

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de 00206394

**Análisis de prefactibilidad de una planta de biochar mediante un
proceso de pirólisis con cascarilla de arroz**

Nicolás Alejandro Mateus Pérez

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
ingeniería química

Quito, 02 de 05 de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de 00206394

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

**Análisis de prefactibilidad de una planta de biochar mediante un proceso
de pirólisis con cascarilla de arroz**

Nicolás Alejandro Mateus Pérez

Nombre del profesor, Título académico

Juan Diego Fonseca, Ph. D.

Quito, 02 de mayo de 2023

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Nicolás Alejandro Mateus Pérez

Código: 00206394

Cédula de identidad: 1722441605

Lugar y fecha: Quito, 02 de mayo 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UNPUBLISHED DOCUMENT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 propone un proceso rentable para la producción de biochar, un absorbente de carbono derivado de residuos agrícolas, cuya estructura porosa y libre de compuestos tóxicos ofrece soluciones para problemas ambientales. Este se descompone lentamente en el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, a la vez que sirve de fertilizante. La propuesta se enfoca en la cascarilla de arroz como fuente abundante de biomasa y opta por un proceso de pirólisis lenta para optimizar costos y calidad. Aunque el biochar de cascarilla de arroz no puede reemplazar completamente a los fertilizantes convencionales, un enfoque combinado se recomienda. El proyecto presenta indicadores económicos alentadores, con un Valor Actual Neto (VAN) de 72.76 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 13%, y se espera que la inversión inicial se recupere en 4.5 años. Futuras investigaciones podrían examinar pretratamientos químicos para mejorar la calidad del biochar, pero estos podrían afectar la viabilidad económica.

Palabras clave: Biochar, Absorbente de carbono, Pirólisis lenta, Cascarilla de arroz, Fertilizantes convencionales, Viabilidad económica.

ABSTRACT

The project proposes a profitable process for the production of biochar, a carbon absorbent derived from agricultural waste, whose porous structure and lack of toxic compounds offer solutions to environmental problems. This decomposes slowly in the soil, improving its physical and chemical properties, while serving as a fertilizer. The proposal focuses on rice husks as a plentiful source of biomass and opts for a slow pyrolysis process to optimize costs and quality. Although rice husk biochar cannot completely replace conventional fertilizers, a combined approach is recommended. The project presents encouraging economic indicators, with a Net Present Value (NPV) of 72.76 and an Internal Rate of Return (IRR) of 13%, and the initial investment is expected to be recouped in 4.5 years. Future research could examine chemical pretreatments to improve the quality of biochar, but these could affect the economic viability.

Keywords: Biochar, Carbon Absorbent, Slow Pyrolysis, Rice Husks, Conventional Fertilizers, Economic Viability.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Antecedentes del Proyecto	10
1.2 Justificación para la Implementación del Proyecto	11
1.3 Objetivos del Proyecto	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Resultados Esperados de la Implementación del Proyecto	12
2. BASES DEL DISEÑO	14
2.1. Descripción de los Productos	14
2.2 Descripción de Materias Primas	15
2.2.1 Características químicas	16
2.3 Tecnologías Actuales para la Producción de Biochar.	16
2.3.1 Pirolisis lenta	16
2.3.2 Pirolisis rápida	17
2.3.3 Pirolisis flash.....	18
2.4 Tipos de reactores	19
2.5 Variables a Considerar para Maximizar la Producción de Biochar.....	19
2.5.1 Temperatura.....	19
2.5.2 Taza de calentamiento	20
2.5.3 Configuración del reactor	21
2.5.4 Presión.....	22
2.5.5 Tiempo de residencia	22
2.6 Situación Actual de los Mercados Aplicables al Proyecto.....	23
3. DISEÑO DEL PROCESO	25
3.1 Definición de los Criterios de Selección	25
3.2 Pirolisis Lenta.....	25
3.3 Riesgos del Proceso (Hazop).....	26
4. DISEÑO DE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO	28
4.1 Definición del Caudal de Producción	28
4.2 Descripción del Proceso a ser implementado para la producción óptima de biochar	28
4.3 Selección y Dimensionamiento de los Equipos	29
4.4 Consumo energético.....	30
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	31
5.1 Estimación de la Planta de Producción.....	31
5.2 Inversión de Capital Fijo.....	32

5.3 Estimación de Costos de Capital Fijo, Capital de Trabajo y Costos de Producción	32
5.4 Estimación de Ingresos	33
5.5 Análisis de Tiempo de la Recuperación Inicial	34
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
7. Referencias	38
ANEXOS	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del biochar	14
Tabla 2. Cantidad de cascarilla disponible para el proyecto.....	28
Tabla 3. Especificación de los equipos utilizados.....	29
Tabla 4. Requerimiento energético.	30
Tabla 5. Estimación de costos.....	31
Tabla 6. Inversión de capital fijo.	32
Tabla 7. Resumen de costos.....	33
Tabla 8. Estimación de ingresos.	33
Tabla 9. VAN y TIR	34
Tabla 10. VAN y TIR caso 2.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Gráfico 1. Tiempo de recuperación de la inversión inicial.	34
Gráfico 2. Tiempo de recuperación de la inversión inicial – Tasa de interés 12,5%	35

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes del Proyecto

La atención mundial se está centrando cada vez más en la necesidad de conservar y utilizar de manera racional nuestros suelos. Esto se refleja en la integración de la preservación del suelo y el uso sostenible de la tierra en el plan de desarrollo sostenible de la ONU. El veloz desarrollo industrial en todo el mundo, la agricultura intensiva y el cambio de uso de la tierra han resultado en la degradación del suelo y un riesgo considerablemente mayor de contaminación por metales pesados (MP). La rápida industrialización y la urbanización desordenada, sumadas al uso prolongado de fertilizantes y pesticidas en grandes cantidades, han provocado la acumulación de MP en el suelo. Los MP, como contaminantes, tienen la particularidad de ser difícilmente biodegradables, lo que provoca su acumulación en los suelos y un aumento de su toxicidad con el tiempo. Diversos estudios han revelado que un incremento en la presencia de MP en el suelo aumenta el riesgo potencial para el medio ambiente y la salud humana (Das, Ghosh, & Ravikant, 2023).

Una estrategia prometedora para luchar contra la contaminación del suelo por MP consiste en minimizar su efecto nocivo reduciendo su presencia. Para alcanzar esta meta, se sugiere la aplicación de métodos de remediación más respetuosos con el entorno y económicamente eficientes, como la remediación por sorción. Varios estudios proponen el uso de absorbentes de carbono, como el biochar, para este propósito. Se estima que el biochar se descompone lentamente en el suelo, pudiendo permanecer en él durante miles de años. Adicionalmente, el carbón derivado de los residuos agrícolas posee una estructura porosa bien definida, una gran área superficial específica y está libre de compuestos tóxicos como los MP y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Debido a su estructura porosa y a los grupos funcionales en su superficie, el biochar se ha convertido en una solución alentadora para diversos problemas medioambientales. Aparte de ser un depurador de suelos, el biochar también puede funcionar

como fertilizante para los cultivos, ya que aumenta la actividad biológica del suelo, ayuda a conservar la humedad accesible para las plantas y mejora las propiedades químicas y físicas del suelo (Dunnigan, Ashman, Zhang, & Kwong, 2018).

El biochar se obtiene mediante un procedimiento denominado pirólisis, el cual es fundamental para la transformación de materia orgánica en un producto más estable. Este proceso térmico, que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, induce la descomposición de la materia orgánica en distintos productos, siendo uno de ellos el biochar. Al someter el material orgánico a altas temperaturas durante la pirólisis, se produce una reorganización y ruptura de los enlaces químicos, resultando en la formación de este producto, un material carbonizado, poroso y de color oscuro. La pirólisis, además de facilitar la generación de biochar, produce otros subproductos valiosos, como gas y aceite, que tienen potencial como fuentes de energía. Sin embargo, este proyecto se centra en la producción y características del biochar como agente de remediación de suelos (Ghulam, Ahmed, & Muhammad, 2022).

1.2 Justificación para la Implementación del Proyecto

El presente proyecto se propone para la creación de una planta de biochar en Ecuador utilizando cascarilla de arroz como materia prima. La elección de la cascarilla de arroz no es casual, ya que Ecuador es uno de los principales productores de arroz en la región, generando una cantidad significativa de este subproducto, que a menudo se desecha o se usa de manera ineficiente. Este proyecto presenta una oportunidad de transformar un desecho en un recurso valioso, apoyando la economía circular.

Este proyecto se alinea con la creciente conciencia ambiental tanto en Ecuador como a nivel global, y podría beneficiarse de futuras regulaciones o leyes que favorezcan tecnologías sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La posibilidad de subsidios estatales para proyectos que contribuyan al cuidado del medio ambiente aumenta la viabilidad financiera y el atractivo de este proyecto. Además, la creación de una planta de producción de biochar tiene

el potencial de impulsar el desarrollo económico local, generando empleo y apoyando el bienestar económico de las comunidades rurales. Por último, este proyecto posiciona a Ecuador como un líder en la adopción de tecnologías limpias y sostenibles, demostrando una visión progresista hacia la sostenibilidad y la economía circular (Nematian, Keske, & Ng'ombe, 2021).

1.3 Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo general

Crear un proceso rentable para la producción de biochar respaldado en literatura

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir un proceso viable para la producción de biochar el cual sea escalable a nivel industrial. Capítulo 2
- Platear un diseño seguro en base a la información recopilada. Capítulo 3 y 4
- Realizar un análisis de factibilidad del proyecto. Capítulo 5

1.4 Resultados Esperados de la Implementación del Proyecto

La cantidad y el rendimiento de los productos dependen de varios factores como la temperatura, la presión, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula, catalizadores, la composición del material de partida, el contenido de humedad y la configuración del reactor. La capacidad de escalado y los costos económicos hacen que la pirólisis de biomasa sea la tecnología preferida para la producción de biochar. A pesar de las ventajas de la pirólisis en términos de aplicaciones agrícolas, industriales y medioambientales, la producción de biochar de alta calidad a partir de cascarilla de arroz en Ecuador sigue siendo un desafío.

El objetivo de este estudio es revisar las técnicas de pirólisis, los tipos de reactores y los parámetros de la pirólisis utilizando como materia prima la cascarilla de arroz, para identificar las variables que podrían optimizar la producción de biochar. El resultado esperado es

encontrar las variables adecuadas para la producción, logrando un producto de alta calidad y económicamente rentable. Este enfoque permitirá una mejor comprensión de cómo maximizar el rendimiento y la tecnología detrás del proceso de pirolisis (Aisha et al, 2022).

2. BASES DEL DISEÑO

2.1. Descripción de los Productos

El biochar es un material sólido rico en carbono y estable, producido mediante la pirólisis de biomasa en un entorno con limitación de oxígeno. La conversión pirolítica de las materias primas, principalmente compuestas por residuos orgánicos, a biochar y las aplicaciones agrícolas que ofrece hace que se considere como un producto de manejo ambiental y económicamente aceptable. El biochar puede obtenerse a través del procesamiento termoquímico de una amplia variedad de materias primas con diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos, etc. Después de la pirólisis, el subproducto sólido es una red porosa de carbonatos y/o carbono aromático. El biochar mejora la fertilidad de los suelos y no se han reportado efectos controvertidos en ellos. La magnitud del efecto beneficioso está relacionada con las propiedades físicas y químicas de los biochars, las cuales se exponen en la **tabla 1** (Günel, Bayram, Günel, & Erdem, 2019).

Tabla 1. Propiedades del biochar

Característica	Descripción	Unidades
Rendimiento de masa (RM)%	$RM = \frac{\text{peso de biocarbón después de la pirólisis}}{\text{peso de la materia prima}} * 100$	%
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	La capacidad de intercambio de cationes (CIC) es la capacidad de adherirse e intercambiar cationes cargados positivamente, como nutrientes importantes como potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), etc.	$\frac{cmol}{kg}$
Área superficial específica (ASE)	A mayor área superficial específica, se presenta una mayor actividad en las interacciones químicas por gramo.	$\frac{m^2}{g}$

carbono total	Junto con el enriquecimiento de C de biochars, se afirmó que las estructuras de carbono presentes en el biochar se vuelven altamente resistentes a la degradación por parte de los microorganismos. Por lo tanto, los biochar con altas concentraciones de C tienen capacidad para almacenar carbono durante un largo periodo de tiempo contribuyendo a la mitigación del cambio climático	%
nitrógeno total	El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y, como tal, su presencia en el biochar puede ser beneficiosa para la remediación de suelos.	%
pH	En muchos casos, los biochar se han utilizado para mejorar los suelos ácidos donde la alcalinidad del biochar es favorable para mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos que crecen en suelos ácidos.	-

2.2 Descripción de Materias Primas

La industria de procesamiento de arroz es una de las principales agroindustrias en Ecuador, generando varios subproductos como la paja, cascarilla, ceniza, salvado y el arroz roto. De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) - ESPAC (2018) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (2020), el arroz es el cuarto cultivo más producido en el país, con una producción anual de alrededor de 1.6 millones de toneladas, de

las cuales se obtiene cerca del 20% en forma de cáscara. Este subproducto, que tiene un alto contenido de cenizas y sílice, 18-20% y 15-20% respectivamente, no se usa en la alimentación de animales debido a su naturaleza abrasiva, y a menudo se quema o se deposita en vertederos de manera irresponsable. En Ecuador, estos residuos no se utilizan de manera eficaz ni en la fase de producción agroindustrial ni en la postcosecha, ya que suelen considerarse de poco valor, siendo su uso limitado a combustible sólido, cama para animales, fertilizante y material de construcción (Llorach-Massana et al., 2017).

2.2.1 Características químicas

Se ha observado una producción eficiente de biochar a través del proceso de pirólisis de la paja de arroz, gracias a sus elementos lignocelulósicos, entre los que se incluyen la celulosa (32–47%), hemicelulosa (19–28%) y lignina (5-24%) (Tanquilla, 2018).

2.3 Tecnologías Actuales para la Producción de Biochar.

La pirólisis es la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, lo que resulta en la creación de tres productos principales, es decir, biochar, aceite y gas, en proporciones variables. Sin embargo, el proceso podría ajustarse para potenciar la producción de cualquiera de los tres cambiando las condiciones en el reactor. Todos los procesos contemporáneos de pirólisis en operación pueden categorizarse en una de las siguientes tres categorías: pirólisis lenta, rápida y flash (Al-Rumaihi, Shahbaz, Mckay, Mackey, & Al-Ansari, 2022).

2.3.1 Pirolisis lenta

La pirólisis lenta, o pirólisis convencional, es una técnica de pirólisis que se remonta a principios de 1900, cuando la madera se sometía a pirólisis en industrias durante 24 horas para producir metanol, etanol, ácido acético y carbón. Esta técnica utiliza sistemas continuos conocidos como sistemas de "carbón vegetal", que calientan lentamente la materia orgánica en

un entorno anaeróbico a temperaturas superiores a 400 °C, con tasas de calentamiento mínimas que oscilan entre 5 y 7 °C/min y tasas de calentamiento máximas que oscilan entre 20 y 100 °C/min. Las temperaturas máximas oscilan entre 400 y 650 °C, y los tiempos de residencia varían entre 5 y 30 minutos hasta varios días, durante los cuales los compuestos orgánicos volátiles sufren craqueo y recombinación para producir carbón vegetal y otros líquidos fraccionales. Esta combinación de bajas tasas de calentamiento, baja temperatura y largos tiempos de residencia da como resultado un mayor rendimiento de carbón vegetal de alta calidad, mientras se minimiza la producción de productos líquidos y gaseosos. En este contexto, la pirólisis lenta es una tecnología desarrollada en el caso de la producción de biochar, mientras que la producción de bio-aceite a partir de la pirólisis lenta se encuentra actualmente a escala piloto (Diptiprakash & Neelancherry, 2022).

2.3.2 Pirolisis rápida

La pirolisis rápida es una técnica de pirolisis que maximiza la producción de aceite líquido de alta calidad. Este aceite es un combustible de densidad energética intermedia que puede ser refinado en hidrocarburos presentes en la gasolina y el diésel. Durante la pirolisis rápida, la materia orgánica se trata térmicamente en ausencia de oxígeno a una temperatura de 600-650 grados Celsius a tasas de calentamiento elevadas de hasta 1000 grados Celsius por segundo. Esto provoca que la materia orgánica se descomponga rápidamente, produciendo principalmente vapores y aerosoles, con pequeñas cantidades de gas y carbón. A nivel global, la investigación y desarrollo han mostrado un interés significativo en esta tecnología. Puede producir grandes rendimientos de aceite combustible de alta calidad que puede ser utilizado como fuentes de energía para aplicaciones industriales en motores, turbinas y calderas. Esto se debe a que las técnicas de pirolisis rápida garantizan la desintegración inicial de la estructura molecular de la materia orgánica, a la vez que permiten un mayor refinamiento. Además, puede

utilizar una variedad de materias primas para producir aceite, desde residuos vegetales hasta residuos municipales e industriales. Lo más importante es que el proceso es altamente escalable, lo que lo hace económicamente factible. Lo más importante es que la producción de gas es mayor en la pirolisis rápida que en la pirolisis lenta. Otra ventaja es que la pirolisis rápida puede realizarse en diversos reactores, como el horno de vacío, el reactor de lecho fluidizado burbujeante, el reactor de flujo arrastrado, el reactor rotatorio y el reactor de vórtice, entre otros (Diptiprakash & Neelancherry, 2022).

2.3.3 Pirolisis flash

La pirolisis instantánea se conoce como tal debido a la naturaleza extremadamente rápida del proceso. Sin embargo, aunque la velocidad es un aspecto crítico de este proceso, mucho depende de los procesos por los cuales se transfieren el calor y la masa a través de la materia prima. Al igual que con la pirolisis rápida, la pirolisis instantánea también produce aceite de pirolisis de color marrón oscuro después de la descomposición, enfriamiento y condensación de la materia prima. La pirolisis genera principalmente vapores y aerosoles con una pequeña cantidad de carbón. La pirolisis instantánea se realiza a temperaturas cercanas a 1000 grados Celsius, con tasas de calentamiento superiores a 700 grados Celsius por segundo, y tiempos de retención extremadamente bajos (<0.5 segundos). Así, el proceso está muy cuidadosamente optimizado para producir altos rendimientos de aceite de calidad. Algunos factores distintivos incluyen la necesidad de someter la materia prima a temperaturas óptimas para permitir la reacción, usar partículas de pequeño tamaño en reactores de lecho fluidizado para reducir la formación de coque, y asegurar una transferencia más rápida de calor a la superficie de las partículas, como se hace durante la ablación. La pirolisis instantánea puede rendir hasta el 75% de aceite de pirolisis por el peso del producto. Sin embargo, la pirolisis instantánea sufre de una pobre estabilidad térmica. Además, el carbón exhibe un efecto

catalítico que resulta en la producción de un aceite más viscoso que a veces contiene residuos sólidos, lo que lo hace económicamente inviable debido al gasto adicional para la mejora y mejorar la calidad (Llorach-Massana et al., 2017).

2.4 Tipos de reactores

El tipo de reactor determina la conversión exitosa de materia orgánica en energía (combustibles gaseosos, líquidos, sólidos) durante la pirólisis. Los reactores son cruciales para el proceso de pirólisis en el cual se lleva a cabo la degradación térmica de la materia orgánica. Los reactores se diseñan teniendo en cuenta las especificaciones de temperatura de calentamiento, presión requerida, tiempo de residencia del vapor y otros parámetros. Las configuraciones comunes de reactores utilizadas para la pirólisis incluyen lotes y semi-lotes, lechos fijos y fluidizados, reactores de lecho germinado cónico, y tecnología asistida por microondas (Al-Rumaihi et al., 2022).

2.5 Variables a Considerar para Maximizar la Producción de Biochar

Las condiciones del proceso de pirólisis pueden influir notablemente en las propiedades fisicoquímicas, la calidad y la cantidad de los productos obtenidos. Por lo tanto, los parámetros del proceso de pirólisis son fundamentales para determinar y mejorar la calidad y el volumen final del resultado obtenido.

2.5.1 Temperatura

Como proceso termoquímico, es evidente que la temperatura de la pirólisis es crucial para el rendimiento del biochar y sus propiedades fisicoquímicas, tales como estabilidad, proporción de componentes elementales, área superficial, estructura de poros y grupos funcionales debido a la afluencia de materias volátiles a altas temperaturas. Diversos estudios demuestran que la temperatura pirólisis está inversamente relacionada con el rendimiento del biochar y directamente relacionada con el rendimiento del bio-aceite. Con un aumento de

temperatura de 400 °C a 700 °C, el rendimiento del biochar se redujo aproximadamente entre un 10-30%. Del mismo modo, un incremento de temperatura de 250 °C disminuyó el rendimiento del biochar en un 90% aproximadamente. Un estudio indicó que el mayor rendimiento del biochar, 45.18%, se logró a 350 °C (Huang, Reddy, & Xilong, 2021). Comparativamente, el rendimiento del biochar fue de 34.92% a 450 °C y de 26.44% a 550 °C. Las temperaturas de pirólisis más elevadas resultan en un aumento del área superficial y del tamaño de los poros, mayor pH y contenido de carbono, mientras que disminuye la CEC del biochar. Además, la pirólisis a temperaturas más bajas (650 °C). También se ha demostrado que las temperaturas más altas (>400 °C) dan lugar a un biochar adecuado para el tratamiento del suelo y del agua debido a un mayor área superficial y estructura de poros, reiteran que la sorción varía en su mecanismo en función de la temperatura de la pirólisis, sin cambios en la eficacia. Entre otros cambios, el contenido de carbono del biochar está directamente relacionado con la temperatura de la pirólisis e inversamente relacionado con los contenidos de oxígeno, hidrógeno y nitrógeno del biochar. Además, aunque las investigaciones han demostrado que la estabilidad del biochar aumenta con el aumento de la temperatura, la proporción de biochar estable respecto al biochar total no depende de la temperatura. Por tanto, se concluye que la temperatura óptima para la producción de biochar es útil para su rendimiento y aplicación (Huang et al., 2021).

2.5.2 Taza de calentamiento

La tasa de calentamiento influye en la composición de los productos pirolíticos. Tasas de calentamiento más altas provocan fragmentación que incrementa la producción de aceite y gas, mientras que tasas de calentamiento más bajas inducen etapas de pirólisis secundaria y favorecen la producción de carbón vegetal. En la pirólisis rápida, las tasas de calentamiento varían de 10 a 200 °C/min, favoreciendo usualmente los productos líquidos y gaseosos. Por

otro lado, la pirólisis lenta ocurre a una tasa de calentamiento más baja de 0.1–1 °C/min y el tiempo de residencia más largo produce biochar sólido hasta un 70–80% en peso en el rango de temperatura más baja de 300–500 °C. Aumentar las tasas de calentamiento de 30 a 50 °C con un aumento simultáneo de la temperatura de 400 a 500 °C reduce el rendimiento del biochar. Las tasas de calentamiento también afectan la morfología superficial del biochar, similar al efecto de la temperatura. El área superficial y el volumen de los poros disminuyen con el aumento de las tasas de calentamiento debido a la mayor evaporación de materia volátil. De la misma forma, el cambio en la tasa de calentamiento de 10 a 30 °C a una temperatura similar afecta el rendimiento del biochar, aunque tiene menos efecto en la composición del biochar y otras propiedades (Nematian, Keske, & Ng'ombe, 2021).

2.5.3 Configuración del reactor

El reactor es un aspecto fundamental que determina el rendimiento final y la composición de los productos de la pirólisis, ya que puede configurarse de acuerdo a las necesidades del proceso. La tasa de transferencia de calor entre el reactor y las partículas de la materia prima es uno de los factores más decisivos para determinar el rendimiento. Esta transferencia puede ocurrir por convección o conducción. Los reactores de lecho fijo dependen de la conducción para la transferencia de calor, mientras que los reactores de lecho móvil combinan convección y conducción para acelerar la transferencia de calor entre el reactor y las partículas de la materia prima. Estudios adicionales han demostrado que la altura del lecho del reactor también afecta el rendimiento del biochar. Esto se debe a que los lechos más altos permiten tiempos de residencia más largos para los vapores, induciendo así una repolimerización que aumenta el rendimiento del biochar. Por otro lado, los lechos más cortos retrasan el rendimiento del biochar debido a los tiempos de residencia más cortos para los vapores, lo que evita la repolimerización y afecta consecuentemente el rendimiento del biochar.

Se demostró que el rendimiento del biochar disminuyó en un 12% (de 28.48% a 25.04%) cuando la altura del lecho se duplicó (de 5 cm a 10 cm). Sin embargo, incrementos adicionales en la altura del lecho aumentaron el rendimiento del biochar. Los procesos comerciales de pirólisis utilizan técnicas continuas como el pirolizador de tambor (Ronsse, Sven, Dickinson, & Prins, 2013).

2.5.4 Presión

El proceso de pirólisis generalmente se realiza a presión atmosférica, aunque la variación en la presión del reactor durante la pirólisis puede mejorar el rendimiento del biochar. Los estudios han demostrado que el rendimiento del biochar se incrementa cuando la presión del reactor es superior a la presión atmosférica. La producción de materia volátil durante el proceso de pirólisis genera líquido y gas durante la pirólisis rápida. Una alta presión prolonga el tiempo de residencia del proceso, lo que provoca que la materia volátil se combine con el biochar, aumentando así su rendimiento. Además, una mayor presión en el reactor se asocia con una mayor concentración de carbono en el rendimiento del biochar, lo que resulta en una mayor densidad energética del biochar. Otros estudios también encontraron que una mayor presión del reactor se asociaba con una mayor concentración de carbono, mayor estabilidad del biochar y mayor conductividad eléctrica, mejorando así el potencial para la mejora del suelo, la secuestración de carbono, CEC y la producción de energía. Sin embargo, una combinación de alta temperatura y alta presión redujo significativamente el rendimiento del biochar, mientras que aumentó el rendimiento del gas de pirólisis, junto con la mejora del contenido de carbono y CEC del biochar (Nematian et al., 2021).

2.5.5 Tiempo de residencia

El tiempo de residencia es un factor importante que también resulta decisivo para la composición del producto pirolítico. Un tiempo de residencia corto favorece los productos

líquidos y gaseosos, mientras que los tiempos de residencia más largos incrementan el rendimiento del biochar al permitir una mayor posibilidad de repolimerización. Se investigó el biochar procedente de la pirólisis del bagazo de sorgo a 525 °C, concluyendo que el tiempo de residencia se correlacionaba directamente con el rendimiento del biochar y tenía una relación inversa con el rendimiento del bio-aceite. Un aumento de 0.7 segundos en el tiempo de residencia redujo el rendimiento del bio-aceite del 75% al 57%. De manera similar, se realizaron un estudio en carbón marrón-amarillo y biomasa de madera para concluir que los tiempos de residencia más largos producen mayores cantidades de biochar. Adicionalmente, otros estudios han demostrado que los tiempos de residencia también afectan la composición y calidad de los productos de pirólisis. Sin embargo, algunos estudios han mostrado que el tiempo de residencia afecta el rendimiento del biochar debido a un efecto interactivo con la temperatura, lo que dificulta realizar conclusiones directas respecto a su efecto singular en el rendimiento del biochar. También se demostró que una combinación de alta temperatura con tiempos de residencia más largos incrementaba el rendimiento del biochar. En comparación, una combinación de baja temperatura y tiempos de residencia más largos reducía el rendimiento del biochar, indicando así la posibilidad de que la temperatura modere el efecto del tiempo de residencia en el rendimiento del biochar. Esto ha sido corroborado por Nematian et al, quienes demostraron que al incrementar los tiempos de residencia manteniendo temperaturas más bajas de 300 °C disminuía el rendimiento del biochar, mientras que incrementar los tiempos de residencia a temperaturas por encima de 600 °C tenía poco o ningún efecto en el rendimiento del biochar (Yanik, Stahl, Troeger, & Sinag, 2012).

2.6 Situación Actual de los Mercados Aplicables al Proyecto

La producción local de biochar es limitada, lo que ha llevado a la importación de este material, principalmente desde Asia. Si se importa biochar desde Alibaba a un costo de \$500

por tonelada, se deben tomar en cuenta varios factores para determinar el costo total. Además del precio de compra, existen los costos de envío, que varían según la cantidad comprada y la distancia, así como los aranceles de importación y los impuestos locales que Ecuador pueda imponer. Estos costos adicionales pueden aumentar significativamente el costo final del biochar importado, por lo que es importante hacer un análisis detallado antes de realizar la compra. La importación también puede implicar consideraciones ambientales, dado que el transporte de productos a larga distancia puede generar una huella de carbono significativa.

3. DISEÑO DEL PROCESO

El esquema de producción de biochar se fundamenta en la metodología descrita en fuentes bibliográficas relevantes y en el capítulo 2. En este capítulo, se establecerá el procedimiento más apropiado para el despliegue del proyecto. Este enfoque reinterpreta la información original, teniendo en cuenta que el núcleo del tema es la obtención de biochar de alta calidad a partir de cascarilla de arroz.

3.1 Definición de los Criterios de Selección

La definición de los criterios de selección para un proceso de producción de biochar a través de un método de pirolisis se centra en dos variables cruciales: el rendimiento en masa y las propiedades del biochar resultante (Dunnigan, Ashman, Zhang, & Kwong, 2018).

1. **Rendimiento en Masa:** Este criterio se refiere a la eficiencia del proceso de pirolisis, es decir, la cantidad de biochar que se puede obtener a partir de una cantidad determinada de biomasa. Un alto rendimiento en masa indica una conversión eficaz de la biomasa, lo que aumenta la viabilidad económica y ambiental del proceso.
2. **Propiedades del biochar final:** Este criterio evalúa la calidad del biochar producido. Las propiedades del biochar, como su porosidad, su capacidad de retención de agua, su contenido de carbono y su estabilidad química, son factores clave que determinan su utilidad en diversas aplicaciones, como la mejora del suelo, la captura de carbono y la filtración de agua. Por lo tanto, el proceso de producción de biochar más adecuado sería aquel que maximiza tanto el rendimiento en masa como la calidad del producto final.

3.2 Pirolisis Lenta

Dado las variables razones expuestas previamente se optó por el proceso de pirolisis lenta. La pirolisis lenta se realiza a temperaturas más bajas y durante períodos de tiempo más largos en comparación con otros métodos de pirolisis. Esta condición favorece la formación de

biochar con una mayor estabilidad y un mayor contenido de carbono, que son características esenciales para un biochar de alta calidad (Park, Lee, Ryu, & Park, 2014).

1. **Mayor Capacidad de Retención de Agua:** El biochar producido a través de la pirolisis lenta tiende a tener una mayor porosidad, lo que mejora su capacidad para retener agua. Esto es especialmente beneficioso en la remediación de suelos, ya que mejora la disponibilidad de agua para las plantas.
2. **Mejora la Fertilidad del Suelo:** La pirolisis lenta también puede ayudar a conservar nutrientes esenciales en el biochar, como nitrógeno, fósforo y potasio. Esto puede enriquecer el suelo y mejorar su fertilidad, lo cual es clave para la remediación de suelos.
3. **Secuestro de Carbono:** El biochar producido a través de la pirolisis lenta tiene una vida útil más larga en el suelo debido a su alta estabilidad. Esto permite que el biochar sequestrado en el suelo permanezca durante períodos más largos, lo que contribuye a la reducción de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera.

Por lo tanto, aunque el proceso de pirolisis lenta puede ser más lento y consumir más energía en comparación con otros métodos, los beneficios que aporta en términos de calidad del biochar y la remediación de suelos lo convierten en la mejor opción para estas aplicaciones.

3.3 Riesgos del Proceso (Hazop)

Un estudio de peligros y operatividad (HAZOPS) consiste en una revisión estructurada y sistemática de un proceso para identificar y evaluar riesgos para el personal o el equipo. Como parte integral del diseño, se llevó a cabo un HAZOPS por una firma de ingeniería independiente. Los resultados del estudio se utilizaron para modificar el diseño y los procedimientos operativos estándar (SOP) recomendados. No se encontraron peligros con una calificación de riesgo inferior (más grave) a tres. Los peligros se presentan junto con las

modificaciones sugeridas al diseño y los SOP para mitigar estos riesgos (Ronsse, Sven, Dickinson, & Prins, 2013).

4. DISEÑO DE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO

La planificación de la planta de producción para la generación de biochar mediante pirolisis lenta se inspira en la técnica documentada en diversas fuentes académicas. En esta sección, se proporcionará información sobre la capacidad de producción, una exposición exhaustiva del procedimiento incluyendo sus operaciones unitarias, así como los dispositivos requeridos.

4.1 Definición del Caudal de Producción

Se tomó como dato la cantidad de cascarilla de arroz producida en la provincia del Guayas en el año 2020, ya que es la zona de mayor producción del país.

Tabla 2. Cantidad de cascarilla disponible para el proyecto

Producto	Cantidad (Kg)
Arroz	879934000
Cascarilla de arroz (20%)	17598680
Cascarilla de arroz disponible	6159538
Biochar obtenido anualmente	2463815,2

Tabla 2. Cantidad de cascarilla disponible para el proyecto.

4.2 Descripción del Proceso a ser implementado para la producción óptima de biochar

El primer paso en la fabricación de biochar a partir de la cascarilla de arroz se centra en la adquisición de la materia prima. En este caso, la cascarilla de arroz se recoge de las plantaciones de arroz después de la cosecha. Este subproducto del cultivo de arroz se ha seleccionado debido a su abundancia y disponibilidad constante. Después de la recolección, la cascarilla se transporta a la planta de producción donde se someterá a los próximos pasos en el proceso.

El segundo paso implica la trituración de la cascarilla de arroz recolectada. Para ello, se utiliza un triturador que rompe las cascarillas en trozos más pequeños, lo que incrementa su área de superficie y optimiza el rendimiento de la pirólisis. Este tamaño reducido es crucial para mejorar la eficiencia de la siguiente etapa, la pirolisis lenta. En esta fase, la cascarilla de arroz triturada se somete a un proceso de calentamiento lento en un entorno de bajo oxígeno, que da como resultado la producción de biochar, un producto rico en carbono.

El último paso del proceso implica el establecimiento de un sistema de control robusto. Este sistema se encarga de supervisar y regular todas las operaciones unitarias dentro de la planta de producción. Entre sus funciones, controla la temperatura durante la pirólisis, garantiza la seguridad del personal y de la planta, y garantiza que se cumplan las normas medioambientales. Este sistema de control juega un papel crucial en el mantenimiento de la eficiencia del proceso de producción y la calidad del biochar producido (Ronsse et al., 2013).

4.3 Selección y Dimensionamiento de los Equipos

Para la selección y dimensionamiento de los equipos se consideró los principales componentes en una planta de este estilo.

Tabla 3. Especificación de los equipos utilizados.

Equipo	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	Dimensiones [mm]
Sistema de alimentación	500-1000	3.00	2000x1000x1500
Pretratamiento (triturador)	500-1000	40.00	1500x1000x1700 (Salida: 20-50 mm)
Reactor de pirolisis	500-1000	25.00	6600x2800x3300
Sistema de enfriamiento	500-1000	10.00	2000x1500x1500

Sistema de recolección de gas	N/A	7.50	1000x1000x2000
Sistema de purificación de gas	N/A	7.50	1000x1000x2000
Sistema de control	-	3.00	800x600x1000

4.4 Consumo energético

El cálculo de consumo energético expresa que la planta de manufactura necesitará alrededor de 17280,01 kW al mes para funcionar correctamente. Se anticipa que todas las operaciones de las máquinas se alimentarán exclusivamente con electricidad.

Tabla 4. Requerimiento energético.

Periodo	Consumo energético [Kw]
Hora	24,11
Día	576,85
Mes	17280,01

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Esta parte se centra en describir los aspectos de los costos asociados con la planta, entre los que se incluyen: inversión inicial, gastos de producción y capital operativo, así como las fuentes de ingresos. Una vez que se ha estimado el costo de la planta, se establece el flujo monetario del proyecto y, con base en esto, se evalúa la rentabilidad de la planta y el periodo de amortización. Seguidamente, se contemplarán varios escenarios posibles y cómo podrían influir en la rentabilidad del proyecto. La evaluación de costos se fundamenta en el costo de los equipos teóricos, tal como se expone en el libro "Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design" de Sinnott y Towler, y en el costo identificado a través de cotizaciones disponibles en catálogos en línea (Sinnott & Towler, 2012).

5.1 Estimación de la Planta de Producción

Para optimizar los resultados, se emplearon tres diferentes enfoques. El método de Lang se aplica para estimar el costo ISBL de una planta basándose en el valor total de los equipos adquiridos. En contraste, el método de Hand se enfoca en factores específicos para distintos tipos de equipo, aunque no para el proceso en sí. El factor detallado, por otro lado, considera distintos costos asociados con el equipo en relación al costo total del mismo, multiplicado por un factor. Este último se basa también en el método de Lang (Sinnott & Towler, 2012).

Tabla 5. Estimación de costos.

Método de Estimación	Costo Estimado (USD)
Método de Lang	\$ 200.000,00
Método de Hand	\$ 375.000,00
Método Factorial Detallado	\$ 412.000,50

Promedio	\$	329,17
----------	----	--------

5.2 Inversión de Capital Fijo

Con el valor obtenido de la sección 5.1 determinamos el costo ISBL y con las respectivas reglas determinamos lo siguiente:

Tabla 6. Inversión de capital fijo.

Inversión de capital fijo		
Costo ISBL	\$	329.000,17
Costo OSBL	\$	82.250,04
Costo ingeniería	\$	61.687,53
Gastos imprevistos	\$	41.125,02
Total	\$	514.062,76

5.3 Estimación de Costos de Capital Fijo, Capital de Trabajo y Costos de Producción

La base para el cálculo del capital fijo, detallado en las secciones previas, se refiere a la planta física. Dicho capital fijo abarca los costos ISBL, los Outside Battery Limits (OSBL), los costos de ingeniería y los gastos imprevistos. Los OSBL se refieren a los gastos que pueden surgir debido a cambios en la construcción, mientras que los costos de ingeniería están relacionados con el diseño del proceso y la construcción. Los gastos imprevistos incluyen cualquier modificación o variación en el alcance del proceso.

En cuanto al capital de trabajo, se consideran los costos de las materias primas y los gastos de producción necesarios para el inicio de la operación de la planta de procesamiento. Estos costos de producción se dividen en costos de producción fijos (COPF) y costos de producción variables (COPV). Los COPF, que incluyen gastos asociados con las operaciones

de la planta, son independientes de la eficiencia y producción. Por otro lado, los COPV están vinculados con la producción y su eficiencia. Un resumen de los costos mencionados se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de costos.

Concepto	Estimación	Unidades
Inversión de Capital		
Fijo	\$ 411.250,21	USD
Capital de Trabajo	\$ 61.687,53	USD
Costos Variables de		
Producción	\$ 123.375,06	USD/mes
Costos Fijos de		
Producción	\$ 3.084,38	USD/mes

5.4 Estimación de Ingresos

La generación de ingresos del proyecto puede ser proyectada a partir de la producción de los productos y su respectivo precio de venta.

Tabla 8. Estimación de ingresos.

Concepto	Estimación (USD)	Unidades
Margen Bruto		
de Producción	\$ 14.624,94	USD/mes
Costo Efectivo		
de Producción	\$ 126.459,44	USD/mes
Beneficio Bruto	\$ 11.540,56	USD/mes
Beneficio Neto	\$ 6.924,34	USD/mes

5.5 Análisis de Tiempo de la Recuperación Inicial

El análisis de recuperación requiere la determinación del periodo de años necesarios para recuperar la inversión inicial total y el beneficio neto. Establecer el periodo de recuperación ayuda a evaluar si la implementación del proyecto será rentable a corto, medio o largo plazo. Además, este análisis también implica la identificación de indicadores como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

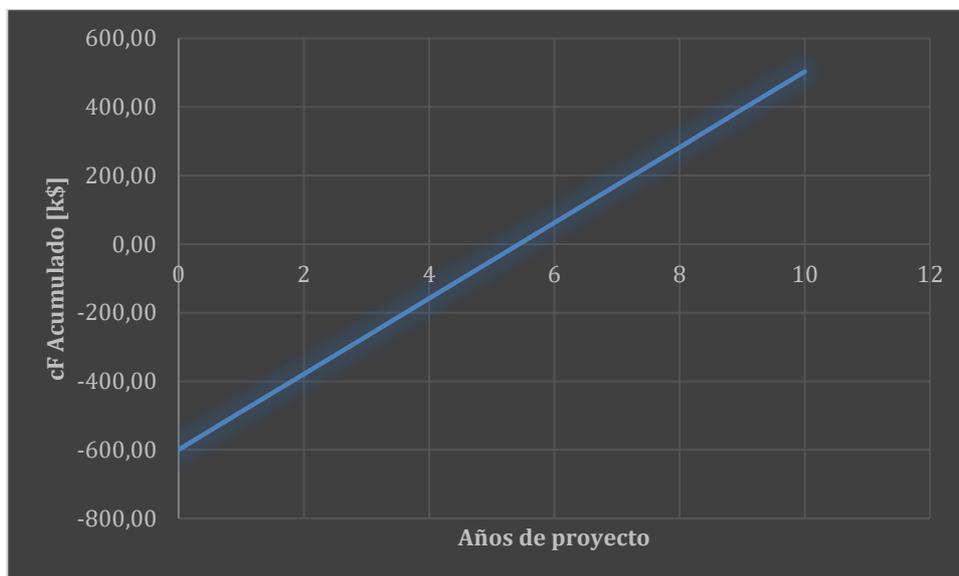


Gráfico 1. Tiempo de recuperación de la inversión inicial.

Tabla 9. VAN y TIR

Indicadores económicos	
VAN	72,26
TIR	13

Los resultados observados en el gráfico 1 y en la tabla 9 nos indican que proyecto es rentable. Al tener un tiempo de recuperación de 4,5 años se espera obtener un valor positivo en el valor actual neto y una tasa interna de retorno de 10 a 20 años.

5.6 Análisis de Tiempo de Recuperación Inicial – Menor Tasa de Impuestos

En el primer escenario, caso más real, se tomó una tasa de interés del 25%, valor considerado normal en el Ecuador. Sin embargo, como se mencionó anteriormente se espera que la conciencia medioambiental genere leyes para ayudar a promover este tipo de proyectos. Por lo que se hizo el mismo análisis económico como si la tasa de interes fuera del 12,5%.

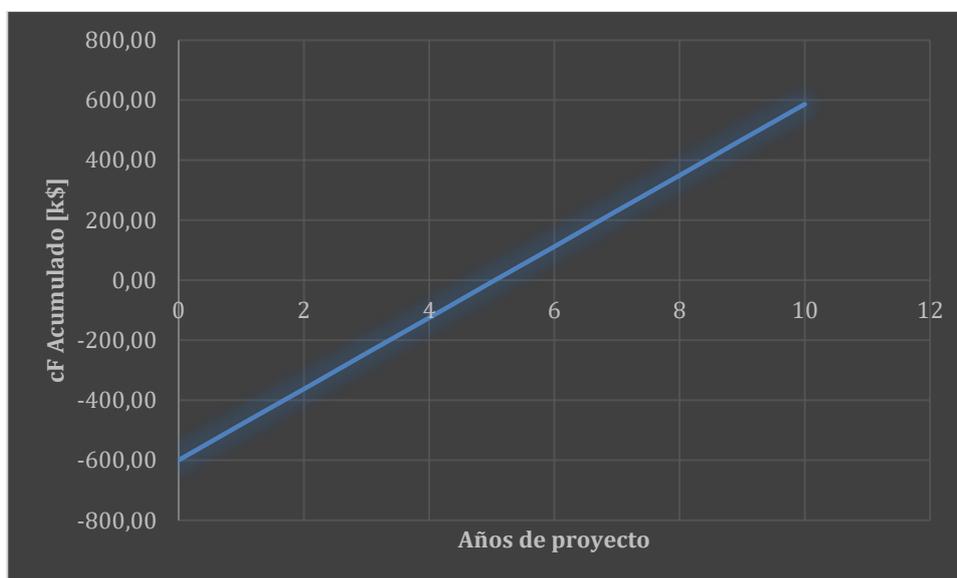


Gráfico 2. Tiempo de recuperación de la inversión inicial – Tasa de interés 12,5%

Tabla 10. VAN y TIR caso 2.

Indicadores económicos	
VAN	123,26
TIR	15

En este caso se recuperó la inversión a los 4 años, puesto que los intereses para llevar a cabo el proyecto no son tan elevados.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de que hay diversas fuentes de biomasa con rendimientos y características potencialmente superiores, la disponibilidad de estas es un factor crucial. La producción de arroz, tanto en Ecuador como a nivel global, es extremadamente alta. Esto incrementa el interés en estudios relacionados con la cascarilla de arroz como una fuente abundante de biomasa, atractiva para la producción de biochar (Güenal et al., 2019).

Para maximizar la eficiencia en costos y la calidad del biochar producido, se ha seleccionado un proceso de pirólisis lenta. Este método se basa en ciertas condiciones esenciales: mantenimiento de una temperatura de 500°C, una tasa de calentamiento de 10°C min⁻¹, un prolongado tiempo de residencia de alrededor de 4 horas, y operación bajo presión atmosférica. Cabe destacar que se utiliza cáscara de arroz con un tamaño de partícula que no excede los 2mm.

Aunque el uso de biochar tiene importantes beneficios para la mejora de la calidad del suelo, el biochar producido a partir de cascarilla de arroz no tiene las características requeridas para sustituir completamente a los fertilizantes convencionales. En su lugar, se recomienda un enfoque que combine el uso de fertilizantes y biochar. No obstante, existen variantes de biochar que sí podrían reemplazar a los fertilizantes tradicionales en su totalidad (Güenal et al., 2019).

Los indicadores económicos del proyecto son prometedores: el Valor Actual Neto (VAN) es de 72.76 y la Tasa Interna de Retorno (TIR) se encuentra en el 13%. Esto sugiere que el proyecto es viable desde el punto de vista económico. Se prevé que la inversión inicial se recupere en un periodo de 4.5 años. Además, en un escenario donde se contemple la posibilidad de recibir asistencia estatal, el periodo de retorno se podría reducir a 4 años, lo que haría al proyecto aún más atractivo desde la perspectiva financiera.

Como propuesta para futuras investigaciones, se sugiere explorar la posibilidad de realizar pretratamientos químicos antes del inicio del proceso de pirólisis. Aunque se ha observado que estos pretratamientos pueden mejorar la calidad del biochar producido, también es cierto que podrían incrementar los costos de producción y, por ende, modificar la viabilidad económica del proceso (Cueva Z. et al., 2022).

7. REFERENCIAS

- Ahmad, N., Nurul Nabila, H. B., & Talib, N. (2019). Slow Pyrolysis Temperature and Duration Effects on Fuel Properties of Food Rice Waste Bio-Char. *Key Engineering Materials*, 797, 319-326. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.797.319>
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715.
- Azzi, E. S., Karlun, E., & Sundberg, C. (2019). Prospective life cycle assessment of large-scale biochar production and use for negative emissions in Stockholm. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 8466-8476.
- Cueva Z., L. L., Griffin, G. J., Ward, L. P., Madapusi, S., Shah, K. V., & Parthasarathy, R. (2022). A study of chemical pre-treatment and pyrolysis operating conditions to enhance biochar production from rice straw. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 163, N.PAG. [https://doi-org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.jaap.2022.105455](https://doi.org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.jaap.2022.105455)
- Das SK, Ghosh GK, Ravikant A. Application of biochar in agriculture and environment, and its safety issues. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023;13(2):1359-1369. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/application-biochar-agriculture-environment/docview/2765092199/se-2>. doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01013-4>.
- Dineshkumar, M., Shrikar, B., & Ramanathan, A. (2019, September). Development of computer aided modelling and optimization of microwave pyrolysis of biomass by

using aspen plus. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 312, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.

- Diptiprakash, S., & Neelancherry, R. (2022). Influence of operating parameters on the microwave pyrolysis of rice husk: biochar yield, energy yield, and property of biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(8), 3447-3456. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00914-8>
- Dunnigan, L., Ashman, P. J., Zhang, X. y Kwong, C. W. (2018). Producción de biocarbón a partir de cáscara de arroz: Emisiones de partículas de la combustión de volátiles de pirólisis sin procesar. *Revista de producción más limpia*, 172, 1639–1645. <https://doi-org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.jclepro.2016.11.107>
- Ghulam, M., Ahmed, Z., & Muhammad, U. (2022). Feedstock type, pyrolysis temperature and acid modification effects on physiochemical attributes of biochar and soil quality. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(3)<https://doi.org/10.1007/s12517-022-09539-9>
- Günel, H., Bayram, Ö., Günel, E., & Erdem, H. (2019). Characterization of soil amendment potential of 18 different biochar types produced by slow pyrolysis. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8(4), 329-339. <https://doi.org/10.18393/ejss.599760>
- Huang H, Reddy NG, Xilong H, et al. Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil. *Scientific Reports* (Nature Publisher Group). 2021;11(1). <https://www.proquest.com/scholarly-journals/effects-pyrolysis-temperature-feedstock-type/docview/2507805821/se-2>. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86701-5>.
- Huang, H., Yang, T., Lai, F., & Wu, G. (2017). Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 125, 61–68. <https://doi-org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.jaap.2017.04.018>

- Kumar, A., Saini, K., & Bhaskar, T. (2020). Hydrochar and biochar: production, physicochemical properties and techno-economic analysis. *Bioresource technology*, 310, 123442.
- Llorach-Massana, P., Lopez-Capel, E., Peña, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Puy, N. (2017). Technical feasibility and carbon footprint of biochar co-production with tomato plant residue. *Waste Management*, 67, 121-130.
- Lobzenko, I., Burachevskaya, M., Zamulina, I., Barakhov, A., Bauer, T., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Minkina, T., Tereschenko, A., Kalinichenko, V., Khroniuk, O., & Rajput, V. D. (2022). Development of a Unique Technology for the Pyrolysis of Rice Husk Biochar for Promising Heavy Metal Remediation. *Agriculture*, 12(10), 1689. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101689>
- Nematian, M., Keske, C., & Ng'ombe, J. N. (2021). A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. *Waste Management*, 135, 467-477.
- Park, J., Lee, Y., Ryu, C., & Park, Y. K. (2014). Slow pyrolysis of rice straw: analysis of products properties, carbon and energy yields. *Bioresource technology*, 155, 63-70.
- Ronsse F, Sven vH, Dickinson D, Prins W. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology.Bioenergy*. 2013;5(2):104-115. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/production-characterization-slow-pyrolysis/docview/2290063364/se-2>. doi: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12018>.
- Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S., & Yanik, J. (2016). Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 200-206.

Woolf, D., Lehmann, J., Joseph, S., Campbell, C., Christo, F. C., & Angenent, L. T. (2017).

An open-source biomass pyrolysis reactor. *Biofuels, Bioproducts and*

Biorefining, 11(6), 945-954.

Zhang, Q., Zhang, D., Lu, W., Khan, M. U., Xu, H., Yi, W., Lei, H., Huo, E., Qian, M., Zhao,

Y., & Zou, R. (2020). Production of high-density polyethylene biocomposites from

rice husk biochar: Effects of varying pyrolysis temperature. *The Science of the Total*

Environment, 738, 139910. <https://doi->

[org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.scitotenv.2020.139910](https://doi-org.ezbiblio.usfq.edu.ec/10.1016/j.scitotenv.2020.139910)

ANEXOS

Anexo A: Introducción

1.2

**Superficie, producción y rendimiento del arroz, por provincia
Año 2020**

Año	Provincia	Superficie Cosechada (ha)	Producción (Tm.)	Rendimiento (Tm/ha)	Porcentaje Nacional
2020	Guayas	203,470	879,934	4.3	66%
	Los Ríos	76,272	305,994	4.0	23%
	Loja	14,455	78,059	5.4	6%
	El Oro	9,884	38,800	3.9	3%
	Manabí	5,969	23,543	3.9	2%
	Resto del país	2,827	10,173	3.6	1%
	Total		312,876	1,336,502	4.3

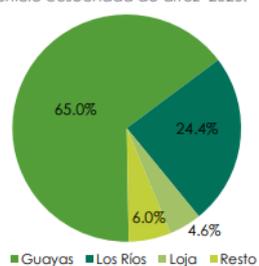
**Participación (%) del # empresas dedicadas
al cultivo de arroz**



Anexo B: Bases del diseño

2.2

Figura 9. Porcentaje de participación en la superficie cosechada de arroz 2020.



2.2.1
(Tanquilla, 2018)

Tabla 2-2: Composición Química de la Cascarilla de arroz y de las cenizas de la cascarilla de arroz

CASCARILLA DE ARROZ		CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	
Componente	%	Componente	%
Carbono	39,10	Ceniza de sílice(SiO ₂)	94,5
Hidrógeno	5,2	Oxido de Calcio(CaO)	0,25
Nitrógeno	0,6	Oxido de Magnesio(MgO)	0,23
Oxígeno	37,2	Oxido de Potasio(K ₂ O)	1,10
Azufre	0,1	Oxido de Sodio(Na ₂ O)	0,78
Cenizas	17,8	Sulfato	0,56
		Cloro	0,05
		Oxido de Titanio(TiO ₂)	0,05
		Oxido de Aluminio(Al ₂ O ₃)	0,12
		Otros componentes(P ₂ O ₅ F ₂ O ₃)	1,82
Total	100,0	Total	100,0

Realizado por: Tanguila Edith, 2018

Fuente: Prada, 2010

2.4

Table 2

A summary of reactor types.

Reactor type	Working mechanism	Advantages	Challenges	References
<i>Batch Reactor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Sealed system; there is no outflow or inflow of products or reactants. - Reactants are placed in reactor for the desired duration. 	<ul style="list-style-type: none"> - Very simple build-up and operation - Good for lab-scale biochar production. - Preferable for char production. - Only raw material is present in the reactor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Product variability from one batch to another. - Difficulties related to using batch reactors in large scale pyrolysis production. 	[76,77]
<i>Semi-Batch Reactor</i>	The reactant addition and product extraction is possible simultaneously.	<ul style="list-style-type: none"> - Advantage of reaction selectivity and product variability. - Semi-batch reactors are suited to the production of high yields of oil. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sintering of catalyst through coke deposition. - Low production rate due to un-uniform heat and mass transfer. 	[78-80]
<i>Fixed Bed Reactors</i>	The catalyst is packed in a static bed in pelletized form.	<ul style="list-style-type: none"> - Low cost, simple build up and operation. - Lengthy residence time for higher carbon conversion rate - High yield of char and low ash carryover. 	<ul style="list-style-type: none"> - Upscaling and heat and mass transfer issue - Tar removal and cleaning problem - Low yield of liquid and gas products. 	[75, 81-83]
<i>Fluidized Bed Reactors</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Feed and bed material are mixed through the fluidization - Velocity of fluidized medium is used to mix them. - Continues operation 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexible reaction processes and work at higher temperature - Uniform heat and mass transfer - Controlling of the vapour holding time. - Easy in scaling up for biochar production 	<ul style="list-style-type: none"> - Emission of pollutants - High capital cost and pre-treatment cost - Pipes corrosions and blockage of feeding system. 	[75,84,85]
<i>Bubbling Fluidized Bed Reactor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Air distribution grid at the bottom to fluidised the feed particles and inert material. - Fluidization velocity used. 	<ul style="list-style-type: none"> - Very efficient at heat transfer - Ease of construction and operation - Excellent storage capacity - Pilot plant operation up to 60 kg/h. - To handle large quantities of feed - Energy efficient for circulating fluidizing agent and material 	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidation spots formation due to oxygen diffusion. - High capital cost 	[86,87]
<i>Circulating Fluidized Bed Reactors</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Similar operation like bubbling fluidized with the recycling of fluidized agent/gas 		<ul style="list-style-type: none"> - Costly for low scale operation 	[86,88]

Ablative Reactors	<ul style="list-style-type: none"> - Heat is transferred to feed particles through direct contact of dis, cone or liquid. - Fast decomposition of organic matter makes flash pyrolysis 	<ul style="list-style-type: none"> - Good heat transfer and low energy are needed. - Does not require fluidising gases. - Lenient to size of the organic particles, thereby saving additional costs. - Does not require any carrier gas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sophisticated and compels set up - Scaling is not easy. 	[75,77,89]
Vacuum Pyrolysis Reactors	<ul style="list-style-type: none"> - Feed is fed through a conveyor belt and stirred mechanically. 	<ul style="list-style-type: none"> - Able to handle a wide range of particle sizes, shapes and densities. - Lower attrition rate and bed segregation 	<ul style="list-style-type: none"> - Unable to handle larger particles - Complicated design and maintenance - Need special input apparatus 	[41,90]
Conical Spouted Bed reactors	<ul style="list-style-type: none"> - An alternative of fluidized bed reactor and useful flash pyrolysis and continuous feed. 	<ul style="list-style-type: none"> - High yields of pyrolysis oil. - Economical at large-scale. - Short residence time and low tar - Compact and low-cost setup maintenance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Challenges such as the feeding of catalysts and entrainment. - Product collection like liquid and solid. 	[76,91,92]
Rotating Cone Reactors	<ul style="list-style-type: none"> - Centrifugal forces use to mix the sand and feed move upward. Feed enter from the bottom 	<ul style="list-style-type: none"> - Fast reaction and fast reactions and low tar formation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Complex design. 	[93-95]
PyRos Reactor	<ul style="list-style-type: none"> - The combination of cyclonic reactor and spouted reactor the mixture in a downward direction. 	<ul style="list-style-type: none"> - Low by-product formation effective heat transfer and chemical recovery. - Good for co-pyrolysis for oil and gas production 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficult to separate the products. 	[47,93]
Plasma reactor	<ul style="list-style-type: none"> - Feed stock is placed in the cylindrical tube that is fitted with two copper electrodes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy-intensive and High operating cost 		[96,97]
Microwave reactor	<ul style="list-style-type: none"> - Facilitate energy transfer via atomic or molecular interaction using a microwave. 	<ul style="list-style-type: none"> - Scaling up and continuing operational issue - Waste particle size control and poor mixing - High dependence on waste dielectric properties. 		[93,98]
Solar Reactors	<ul style="list-style-type: none"> - Solar reactors are composed of opaque quartz tubes and the outer walls are used to highly 4 concentrate solar radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Low cost heating process - Fast start-up and shut down time for the pyrolysis process 	<ul style="list-style-type: none"> - The need for a proper solar design to generate solar energy is still needed to be investigated. 	[99,100]

2.4

The screenshot shows the Alibaba.com product page for 'biochar Organic Fertilizer'. The main image shows a pile of dark, granular fertilizer. To the right, the product title is 'biochar Organic Fertilizer' with a 'NEW' badge. Below the title, it says 'No. 19 Most popular in Organic Fertilizer' and 'FOB Reference Price: Get latest price'. A price table shows: 1 - 9 tons at \$500.00 and >= 10 tons at \$220.00. There are buttons for 'Quantity' (set to 1 tons), 'Samples' (\$700.00/ton), and 'Lead time' (7, 10, 15, or to be negotiated days). A 'Customization' section lists options like 'Customized logo' and 'Customized packaging'. The page also features navigation menus, a search bar, and a sidebar with 'Zh Ma Res 56 29 70'.

Anexo C: Diseño de la planta de procesamiento

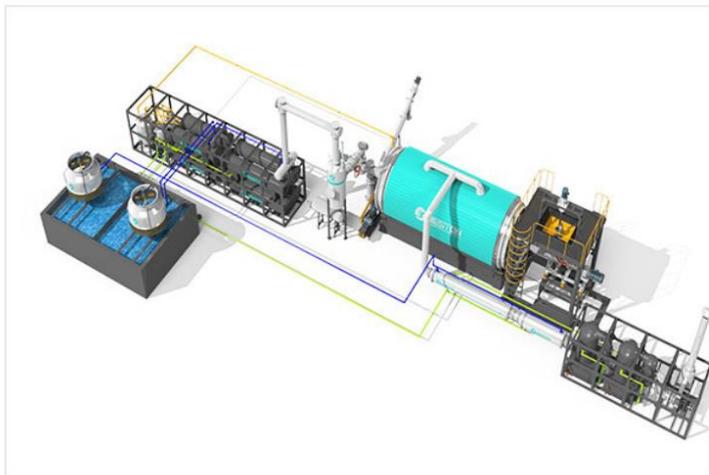
4.1

N° de Etapa	Proceso/Etapa	Cascarilla de Arroz Entrante [kg]	Cascarilla de Arroz Saliente [kg]	Biochar Producción [kg]
1	Recepción de la Cascarilla de Arroz	6159538	-	-
2	Alimentación del Sistema	6159538	6150000	-
3	Pretratamiento (tritador)	6150000	5535000	-

4	Pirolisis (Reactor de Pirolisis)	5535000	3321000	2214000
5	Enfriamiento (Sistema de Enfriamiento)	3321000	3321000	2214000
6	Recolección de Gas	-	-	-
7	Purificación de Gas	-	-	-
8	Control del Sistema	-	-	-
9	Producción de Biochar	-	-	2463815,2

4.3 y 4.4

Se tomó como referencia la planta de pirólisis BLJ-16 Semi-Continues Pyrolysis plant del proveedor Beston.



BLJ-16 Semi-Continuous Pyrolysis Plant



Capacity: 12~16 tone/day
 Working Method: batch
 Feature: best-selling model
 Weight: 60 tonnes
 Reactor Size: D2.8m*L7.1m
 Total Power: 54kw/h
 Installation Area Request(L*W*H): 40m*10m*8m



[Request for Quotation](#)

Detailed Parameters of Beston Pyrolysis Plant

Model	BLJ-3	BLJ-6	BLJ-10	BLL-16	BLL-30
Capacity	1-3t/d	4-6t/d	8-10t/d	12-16t/d	30-35t/d
Working Process	Batch	Batch	Batch	Semi-continuous	Fully continuous
Reactor Size	φ1400*4900mm	φ2200*6000mm	φ2600*6600mm	φ2800*7100mm	φ1800*18500mm
Reactor Material	Q245R	Q245R	Q245R	Q245R	310S stainless steel
Drive System	350 reducer+4kw drive motor	400 reducer+5.5kw drive motor	400 reducer+5.5kw drive motor	500 reducer+7.5kw drive motor	ZQH650-50 reducer+15kw frequency conversion motor
Land (L*W*H)	18m*4.2m*6m	30m*12m*8m	30m*13m*8m	33m*13m*8m	70m*20m*10m
Power	16.65kw	37.85kw	44.3kw	55.6kw	256kw
Burner	2*200,000 kcal	2*300,000 kcal	2*300,000 kcal	2*400,000 kcal	2.5 million kcal per set
Total Weight of Shipped Materials	About 18t	About 24.5t	About 28t	About 34.5t	About 150t
Number of Containers	1*40HQ	1*40FR+1*40HQ+1*20 GP	1*40FR+2*40HQ	1*40FR+2*40HQ	25m*8m bulk cargo+8*40HQ
Noise (dB)	≤60	≤60	≤60	≤60	≤60
Heating Materials	Fuel oil (including tyre/plastic pyrolysis oil), natural gas, LPG, diesel, etc.				
Condensing System	Vertical Condenser	φ426*3000 Single piece condensing area 7.58m ²	φ630*3600 Single piece condensing area 17.8m ²	φ630*3600 Single piece condensing area 17.8m ²	φ820*3600 Single piece condensing area 35.6m ²
	3-in-1 Condenser	3000*2200*2250 Condensing area 17.51m ²	5800*2260*2500 Condensing area 35.85m ²	5800*2260*2500 Condensing area 35.85m ²	8000*2260*2500 Condensing area 49.5m ²
		φ920*3200 2 sets of vertical condenser			

Analysis of BLJ-16 Pyrolysis Plant to Process Waste Tyre					
Item	Tyre	13MT/Day	\$46/MT		
Fuel	Pyrolysis oil	150kg/Day	\$0/kg		
Electricity	54KWH	18Hour	\$0.14/KWH	Daily consume 972kwh	
Labor	6 person	1 day	\$15/person/day		
Pyrolysis oil	45% oil yield	5.85MT	\$410/ton		
Carbon black	30% yield	3.9MT	\$50/ton		
Steel wire	15% yield	1.95MT	\$150/Ton		
Daily Input					
Items	Unit	Consumption	Unit price	Total	Remark
Tyre	Ton	13	\$46.00	\$598.00	
Pyrolysis oil	KG	150	\$0.00	\$0.00	
Electricity	KWH	972	\$0.14	\$136.08	
Labor	Person	6	\$15.00	\$90.00	
Total				\$824.08	
Daily Output					
Items	Unit	Quantity	Unit price	Total	Remark
Pyrolysis oil	Ton	5.85	\$410.00	\$2,398.50	
Carbon black	Ton	3.9	\$50.00	\$195.00	
Steel wire	Ton	1.95	\$150.00	\$292.50	
Total				\$2,886.00	
Daily Profits					
Output – Input	\$2,061.92				
Month Profits (25 working days)		\$51,548.00			
Annual (10 Months)		\$515,480.00			

Anexo D: Análisis económico

5.5

Año	Beneficio bruto [k\$]	Cargas de depreciación Di [k\$]	Ingresos gravables [k\$]	Impuestos pagados [k\$]	Flujo de caja [k\$]	Flujo caja acumulativo [k\$]	Factor de descuento $(1+i)^{-n}$	Valor actual del CF [k\$]
0	0	0	0	0	-599,40	-599,40	1	-599,40
1	127	59,94	67,06	0	110,23	-489,16	0,907	99,98
2	127	59,94	67,06	16,77	110,23	-378,93	0,823	90,72
3	127	59,94	67,06	16,77	110,23	-268,69	0,747	82,35
4	127	59,94	67,06	16,77	110,23	-158,46	0,678	74,74
5	127	59,94	67,06	16,77	110,23	-48,22	0,616	67,90
6	127	59,94	67,06	16,77	110,23	62,01	0,559	61,62
7	127	59,94	67,06	16,77	110,23	172,25	0,507	55,89
8	127	59,94	67,06	16,77	110,23	282,48	0,46	50,71

9	127	59,94	67,06	16,77	110,23	392,72	0,417	45,97
10	127	59,94	67,06	16,77	110,23	502,95	0,379	41,78

VAN 72,26
TIR 13%

5.6

Año	Beneficio bruto [k\$]	Cargas de depreciación Di [k\$]	Ingresos gravables [k\$]	Impuestos pagados [k\$]	Flujo de caja [k\$]	Flujo caja acumulativo [k\$]	Factor de descuento $(1+i)^{-n}$	Valor actual del CF [k\$]
0	0	0	0	0	-599,40	-599,40	1	-599,40
1	127	59,94	67,06	0	118,62	-480,78	0,907	107,59
2	127	59,94	67,06	8,38	118,62	-362,16	0,823	97,62
3	127	59,94	67,06	8,38	118,62	-243,54	0,747	88,61
4	127	59,94	67,06	8,38	118,62	-124,93	0,678	80,42
5	127	59,94	67,06	8,38	118,62	-6,31	0,616	73,07
6	127	59,94	67,06	8,38	118,62	112,31	0,559	66,31
7	127	59,94	67,06	8,38	118,62	230,93	0,507	60,14
8	127	59,94	67,06	8,38	118,62	349,54	0,46	54,56
9	127	59,94	67,06	8,38	118,62	468,16	0,417	49,46
10	127	59,94	67,06	8,38	118,62	586,78	0,379	44,96

123,3

VAN 4
TIR 15%

Anexo E: Conclusiones y recomendaciones

Características principales de biochar producidas por distintas biomásas residuales.

Table 2. Physical and chemical properties of biochar types produced from woody materials

	Yield, (wg),%	SSA, m ² g ⁻¹	FC, %	WP, %	AW, %	pH	EC, dSm ⁻¹	CEC, cmol kg ⁻¹
Rice Husk	37.83	211.8	63.3	61.9	1.4	10.20	3.29	15.2
Corn cob	27.12	397.5	119.9	107.9	12.1	9.20	9.30	10.0
Wheat Straw	31.18	214.8	167.5	161.9	5.6	10.90	2.60	39.4
	C, %	N, %	C:N	P in Row, g kg ⁻¹	P in Bioc., g kg ⁻¹	K in Row, g kg ⁻¹	K in Bioc., g kg ⁻¹	
Rice Husk	61.7	0.45	136.7	0.32	0.05	4.29	3.89	
Corn cob	88.3	0.29	306.9	0.40	0.39	6.78	9.53	
Wheat Straw	71.7	0.91	78.7	0.57	1.30	14.14	27.59	

EC: Electrical Conductivity, CEC: Cation Exchange Capacity, SA: Specific Surface Area, FC: Field Capacity, WP: Wilting Point, AW: Available Water Content; C: Total Carbon, N: Total Nitrogen, P: Phosphorus, K: Potassium

Table 4. Some of physical and chemical properties of biochar types produced from animal manure

	Yield, (wg),%	SSA, m ² g ⁻¹	FC, %	WP, %	AW, %	pH	EC, dSm ⁻¹	CEC, cmol kg ⁻¹
Sheep Manure	36.80	161.3	58.1	57.7	1.5	11.82	15.37	36.0
Poultry Litter	31.83	192.9	78.7	56.1	22.6	11.60	5.00	58.0
Dairy Manure	62.99	163.7	32.8	29.7	3.1	10.57	4.01	40.0
	C, %	N, %	C:N	P in Row, g kg ⁻¹	P in Bioc., g kg ⁻¹	K in Row, g kg ⁻¹	K in Bioc., g kg ⁻¹	
Sheep Manure	58.9	0.74	79.4	1.76	3.98	7.44	9.94	
Poultry Litter	58.8	0.88	66.6	8.44	25.6	25.90	44.46	
Dairy Manure	35.9	0.79	45.2	4.38	13.48	10.35	9.98	

EC: Electrical Conductivity, CEC: Cation Exchange Capacity, SA: Specific Surface Area, FC: Field Capacity, WP: Wilting Point, AW: Available Water Content; C: Total Carbon, N: Total Nitrogen, P: Phosphorus, K: Potassium