Kambo and A. Dutta, “A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications,” *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 359–378, May 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.01.050.
- [46] M. Lucian, M. Volpe, and L. Fiori, “Hydrothermal Carbonization Kinetics of Lignocellulosic Agro-Wastes: Experimental Data and Modeling,” *Energies* 2019, Vol. 12, Page 516, vol. 12, no. 3, p. 516, Feb. 2019, doi: 10.3390/EN12030516.
- [47] D. Sangare, S. Bostyn, M. Moscosa-Santillan, V. Belandria, and I. Gökalp, “Quantification and kinetic study of the main compounds in biocrude produced by hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 15, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100770.
- [48] M. Lucian, M. Volpe, and L. Fiori, “Hydrothermal carbonization kinetics of lignocellulosic agro-wastes: Experimental data and modeling,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12030516.
- [49] M. Pecchi, F. Patuzzi, V. Benedetti, R. Di Maggio, and M. Baratieri, “Kinetic analysis of hydrothermal carbonization using high-pressure differential scanning calorimetry applied to biomass,” *Appl Energy*, vol. 265, p. 114810, May 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.114810.
- [50] D. Sangare, A. Chartier, M. Moscosa-Santillan, I. Gökalp, and S. Bostyn, “Kinetic studies of hydrothermal carbonization of avocado stone and analysis of the polycyclic aromatic hydrocarbon contents in the hydrochars produced,” *Fuel*, vol. 316, p. 123163, May 2022, doi: 10.1016/J.FUEL.2022.123163.
- [51] D. Sangare, S. Bostyn, M. Moscosa-Santillan, V. Belandria, and I. Gökalp, “Quantification and kinetic study of the main compounds in biocrude produced by hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 15, p. 100770, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.BITEB.2021.100770.

- [52] S. Vakalis, S. S. Ail, K. Moustakas, and M. J. Castaldi, "Operation and Thermodynamic Modeling of a Novel Advanced Hydrothermal Reactor: Introduction of the Novel 3-Step Evolution Model," *Energies* 2023, Vol. 16, Page 2032, vol. 16, no. 4, p. 2032, Feb. 2023, doi: 10.3390/EN16042032.
- [53] A. I. Sultana, S. Hossain, S. Saha, K. Kirtania, and T. Reza, "Ultraporous superactivated hydrochars from food waste: comparing environmental impacts of char impregnation versus direct chemical activation method," *Biomass Convers Biorefin*, 2023, doi: 10.1007/s13399-023-04959-3.
- [54] "Stainless Steel Vertical Screw Conveyor Feeder Machine For Grain Screw Conveyor With Hopper - Buy Vertical Screw Conveyor, Grain Screw Conveyor, Stainless Steel Screw Conveyor Product on Alibaba.com." Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Vertical-Screw-Conveyor-Feeder\\_1600963846702.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.1401583a5c2ULG&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Vertical-Screw-Conveyor-Feeder_1600963846702.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.1401583a5c2ULG&s=p)
- [55] "Industrial Quality Cooling Tower With Good Price - Buy Industrial Cooling Tower, Cooling Tower Price, Cooling Tower Product on Alibaba.com." Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-quality-cooling-tower-with-good\\_60828045539.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.7f5f485a6k1Gsi](https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-quality-cooling-tower-with-good_60828045539.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.7f5f485a6k1Gsi)
- [56] "Industrial Multi Layer Belt Dryer Belt Conveyor Drying Multilayer Mesh Belt Dryer Machine For Fish Feed - Buy Multi Layer Tunnel Conveyor Mesh Belt Dryer, Drying Machine Multi Layer Belt Dryer, Conveyor Belt Type Dryer Product on Alibaba.com."

- Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Multi-Layer-Belt-Dryer-Belt\\_1600484522944.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.25524246344zIN&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Multi-Layer-Belt-Dryer-Belt_1600484522944.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.25524246344zIN&s=p)
- [57] “Yuda Rice Husk Hammer Maize Grinding Mill Crusher Feed Grinder - Buy Maize Grinding Mill, Hammer Mill Crusher, Rice Husk Hammer Mill Product on Alibaba.com.” Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Hammer-Mill-Price-YUDA-Rice-Husk\\_60712209939.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.30c7265bsyFF0&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Hammer-Mill-Price-YUDA-Rice-Husk_60712209939.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.30c7265bsyFF0&s=p)
- [58] M. Lucian and L. Fiori, “Hydrothermal carbonization of waste biomass: Process design, modeling, energy efficiency and cost analysis,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2017, doi: 10.3390/en10020211.
- [59] G. Mannarino, S. Caffaz, R. Gori, and L. Lombardi, “Environmental Life Cycle Assessment of Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge and Its Products Valorization Pathways,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 13, no. 9, pp. 3845–3864, Sep. 2022, doi: 10.1007/S12649-022-01821-X/FIGURES/9.
- [60] “Hina-generator De Vapor Eléctrico, 1 Tonelada - Buy Steam Generator Electrical 1 Ton, Steam Generator 1 Ton, Steam Generator Product on Alibaba.com.” Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/China-1600880179164.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.2802516bxo17IQ&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/China-1600880179164.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.2802516bxo17IQ&s=p)
- [61] “Pp Pe /pet Flakes Washing Machine Floating Tank Floating Washer For Plastic Recycling Washing Line - Buy Floating Tank, Washing Tank, Floating Separating Tank

- Product on Alibaba.com.” Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Plastic-Washer-Recycle-PP-PE-PET\\_62321650297.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.bf014e84XEC88I&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Plastic-Washer-Recycle-PP-PE-PET_62321650297.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.bf014e84XEC88I&s=p)
- [62] G. M. Ostrovsky, Yu. M. Volin, E. I. Barit, and M. M. Senyavin, “Flexibility analysis and optimization of chemical plants with uncertain parameters,” *Comput Chem Eng*, vol. 18, no. 8, pp. 755–767, 1994, doi: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(93\)E0013-Y](https://doi.org/10.1016/0098-1354(93)E0013-Y).
- [63] M. Langone and D. Basso, “Process Waters from Hydrothermal Carbonization of Sludge: Characteristics and Possible Valorization Pathways,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 18, pp. 1–31, Sep. 2020, doi: [10.3390/IJERPH17186618](https://doi.org/10.3390/IJERPH17186618).
- [64] N. A. Silva and S. R. Hiibel, “Nutrient recovery of the hydrothermal carbonization aqueous product from dairy manure using membrane distillation,” *Environ Technol*, vol. 44, no. 8, pp. 1135–1144, 2023, doi: [10.1080/09593330.2021.1995785](https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1995785).
- [65] “Hydrothermal carbonization (HTC) of biomass material.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.ennomotive.com/hydrothermal-carbonization-htc/>
- [66] Shyam Sivaprasad, Ashish Manandhar, and Ajay Shah, “Hydrothermal Carbonization: Upgrading Waste Biomass to Char | Ohioline.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-6622>
- [67] L. Yang *et al.*, “Hydrogen-rich gas production from the gasification of biomass and hydrothermal carbonization (HTC) aqueous phase,” *Biomass Convers Biorefin*, vol. 13, no. 3, pp. 1529–1538, Feb. 2023, doi: [10.1007/S13399-020-01197-9/METRICS](https://doi.org/10.1007/S13399-020-01197-9/METRICS).

- [68] Manufactura y comercio lideran la creación del empleo adecuado.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/manufactura-comercio-lideran-creacion-empleo-adecuado/>
- [69] “DEPARTAMENTO DE TRABAJO DE LOS EE.UU.”.
- [70] Carbón activado en Ecuador | OEC - The Observatory of Economic Complexity.” Accessed: Dec. 06, 2023. [Online]. Available: <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/activated-carbon/reporter/ecu>

## ANEXO A: METODOLOGÍA

**Objetivo Específico 1:** Identificar residuos agroindustriales apropiados para la producción de hidrochar, considerando su disponibilidad y composición.

- Analizar la disponibilidad de residuos agroindustriales en la región de estudio
  - Realizar un levantamiento de campo en la región de estudio para identificar y catalogar los diferentes tipos de residuos agroindustriales disponibles.
  - Recopilar datos sobre la cantidad y disponibilidad de estos residuos en la región.
- Obtener información sobre la composición química y física de los residuos seleccionados
  - Comparar los resultados de los análisis con los requisitos deseados para la producción de hidrochar.

**Objetivo Específico 2:** Verificar la efectividad de los procedimientos actuales utilizados en el tratamiento y fabricación de hidrochar.

- Revisar detalladamente la documentación existente de los procedimientos actuales utilizados en el tratamiento y fabricación de hidrochar activado
  - Obtener acceso a la documentación y registros de los procedimientos actuales utilizados en la fabricación de hidrochar.
- Identificar y documentar los pasos clave y los parámetros de operación de los procedimientos actuales.
  - Recopilar datos operativos y de rendimiento de producción de hidrochar a lo largo del tiempo.

- Comparar los datos operativos y los resultados de los análisis con los estándares y especificaciones predefinidos para evaluar la efectividad de los procedimientos actuales.

**Objetivo Específico 3:** Diseñar equipos necesarios para la operación del proceso.

- Seleccionar los equipos de acuerdo con el tipo de proceso seleccionado
  - Evaluar los requisitos del proceso, incluyendo el tipo de proceso y los parámetros de operación.
  - Realizar balances
  - Investigar y seleccionar equipos adecuados que cumplan con los requisitos del proceso.
  - Diseñar un esquema de instalación y disposición de los equipos en función de los flujos de materia y la logística del proceso.

**Objetivo Específico 4:** Analizar la viabilidad económica del proceso durante un período de tiempo predefinido, identificando si genera ganancias y resulta rentable en el plazo establecido.

- Recopilar datos de costos y gastos asociados al proceso, incluyendo inversión inicial, costos operativos y mantenimiento de equipos.
  - Recopilar datos detallados sobre costos de inversión, operativos y de mantenimiento relacionados con el proceso de producción de hidrochar.
- Calcular los ingresos estimados que generará el proceso durante el período establecido, considerando los precios de venta de los productos
  - Estimar los ingresos esperados calculando las ventas proyectadas de hidrochar y los precios de mercado.



- Utilizar técnicas de análisis financiero, como el cálculo del Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI), para evaluar la viabilidad económica.

## ANEXO B: BALANCE DE MASA

Tabla C1: Balance de masa parte I

<b>Corrientes / Compuesto [kg]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Agua</b>	52782,55	53440,53	53290,53	52932,55	53440,53
<b>Sólidos totales</b>	13195,64	0	0,00	13195,64	0
<b>Aire</b>	0	0	0	0	0
<b>Ácido cítrico</b>	0	0	0	0	0
<b>Licor residual</b>	0	0	0	0	0
<b>Gases</b>	0	0	0	0	127812,47
<b>Hidrocarbón</b>	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	65978,18	53440,53	53290,53	66128,18	181253,00

Tabla C2: Balance de masa parte II

<b>Corrientes / Compuesto [kg]</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>Agua</b>	53440,53	0	4335,18	4335,18
<b>Sólidos totales</b>	0	0	13195,64	13195,64
<b>Aire</b>	0	0	0	0
<b>Ácido cítrico</b>	0	0	0	0
<b>Licor residual</b>	0	0	0	0
<b>Gases</b>	127812,47	127812,47	0	0
<b>Hidrocarbón</b>	0	0	0	0
<b>Total</b>	181253,00	127812,47	17530,81	17530,81

Tabla C3: Balance de masa parte III

<b>Corrientes / Compuesto [kg]</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
<b>Agua</b>	70098,90	0	0	0
<b>Sólidos totales</b>	0	0	0	0
<b>Aire</b>	0	0	0	0
<b>Ácido cítrico</b>	40418,34	0	0	0
<b>Licor residual</b>	0	0	61717,22	61717,22
<b>Gases</b>	0	8519,97	0	0
<b>Hidrocarbón</b>	0	0	17416,48	17416,48
<b>Total</b>	110517,24	8519,97	79133,70	79133,70

Tabla C4: Balance de masa parte IV

<b>Corrientes / Compuesto [kg]</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>Agua</b>	0	0	0	0
<b>Sólidos totales</b>	0	0	0	0
<b>Aire</b>	0	0	0	0
<b>Ácido cítrico</b>	0	0	0	0
<b>Licor residual</b>	69665,92	131383,14	10625,48	10625,48
<b>Gases</b>	0	0	0	0
<b>Hidrocarbón</b>	0	0	6791,00	0
<b>Total</b>	69665,92	131383,14	17416,48	10625,48

Tabla C5: Balance de masa parte V

<b>Corrientes / Compuesto [kg]</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
<b>Agua</b>	0	0	0
<b>Sólidos totales</b>	0	0	0
<b>Aire</b>	0	0	0
<b>Ácido cítrico</b>	0	0	0
<b>Licor residual</b>	0	1046,42	0
<b>Gases</b>	0	21268,01	0
<b>Hidrocarbón</b>	7837,42	0	6791,00
<b>Total</b>	7837,42	22314,42	6791,00

## ANEXO C: DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Para el presente proyecto, se dimensionaron cinco equipos mientras que los restantes fueron tomados de catálogos considerando la cantidad de materia que deben soportar.

### Tanque de almacenamiento

#### 1. **Determinar la función y requisitos del tanque:**

- Define claramente el propósito del tanque (almacenamiento de líquidos, contención de productos químicos, etc.).
- Establece los requisitos de capacidad, tipo de material a almacenar y condiciones operativas (presión, temperatura, etc.).

#### 2. **Realizar análisis de carga:**

- Calcula las cargas que afectarán al tanque, como el peso del líquido almacenado, el viento, la nieve, la presión interna, entre otros.

#### 3. **Seleccionar el material y tipo de tanque:**

- Elije un material compatible con el líquido almacenado y las condiciones ambientales.
- Decide entre tanques de acero, concreto, plástico u otros materiales, según las necesidades específicas.

#### 4. **Diseñar la geometría del tanque:**

- Define la forma y dimensiones del tanque.
- Considera factores como la altura, diámetro, conos de fondo, tapas, etc.

#### 5. **Especificaciones de construcción:**

- Define los detalles de construcción, incluyendo el grosor del material, refuerzos estructurales y métodos de soldadura.

Las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación:

Caudal volumétrico

$$Q = \frac{m}{\rho}$$

Donde:

- $Q$  = Caudal volumétrico
- $m$  = masa
- $\rho$  = densidad

Volumen en el tanque

$$V = Q * t$$

Donde:

- $V$  = volumen
- $t$  = tiempo

Sobredimensionamiento para seguridad entre altura y diámetro

$$h = 2D$$

Donde:

- $h$  = altura
- $D$  = diámetro

Presión de operación del tanque

$$P = \rho gh$$

Donde:

- P = presión del tanque
- g = gravedad

Dependiendo la geometría seleccionada para el tanque, se tiene diferentes ecuaciones de diseño

Tanque cilíndrico

$$A = \pi \left( \frac{D^2}{4} \right)$$

$$V = h\pi \left( \frac{D^2}{4} \right)$$

$$t = \frac{PD_i}{2SE - P}$$

Donde:

- A = área
- D = diámetro
- V = volumen
- t = espesor de la placa
- Di = diámetro interno
- P = presión de trabajo
- S = Esfuerzo máximo permisible
- E = Eficiencia de soldadura

Es importante recalcar que el valor de t obtenido se le suma un valor de 2 como factor de seguridad. Se considera mejor diseñar el tanque ligeramente sobreestimado para evitar cualquier peligro.

Tanque rectangular

$$A = L * a$$

$$V = A (h)$$

$$t = 2,45L \sqrt{E \frac{P}{S}}$$

Donde:

- L = longitud
- a = ancho del rectángulo

Es importante recalcar que el valor de t obtenido se le suma un valor de 2 como factor de seguridad, espesor por corrosión. Se considera mejor diseñar el tanque ligeramente sobreestimado para evitar cualquier peligro.

El máximo esfuerzo permisible se obtiene mediante la siguiente tabla tras seleccionar el tipo de material que se va a utilizar en el tanque y temperatura de trabajo.

Material	Grade	Min Tensile Strength (ksi)	Min Yield Strength (ksi)	Maximum Temperature (°F)	Maximum Allowable Stress at Temperature °F (ksi = 1000 psi)				
					100	300	500	700	900
Carbon steel	A285	45	24	900	12.9	12.9	12.9	11.5	5.9
	Gr A								
Killed carbon steel	A515	60	32	1000	17.1	17.1	17.1	14.3	5.9
	Gr 60								
Low alloy steel	A387	60	30	1200	17.1	16.6	16.6	16.6	13.6
	Gr 22								
Stainless steel	410	65	30	1200	18.6	17.8	17.2	16.2	12.3
	13 Cr								
Stainless steel	304	75	30	1500	20.0	15.0	12.9	11.7	10.8
	18 Cr, 8 Ni								
Stainless steel	347	75	30	1500	20.0	17.1	15.0	13.8	13.4
	18 Cr, 10 Ni, Cb								
Stainless steel	321	75	30	1500	20.0	16.5	14.3	13.0	12.3
	18 Cr, 10 Ni, Ti								
Stainless steel	316	75	30	1500	20.0	15.6	13.3	12.1	11.5
	16 Cr, 12 Ni, 2 Mo								

Figura C1. Tabla de máximos esfuerzos permisibles

Los cabezales de los tanques pueden ser del tipo torisféricos, elipsoidales o plantos, depende de las necesidades del equipo

Torisféricos:

$$t = \frac{0,885PL}{SE - 0,1P}$$

Planos:

$$t = D \sqrt{\frac{CP}{SE}}$$

Donde:

- S = esfuerzo máximo permitido
- D = diámetro de la placa
- C = constante que depende del soporte del borde
- E = eficiencia de la soldadura
- t = espesor

Elipsoidales

$$t = \frac{PR}{2SE - 0,2P}$$

Un dato para considerar es la diferencia del resultado del espesor de los cabezales y el cuerpo del tanque, si hay un valor más alto que el otro, es recomendable seleccionar este.

### Reactor

El reactor corresponde a un recipiente por lo que su diseño es igual a lo mencionado anteriormente para los tanques de almacenamiento. Se seleccionó un reactor cilíndrico con terminaciones elipsoidales, el material escogido fue acero inoxidable 316

### Agitador del reactor

El reactor seleccionado debe contar con agitador, este se diseña mediante las siguientes ecuaciones para conocer su potencia en kW



$$W_M = N_p N^3 M D^5 \rho S$$

$$N_p = 94.043 R_e^{-0.599}$$

Donde:

- $N_{Mc}$  = es las rev/min
- $D_i$  = diámetro del impeler
- $S$  = viscosidad de la mezcla
- $\rho$  = densidad de la mezcla
- $R_e$  = número de Reynolds

Es necesario conocer qué tipo de agitador se necesita, para el presente proyecto se seleccionó un agitador de ancla.

#### Chaqueta del reactor

El objetivo de la chaqueta es calentar el reactor y mantener la temperatura en el reactor. Este se sitúa alrededor del tanque del reactor por lo que se consideró un grosor del 2% del área.

Las ecuaciones para obtener la potencia para la chaqueta son las siguientes

$$A = 2\pi R^2 D$$

$$Q = \frac{m C_p \Delta T}{t_{heat}}$$

$$Q = U A \Delta T$$

Donde:

- |                  |   |
|------------------|---|
| • $R$ = radio    | • $C_p$ = capacidad calórica            |
| • $D$ = diámetro | • $\Delta T$ = variación de temperatura |
| • $m$ = masa     | • $U$ = energía interna                 |
| •                |   |

## ANEXO D: ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se evidencian los valores de los equipos al igual que los procedimientos y métodos utilizados para realizar el análisis económico del presente proyecto.

Tabla D1: Precio de catálogos para los equipos del proyecto

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo aprox. equipo [\$]</b>	<b>Total</b>
Torre de enfriamiento	1	1000	1000
Secador de bandejas	1	22000	22000
Molino de martillos	1	2200	2200
Generador de vapor	1	6000	6000
Intercambiador de calor	1	1016	1016
Secador de lecho fluidizado	1	25000	25000
Reactor HTC	1	95936	95936
Tanque despresurizador	1	6900	6900
Filtro de prensa	1	2300	2300
Tolva de recepción	1	15000	15000
Motor 1000 W	1	1520	1520
Tanque de almacenamiento 2	1	8888	8888
Tanque de almacenamiento 3	1	1500	1500
Tanque de lavado 1	1	2500	2500
Tanque de lavado 2	1	5000	5000
Bandas transportadoras	7	250	1750
<b>Total [\$]</b>			198510

Se hizo un análisis del costo operacional (ISBL) usando los métodos de estimación de Bridgewater, Factores Lang, Factores Hand y Factorial Detallado.

### Método Bridgewater

Este método presenta dos variables que depende de la cantidad del caudal de producción y se obtiene una precisión del 50%.

$$Q < 60,000 : C_{ISBL} = 280,000 * N(Q/S)^{0.3} \quad [1]$$

$$Q > 60,000 : C_{ISBL} = 3200 * N(Q/S)^{0.675} \quad [2]$$

En donde:

- Q es el caudal de producción en [ton métricas/año]
- N es el número de unidades funcionales

Debido a que el caudal para el presente proyecto es menor a 60,000, se utilizó la ecuación [2] obteniendo los siguientes valores:

Tabla D3: Estimación costo ISBL por método Bridgewater

<b>Capacidad de producción [MTA]</b>	2478,72
<b>Conversión</b>	0,39
<b>Unidades funcionales</b>	8
<b>Costo ISBL [\$]</b>	31050465,25

#### Método de Factores de Lang

El método de factores de Lang responde al siguiente modelo:

$$C_{ISBL} = F(\sum C_e) \quad [3]$$

En donde

- F representa el factor de instalación (3 para sólidos, 4 para mixtos, y 5 para fluidos)
- $C_e$  es el costo de cada equipo

En la siguiente tabla se muestran los costos de los equipos junto con el factor de Lang correspondiente y finalmente el cálculo del costo ISBL que es la sumatoria de la multiplicación de los datos ya mencionados para cada equipo.

Tabla D4: Cálculo ISBL por factores de Lang

<b>Código del Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo equipo [\$]</b>	<b>Factor de Lang</b>	<b>Costo total [\$]</b>
TE-101	1	1000	5	5000
D-101	1	22000	3	66000
G-101	1	2200	3	6600
C-102	1	6000	5	30000
C-101	1	1016	5	5080
D-102	1	25000	4	100000
R-101	1	95936	4	383744
TK-104	1	6900	4	27600

Tabla D5: Cálculo ISBL por factores de Lang (continuación)

<b>Código del Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo equipo [\$]</b>	<b>Factor de Lang</b>	<b>Costo total [\$]</b>
F-101	1	2300	4	9200
TK-101	1	15000	3	45000
Motor 1000 W	1	1520	3	4560
TK-103	1	8888	5	44440
TK-106	1	1500	3	4500
TK-102	1	2500	4	10000
TK-105	1	5000	4	20000
BT-(101-107)	7	250	3	5250
<b>Costo ISBL [\$]</b>				<b>766974</b>

### Método de Factores de Hand

El método de Hand utiliza la misma ecuación que el método de Lang [3] sin embargo, el valor del factor (f) es distinto y se rige bajo la siguiente tabla:

<b>Equipment type</b>	<b>Installation factor</b>
Compressors	2.5
Distillation columns	4
Fired heaters	2
Heat exchangers	3.5
Instruments	4
Miscellaneous equipment	2.5
Pressure vessels	4
Pumps	4

Figura D1: Factores de instalación método de Hand

Los valores obtenidos mediante el método de Hand se presentan a continuación:

Tabla D6: Cálculo ISBL por factores de Hand

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo equipo [\$]</b>	<b>Factor de Hand</b>	<b>Costo total [\$]</b>
TE-101	1	1000	2,5	2500
D-101	1	22000	2,5	55000
G-101	1	2200	2,5	5500
C-102	1	6000	2	12000
C-101	1	1016	3,5	3556
D-102	1	25000	2,5	62500
R-101	1	95936	4	383744
TK-104	1	6900	4	27600

Tabla D7: Cálculo ISBL por factores de Hand (continuación)

Equipo	Cantidad	Costo equipo [\$]	Factor de Hand	Costo total [\$]
F-101	1	2300	2,5	5750
TK-101	1	15000	2,5	37500
Motor 1000 W	1	1520	4	6080
TK-103	1	8888	2,5	22220
TK-106	1	1500	2,5	3750
TK-102	1	2500	2,5	6250
TK-105	1	5000	2,5	12500
BT-(101-107)	7	250	3	5250
<b>Costos ISBL [\$]</b>				<b>651700</b>

### Método de Factorial Detallado

El método con Factorial Detallado toma en cuenta varios parámetros respecto a la trayectoria de los equipos, desde instalación, material, equipos hasta consideraciones adicionales. La siguiente ecuación modela el método:

$$C = \sum_{l=1}^{i=M} C_{e,l,cs} [(1 + f_p)f_m + (f_{er} + f_{el} + f_l + f_c + f_s + f_i)] \quad [4]$$

En donde

- $f$  es un factor diferente y específico para cada tipo de operación

En la Figura D2 y D3 se muestran los valores de los diferentes factores que se deben considerar para cada equipo dependiendo del estado de la materia que maneja cada equipo

Item	Process type		
	Fluids	Fluids – solids	Solids
1. Major equipment, total purchase cost	$C_e$	$C_e$	$C_e$
$f_{er}$ Equipment erection	0.3	0.5	0.6
$f_p$ Piping	0.8	0.6	0.2
$f_i$ Instrumentation and control	0.3	0.3	0.2
$f_{el}$ Electrical	0.2	0.2	0.15
$f_c$ Civil	0.3	0.3	0.2
$f_s$ Structures and buildings	0.2	0.2	0.1
$f_l$ Lagging and paint	0.1	0.1	0.05
ISBL cost, $C = \Sigma C_e \times$	3.3	3.2	2.5
Offsites (OS)	0.3	0.4	0.4
Design and Engineering (D&E)	0.3	0.25	0.2
Contingency (X)	0.1	0.1	0.1
Total fixed capital cost $C_{FC} = C (1 + OS)(1 + D\&E + X)$			
$= C \times$	1.82	1.89	1.82
$= \Sigma C_e \times$	6.00	6.05	4.55

Figura D2: Factores para método factorial detallado

Material	$f_m$
Carbon steel	<u>1.0</u>
Aluminum and bronze	1.07
Cast steel	1.1
304 stainless steel	<u>1.3</u>
316 stainless steel	<u>1.3</u>
321 stainless steel	1.5
Hastelloy C	1.55
Monel	1.65
Nickel and Inconel	1.7

Figura D23 Factor  $f_m$  para método factorial detallado

A continuación, se evidencian los valores obtenidos para el presente proyecto mediante el método de factorial detallado:

Tabla D8: Datos obtenidos por método de factorial detallado

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo equipo [\$]</b>	<b>fm</b>	<b>fpt</b>	<b>fp</b>	<b>X</b>	<b>Costo ISBL [\$]</b>	<b>Xcf</b>	<b>Costo CFC [\$]</b>
TE-101	1	1000	1,3	1,4	0,8	3,74	3740,0	1,8 2	6806,8
D-101	1	22000	1,3	1,6	0,6	3,68	80960,0	1,8 9	153014,4
G-101	1	2200	1,3	1,3	0,2	2,86	6292,0	1,8 2	11451,4
C-102	1	6000	1,3	1,4	0,8	3,74	22440,0	1,8 2	40840,8
C-101	1	1016	1,3	1,4	0,8	3,74	3799,8	1,8 2	6915,7
D-102	1	25000	1,3	1,6	0,6	3,68	92000,0	1,8 9	173880,0
R-101	1	95936	1,3	1,6	0,6	3,68	353044,5	1,8 9	667254,1
TK-104	1	6900	1,3	1,6	0,6	3,68	25392,0	1,8 9	47990,9
F-101	1	2300	1,3	1,6	0,6	3,68	8464,0	1,8 9	15997,0
TK-101	1	15000	1,3	1,3	0,2	2,86	42900,0	1,8 2	78078,0
Motor 1000 W	1	1520	1	1,4	0,8	3,2	4864,0	1,8 2	8852,5
TK-103	1	8888	1,3	1,4	0,8	3,74	33241,1	1,8 2	60498,8
TK-106	1	1500	1,3	1,3	0,2	2,86	4290,0	1,8 2	7807,8
TK-102	1	2500	1,3	1,6	0,6	3,68	9200,0	1,8 9	17388,0
TK-105	1	5000	1,3	1,6	0,6	3,68	18400,0	1,8 9	34776,0
BT-(101-107)	7	250	1,3	1,3	0,2	2,86	5005,0	1,8 2	9109,1

Con la información de la Tabla D8 fue posible calcular los costos ISBL y el costo de capital fijo.

Tabla D8: Costo ISBL y CFC por método de factorial detallado

<b>Costo total ISBL [\$]</b>	714032,4
<b>Costo capital fijo CFC [\$]</b>	1340661,3

El empleo del método factorial detallado facilita una estimación más precisa una vez que se ha finalizado el establecimiento del proceso y se ha dimensionado cada uno de los equipos. La determinación del factor de instalación puede realizarse con mayor rigor. Por dicha razón, los valores arrojados por el método factorial detallado son lo que se toman en cuenta para continuar con el análisis y calcular los costos de inversión de capital fijo.

Tabla D9: Costo de inversión de capital fijo por método de factorial detallado

<b>Método estimación</b>	<b>Costo ISBL [\$]</b>	<b>Costo OSBL [\$]</b>	<b>Costo por ingeniería y construcción [\$]</b>	<b>Costos imprevistos [\$]</b>	<b>Inversión de capital fijo [\$]</b>
Factorial detallado	714032,44	285612,98	89254,06	357016,22	1445915,69

Posteriormente, se calculó el costo del proyecto el cual se muestra en la Tabla D10.

Tabla D10: Costo del proyecto

<b>Inversión capital fijo</b>	<b>Costos de producción</b>	<b>Capital de trabajo</b>	<b>Costos proyecto</b>
<b>[\$]</b>	<b>[\$]</b>	<b>[\$]</b>	<b>[\$]</b>
1445915,69	103287467,05	3794748,04	<b>108528130,77</b>

### Flujo de caja

Para el cálculo del flujo de caja se tuvieron en cuenta los ingresos y gastos anuales a lo largo de los 10 años de operación de la planta. Se asumió que en el primer año (año 0) no se generaría ningún ingreso bruto, de manera que los flujos de caja netos consistirían en la inversión total, incluyendo la inversión de capital fijo y los costos operativos. Además, se aplicó un impuesto del 12% al flujo de caja.



Se realizaron tres métodos para el cálculo del flujo de caja que se diferencian en sus consideraciones. El primero no cuenta con depreciación, mientras que el segundo si lo hace, finalmente el tercero es el método MACRs que maneja una carga de depreciación diferente al método anterior. La diferencia entre los métodos expuestos se evidencia en sus resultados los cuales se observan en la Figura 4 del texto.

### Parámetros económicos

En esta sección se calculan los valores económicos esenciales para comprobar la viabilidad del proyecto presente, estos parámetros son el VAN, TIR, ROI, entre otros. El análisis de VAN representa la rentabilidad de una inversión al considerar el valor presente de los flujos de efectivo futuros. Un VAN positivo indica que la inversión podría generar ganancias, mientras que un VAN negativo sugiere que la inversión podría no ser rentable.

$$VAN = \sum \frac{CF_n}{(1+i)^n} \quad [5]$$

También se hizo un análisis del TIR, el cual es una medida financiera que indica la rentabilidad de una inversión. Representa la tasa de interés a la cual los flujos de efectivo netos de una inversión se igualan a cero, lo que significa que los ingresos futuros y los costos presentes tienen el mismo valor actual. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$0 = \sum \frac{FC_i}{(1+TIR)^i} = FC_0 + \frac{FC_1}{(1+TIR)^1} \dots \dots \quad [6]$$

El parámetro de retorno de inversión (ROI) también fue calculado, este representa la comparación entre los fondos ganados o perdidos con la cantidad de dinero invertido en el proyecto. Se calcula mediante la ecuación continua

$$ROI = \frac{\text{Beneficio Anual Neto}}{\text{Inversión Total}} \times 100\% \quad [7]$$

Por último, también se calculó el tiempo de recuperación de la inversión mediante la ecuación 8

$$\text{Tiempo de Recuperación Simple} = \frac{\text{Inversión Total Inicial}}{\text{Flujo de Caja Promedio Anual}} \quad [8]$$

Todos los resultados de la ecuación planteadas se muestran a continuación en la Tabla D11

Tabla D11. Valores económicos del proyecto

<b>Parámetro Económico</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
VAN	595602,05	\$
TIR	20	%
ROI Promedio	29,11	%
Tiempo de Recuperación con Depreciación	4,8	años

### Análisis de flexibilidad

Para concluir, se llevó a cabo un análisis de flexibilidad en relación con el caudal mínimo de hidrocarbón necesario para mantener la rentabilidad del proyecto. Este análisis flexible evalúa la viabilidad financiera del proyecto al considerar un caudal de producción constante y la inversión inicial. Al seleccionar el caudal mínimo vendido, se ajustó el Valor Actual Neto (VAN) para que sea igual a cero. Los resultados de este ajuste se presentan en la Figura 5 del documento.