

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



ESTABILIDAD DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE ARROZ (*Oryza sativa*)
MEDIANTE EL TEST DE ACTIVIDAD RESPIRATORIA (AT4)

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

LUIS CARLOS PONCE CABANILLAS

Tingo María – Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°033-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 24 de febrero de 2026, a horas 09:30 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“ESTABILIDAD DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE ARROZ (*Oryza sativa*)
MEDIANTE EL TEST DE ACTIVIDAD RESPIRATORIA (AT4)”**

Presentado por el Bachiller: **PONCE CABANILLAS, LUIS CARLOS** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 20 de marzo de 2026

Mcbigo. MSc. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ ROMERO
PRESIDENTE

Ing. MSc. ABBY S. DA CRUZ RODRIGUEZ
MIEMBRO



Ing. MSc. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO

Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
ASESOR

Dra. ANGIE TATYANA FERNANDEZ ESCOBAR
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 153 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
ESTABILIDAD DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE ARROZ (<i>Oryza sativa</i>) MEDIANTE EL TEST DE ACTIVIDAD RESPIRATORIA (AT4)	LUIS CARLOS PONCE CABANILLAS	14 % Catorce	Menor a 20 %

Tingo María, 21 de mayo de 2026.


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**ESTABILIDAD DEL BIOCHAR DE CASCARILLA DE ARROZ (*Oryza sativa*)
MEDIANTE EL TEST DE ACTIVIDAD RESPIRATORIA (AT4)**

Universidad : Universidad Nacional Agraria de la Selva

Facultad : Facultad de Recursos Naturales Renovables

Escuela Profesional : Ingeniería Ambiental

Título de proyecto de tesis : Estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratorio (AT4)

Autor : Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas

Asesor : Ing. M. Sc. Franklin Dionisio Montalvo
Ing. M.Sc. Angie Tatyana Fernández Escobar

Objetivo general : Evaluar la estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratoria (AT4)

Grupo de investigación : Gestión Ambiental

Línea de investigación : Gestión de Residuos Sólidos

Eje temático de investigación : Sistema de Gestión

Lugar de ejecución : Planta de Valorización de RSO – Tocache.

Duración del Trabajo : Fecha de inicio: 03/03/2025 Fecha de Término: 30/10/2025

Financiamiento : Propio (X) FEDU () Externo ()

Presupuesto : 5,117.00 Soles

Tingo María – Perú

2025

DEDICATORIA

A Dios, por darme vida, salud y fuerzas para seguir cada día aprendiendo, y permitirme formar parte de este grupo de profesionales que luchan por un mañana mejor.

A mi querido padre LUIS PONCE SAAVEDRA, por ser mi soporte y apoyo incondicional durante mi formación profesional y enseñarme que la mejor herencia a los hijos es el estudio.

A mi prometida JENIFFER VANESSA FASANANDO PRINCIPE, por demostrarme que la perseverancia y la disciplina ayudan a lograr tus objetivos y que uno mismo pone sus límites.

A las personas que en mi vida cumplieron el papel de una madre y ahora están en el cielo, Eduarda y Danni gracias por ser parte de mi formación en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos y sobrinos, por la motivación constante y el apoyo mutuo.

AGRADECIMIENTO

Para la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Recursos Naturales Renovables y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por darme la oportunidad de formar parte de los profesionales del cambio, y haberme brindado todas las facilidades para el desarrollo de mi formación académica.

Para los docentes de mi ahora alma mater en especial a los de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, quienes me demostraron que el aprendizaje es constante y que solo depende del empeño que le pongas.

Para mis asesores Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo e Ing. MSc. Angie Tatyana Fernández Escobar por sus enseñanzas y dedicar su tiempo con empeño al desarrollo de mi tesis, demostrando a cada momento su profesionalismo.

Para los miembros integrantes del jurado de tesis MSc. Luis Alberto Sánchez Romero; Ing. MSc. Abby Solange; Ing. MSc. Sandra Lorena por haber contribuido con sus conocimientos en cada una de las observaciones y correcciones desarrolladas durante la etapa de desarrollo de la presente tesis.

Para la Municipalidad Provincial de Tocache por haberme permitido emplear parte de las instalaciones de la planta de valorización de residuos sólidos orgánicos para el desarrollo de mi trabajo.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo General.....	3
1.2. Objetivos Específicos.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Antecedentes de la investigación	4
2.1.1. Internacionales	4
2.1.2. Nacional	5
2.1.3. Local	6
2.2. Marco teórico.....	7
2.2.1. Aprovechamiento de residuos sólidos.....	7
2.2.2. Pirólisis.....	7
2.2.3. Fuentes de materia prima para el pirólisis.....	7
2.2.4. Productos del pirólisis de residuos.....	8
2.2.5. Biochar	9
2.2.6. El potencial del Biochar	9
2.2.7. Importancia del biochar en la agricultura.....	10
2.2.8. Inconvenientes del biochar	11
2.2.9. Historia del biocarbón.....	11
2.2.10. Parámetros físicos y químicos del biochar	12
2.2.11. Caracterización del biochar	13
III. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1 Lugar de ejecución	15
3.1.1 Ubicación.....	15
3.1.2 Aspectos climáticos.....	16

3.2	Materiales y equipos.....	ÍNDICE	17
3.2.1	Materiales		17
3.2.2	Equipos.....		17
3.3	Técnicas de investigación		17
3.3.1	Tipo de investigación		17
3.3.2	Nivel de investigación.....		17
3.3.3	Diseño de investigación.....		17
3.3.4	Variables experimentales.....		18
3.4	Análisis estadístico		18
3.5	Metodología		18
3.5.1	Estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa		
3.5.2	Determinación de las características fisicoquímicas del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa).....		20
3.5.3	Determinación del tiempo de estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa) mediante el test de actividad respiratoria (AT4).....		21
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		23
4.1	Estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa)		23
4.2	Determinación de las características físicas y químicas del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa)		24
4.2.1	Análisis físico del biochar		25
4.2.2	Análisis químico del biochar		25
4.3	Determinación del tiempo de estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa) mediante el test de actividad respiratoria (AT4).....		36
V.	CONCLUSIONES.....		39
VI.	PROPUESTAS A FUTURO		40
VII.	REFERENCIAS		41

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Áreas de la Planta de Valorización.....	15
2. Propiedades fisicoquímicos de la biomasa residual	20
3. Relación de elementos constituyentes y metodología aplicada	21
4. Análisis físico elemental del biochar	23
5. Análisis químico elemental del biochar resultante	26
6. Datos obtenidos en detector multigas SKY2000-M.....	37
7. Actividad respiratoria de los 3 tratamientos evaluados durante los 4 días	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Eficiencia del proceso de pirólisis.....	7
2. Principales productos del pirólisis.....	8
3. Biochar.....	9
4. Posibles efectos de la aplicación del biochar como enmienda del suelo.	12
5. Mapa de ubicación del lugar de ejecución	15
6. Distribución de la Planta de Valorización.....	16
7. Temperatura (°C) evaluada en relación a la cantidad de muestras tomadas durante la elaboración del biochar	24
8. Muestras representativas de biomasa residual y respectivo biochar resultante (cascarilla de arroz y biochar de cascarilla de arroz).....	25
9. pH del biochar en sus tres tratamientos	27
10. Conductividad eléctrica (dS/m) y los tratamientos evaluados	28
11. Nitrógeno (%) en los tratamientos evaluados	29
12. Relación entre el %C y los tratamientos evaluados.....	29
13. Relación de C/N en los tratamientos evaluados	31
14. Humedad de los tratamientos evaluados.....	31
15. % Ceniza en los tratamientos evaluados.....	32
16. % MO en los tratamientos evaluados	33
17. % P ₂ O ₅ en los tratamientos evaluados	34
18. Calcio, magnesio, sodio y potasio (%) en los tratamientos evaluados	35
19. Zinc, hierro, cobre y manganeso (ppm) en los tratamientos evaluados.....	35
20. Variación de la actividad respiratoria de los 3 tratamientos en relación al tiempo (días)	38
21. Preparación de Horno pirolítico KON TIKI	51
22. Ambiente diseñada para la producción de biochar en pequeña escala	51
23. Primeras pruebas para la producción de Biochar	52
24. Diseño con mejor resultado en la producción de biochar por la homogeneidad.....	52
25. Proceso del desarrollo de la producción de biochar	53
26. Muestras obtenidas tras resultado de producción de biochar	53
27. Verificación de la Producción de biochar a pequeña escala IN SITU.....	54
28. Verificación de las muestras de biochar obtenidas tras la pirolisis	54

29. Muestras de Humus, Compost y Biochar.....	55
30. Extracción de la solución (p/v) luego de la centrifugación.....	55
31. Muestras evaluadas para los análisis comparativos.....	56
32. Equipo para evaluación de la estabilidad respiratoria método AT4.....	56
33. Toma de datos con el detector multigas SKY2000-M.....	56
34. Evaluación diaria de las muestras en el T1, T2 y T3.....	56

RESUMEN

El objetivo general de la investigación fue evaluar la estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) con enmiendas orgánicas mediante el test de actividad respiratoria (AT4) usando compost y humus de lombriz basado en la metodología de BINNER et al. (1999). Los resultados indicaron que no hubo modificación significativa en la forma ni en el tamaño, aunque sí cambios a nivel estructural en las cadenas carbonadas. El pH de los tres tratamientos se ubicó por encima de 7. La conductividad eléctrica (CE) fue mayor en el biochar de cascarilla de arroz + compost, con 0,59 dS/m. La relación C/N del biochar de cascarilla de arroz fue superior en comparación con los otros tratamientos, alcanzando 230,31. En cuanto a humedad, el mayor valor se observó en el biochar de cascarilla de arroz + humus, con 10,26%. Las cenizas oscilaron entre 37,08% y 41,17% para todos los tratamientos. Los contenidos de C, P, K, Cu, Mg y Zn no mostraron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. En conclusión, el tratamiento T2 (biochar de cascarilla de arroz + compost) presentó condiciones más estables respecto a los otros dos tratamientos.

Palabras clave: Pirólisis, actividad respiratoria, cascarilla de arroz, compost, humus.

ABSTRACT

The general objective of the research was to evaluate the stability of rice husk biochar (*Oryza sativa*) amended with organic amendments, using the respiratory activity test (AT4) with compost and worm humus, based on the methodology of BINNER et al. (1999). The results indicated no significant changes in shape or size, although structural changes occurred in the carbon chains. The pH of all three treatments was above 7. Electrical conductivity (EC) was higher in rice husk biochar + compost, at 0.59 dS/m. The C/N ratio of the rice husk biochar was higher compared with the other treatments, reaching 230.31. Regarding moisture, the highest value was observed in rice husk biochar + humus, at 10.26%. Ash content ranged from 37.08% to 41.17% across all treatments. The contents of C, P, K, Cu, Mg, and Zn did not show significant differences among the treatment means. In conclusion, treatment T2 (rice husk biochar + compost) exhibited more stable conditions compared with the other two treatments.

Keywords: Pyrolysis, respiratory activity, rice husk, compost, humus

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los suelos agrícolas experimentan cambios debido a una degradación que proviene de diversos factores externos, algunas de estas problemáticas se asocian con la salinidad, acidez hidromórfica, escasez y calidad de agua y otros, a esto se ha sumado, la preocupación por la presencia de algunos contaminantes que se generan directamente por las actividades antropogénicas, como metales pesados, dioxinas, etc.

La Organización de la ONU para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indican que para el año 2050 se prevé una pérdida de más del 50% del rendimiento de los cultivos (FAO, 2023) debido a diversas actividades realizadas por los humanos como el monocultivo, pastoreo excesivo, expansión urbana, deforestación, entre otros.

Nuestro país es especialmente rico en recursos naturales, sin embargo, al igual que muchos países a nivel mundial ha experimentado diversos tipos de degradación, identificándose en el año 2015 un total de 22 248,100 Ha de suelos degradados (17.47% de la superficie total). Según la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía propuesta hasta el 2030 por el Ministerio del Ambiente, ha identificado más de 8 millones de Ha afectadas por erosión, así mismo, la disposición inadecuada de residuos sólidos en diversas áreas también es una preocupación creciente de las autoridades puesto que éstos espacios se clausuran de forma permanente hasta su recuperación o reconversión, es así, que el último inventario nacional realizado por la OEFA (2022), identificó 1925 de zonas degradadas por residuos sólidos implicando un aumento de 340 áreas desde el año 2018.

Otras actividades que se desarrollan en el país como la minería artesanal a pequeña escala que se ha extendido en muchas regiones genera diversos impactos ambientales como el vertido de lixiviados que se infiltran en los suelos o son trasladados por el agua a través de la escorrentía contaminando así el suelo, aguas subterráneas entre otros, el Ministerio del Ambiente (2020), en su último reporte de zonas contaminadas heredados de actividades mineras identificó más de 7000 sitios contaminados, así mismo, el sector hidrocarburos también ha reportado un sinnúmero de accidentes que generan contaminación de los suelos o también producto de depósitos de desechos, o la instalación de pozos, etc., el MINEM (2019), reportó más de 3400 sitios contaminados por hidrocarburos.

Lamentablemente, la agricultura se ha convertido en una de las actividades económicas más perjudicadas por la degradación de suelos, afectando de manera particular a las regiones de San Martín, Ancash, Cajamarca, Huancavelica, Cerro de Pasco, Ayacucho, Huánuco y Puno, se tiene especial interés en estas regiones por sus índices bajos de IDH y los

niveles de pobreza alcanzados durante los últimos años, dado que, la mayor parte de la población depende de la productividad agrícola para su sustento y la agricultura se desarrolla a nivel familiar.

Considerando este panorama, a la par se han ido proponiendo diversas tecnologías y metodologías para ser utilizados en la recuperación de suelos, entre ellos destacan la aplicación de diferentes tipos de enmiendas orgánicas, a fin de reducir o eliminar el efecto o causas de la degradación. Destacando el uso del pirólisis como procedimiento de descomposición térmica de materia orgánica, el cual ha cobrado relevancia por admitir el uso de varios tipos de materia prima y por sus productos (biochar, bio-oil y Syngas). Estos, además de funcionar como tecnologías alternativas, también representan una opción para el manejo sostenible de residuos.

El biochar, además de constituir un residuo que puede ser valorizado, es un material enriquecido en carbono que se utiliza deliberadamente para mejorar las propiedades físicas del suelo, evidenciando su capacidad de fijación de carbono y permite según Abdullah, et al., (2023) la mejora de algunos atributos morfológicos y el crecimiento de las plantas, así como podría ser usado para el aumento la productividad en regiones áridas y semiáridas.

La elección de la cascarilla de arroz como materia prima para la transformación de biochar en comparación de otros materiales agroindustriales, se basa principalmente en la alta concentración de carbono, abundancia del material, bajo costo y disponibilidad en la zona de estudio, considerando que por cada una tonelada de arroz se produce un aproximado de 0.20 a 0.25 toneladas de cascarilla de arroz.

El biochar presenta ventajas superiores al compost y humus principalmente por su estabilidad a largo plazo, su alta porosidad para retener agua y nutrientes y su capacidad para retener carbono de manera permanente, a diferencia de enmiendas orgánicas que tienden a descomponerse de manera rápida, el biochar mejora suelos ácidos, reduce lixiviados y crea un ambiente ideal para organismos beneficiosos.

Considerando todo lo anteriormente señalado, se plantea como interrogante ¿Cuál es la estabilidad del biochar de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratoria (AT4) en función a los tratamientos evaluados?, teniendo como hipótesis que, el biochar biochar de arroz (*Oryza sativa*) con humus mediante el test de actividad respiratoria (AT4) es el más estable.

1.1. Objetivo General

Evaluar la estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratoria (AT4).

1.2. Objetivos Específicos

- Estimar la producción del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*).
- Determinar las características físico-químicas del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*).
- Determinar el tiempo de estabilidad del biochar de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), mediante el test de actividad respiratoria (test AT4).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Internacionales

Pérez et al. (2021) describe el biocarbón como un material con alto contenido de carbono obtenido a partir de residuos vegetales mediante procesos termoquímicos realizados en condiciones de restricción de oxígeno o en ausencia total de éste, y propone analizar las propiedades físicas de mezclas de biocarbón de cascarilla de arroz empleadas como componente de sustrato y su efecto en el crecimiento de plántulas de pepino; los tratamientos incluyeron biocarbón de cascarilla de arroz (BC) y turba comercial (T; Sunshine Mix 3), así como combinaciones en proporciones de 20:80, 40:60, 60:40 y 80:20 (BC:T), para caracterizar físicamente el sustrato mediante análisis de granulometría, densidad aparente, porosidad total, porosidad de aireación y porosidad de humedad; además, se determinó la concentración nutrimental con el fin de evaluar la disponibilidad de nutrientes que podrían influir en el desarrollo inicial de las plántulas, con el objetivo de comprender cómo la sustitución parcial o total de turba por BC modula la estructura porosa y la retención de agua y, a su vez, la disponibilidad de nutrientes en la horticultura de pepino.

Derdag y Ouazzani (2025), indican que, transformación de residuos orgánicos en biocarbón se presenta como una alternativa sostenible y práctica, gracias a su elaboración sencilla y al uso de insumos de bajo costo. Las características y el rendimiento del biocarbón dependen en gran medida de las condiciones del proceso termoquímico, especialmente de la temperatura, la velocidad de calentamiento y la presencia de oxígeno, factores que suelen reducir su producción cuando aumentan. Este material destaca por su versatilidad: puede emplearse como adsorbente en procesos ambientales, catalizador para la degradación de contaminantes, material de electrodo en la generación de bioelectricidad, filtro para el tratamiento de aguas y mejorador de suelos agrícolas por su efecto en la fertilidad y el secuestro de carbono. No obstante, aún se requieren más estudios que permitan comprender mejor cómo las propiedades del biocarbón influyen en su desempeño en distintos usos, ya que la falta de estandarización y la variabilidad en su composición siguen siendo retos importantes para su aplicación óptima.

Vismaya, et al. (2022), en su investigación, indicaron que el pH elevado del biocarbón, que puede alcanzar valores entre 10 y 12 cuando se produce a 500 °C, le permite neutralizar suelos ácidos y ampliar la superficie apta para la agricultura, favoreciendo prácticas

sostenibles y aportando al cumplimiento del ODS 15. Al mejorar la productividad agrícola, también apoya el avance hacia el ODS 2. Además, su alta capacidad de intercambio catiónico facilita la absorción de contaminantes, reduciendo la contaminación del suelo y garantizando cultivos más seguros, lo que se relaciona con el ODS 3 sobre salud y bienestar. Su capacidad para retener toxinas contribuye a disminuir la contaminación del agua y del suelo, mejorando la calidad de los ecosistemas terrestres y marinos, y apoyando así los ODS 6, 14 y 15.

2.1.2. Nacional

Sumari (2023), realizó un estudio que tuvo como objetivo evaluar las características físico-químicas (pH, CE, CIC, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, Pb, Cd y Cr) y la toxicidad del biochar obtenido por pirólisis lenta a 300°C a partir de cascarilla de arroz, pergamino de café y residuos de poda de arándano, caracterizándolo según las normas de la ASTM y estimando la dosis límite como enmienda mediante análisis cuantil Probit en plántulas de aguaymanto; los resultados muestran que el biochar de residuos de poda de arándano presenta alto contenido de Fe, Cu, Zn, Mn y B, y el mayor carbono fijo (73.02%), mientras que el de cascarilla de arroz se destaca por un pH cercano a la neutralidad (6.17), una CIC notable (19.2 meq/100 g), CE baja (2.36 dS/m) y el mayor contenido de MO (30.54%); el biochar de pergamino de café, por su parte, exhibe mayor contenido de humedad (44.87%), menor concentración de macro y microelementos y un nivel relevante de Cr (19.26 ppm, con mayor toxicidad potencial frente a los otros dos), siendo la dosis límite como enmienda del 90% para este último, y entre 19% y 30% en mezclas con sustrato para evitar señales de toxicidad; en conjunto, se concluye que, si bien estos biochars permiten el reuso de residuos agroindustriales, deben tratarse como insumos agronómicos con evaluación de inocuidad previa para garantizar la seguridad de las plantas y del ecosistema agrícola.

Palacios y Hugo (2022) plantean que el biochar, en su estructura sólida, fija carbono procedente de biomasa residual como madera, hojas, estiércol y otros subproductos; a diferencia del carbono vegetal común, el biochar se utiliza principalmente como enmienda de suelo, aprovechando su alta estabilidad para mejorar la retención de agua, la porosidad y la disponibilidad de nutrientes. Además, destacan que el biochar puede configurarse como combustible ecológico, ya que, debido a su lenta descomposición, contribuye a fijar carbono a largo plazo y a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero como CO₂, CH₄ y CO, entre otros, en un marco de estrategias de manejo sostenible de residuos y reducción de huella ambiental. En este sentido, la investigación subraya el potencial multifuncional del biochar para

la agricultura y la mitigación climática, siempre bajo consideraciones operativas sobre la procedencia de la biomasa, el proceso de pirólisis y las dosis adecuadas para evitar impactos negativos en los cultivos.

2.1.3. Local

Fasabi (2023), desarrolló su investigación en el centro poblado de Colpa Baja, con el objetivo de demostrar el efecto de la incorporación del biochar de origen orgánico (cascarilla de arroz) en la calidad del suelo agrícola contaminado. Por medio un pretest se identificó inicialmente que el suelo presentaba contaminación. Al evaluar el efecto del biochar en dicho suelo, se obtuvieron los siguientes resultados: en los tratamientos con biochar la dosis del 20% fue la más efectiva en la muestra 1. En el análisis mecánico se registraron 47.67% de arena, 15.33% arcilla y 37% limo, mientras que, en las características químicas, el pH fue de 7.25, conductividad eléctrica alcanzó 2.61 dS/cm y la materia orgánica llegó a 2.20%, con respecto a los valores cambiables fueron los siguientes el nitrógeno con 0.11%, fosforo con 67.34 ppm, potasio con 236.13 ppm. En los resultados en la muestra 2, la dosis del 25% resultó ser la mas efectiva. En el análisis mecánico se reportó un 44.33% de arena, 14.67% de arcilla y 41% de limo, mientras que en las características químicas, el pH fue de 7.38%, la conductividad eléctrica fue de 3.08 dS/cm y la materia orgánica alcanzó 2.32%, respecto a los valores cambiables fueron los siguientes el nitrógeno con 0.11%, fosforo con 93.78 ppm, potasio con 351.44 ppm.

Chuquiyauri (2021) examinó el efecto del biochar producido a 600°C y 900°C a partir de cáscaras de *Oryza sativa* (arroz) sobre *Daphnia magna* (pulga de agua) y *Lactuca sativa* (lechuga), caracterizándolo para conocer su composición físico-química y su fracción lignocelulósica, así como su rendimiento; para la toxicidad se preparó un extracto concentrado al 100% siguiendo el método de Zucconi y se diluyó en soluciones al 6,25%, 12,5%, 25%, 50%, 75% y 100%, empleándose luego el método de probit para estimar LC50, LOAEL y NOAEL. Los resultados indican que, a partir de una solución al 48,5% con biochar de 900°C y al 212% con biochar de 600°C, se registró mortalidad del 50% en *Daphnia magna*; el LOAEL mostró que la solución al 50% de biochar de 600°C provoca la muerte del 14% de *Daphnia magna*, mientras que la de 900°C provoca la muerte del 86%; en cuanto al NOAEL, se observó mortalidad del 4% con biochar de 600°C al 25% y del 10% con biochar de 900°C; respecto a *Lactuca sativa*, la elongación señaló un incremento hasta 12,5% con biochar de 600°C y hasta 6,25% con biochar de 900°C. En síntesis, el extracto de biochar obtenido a 600°C mostró un efecto menor de toxicidad en el medio evaluado, lo que sugiere diferencias relevantes en la

bioactividad y toxicidad entre temperaturas de pirólisis, con implicaciones para la evaluación de riesgos y aplicaciones agroambientales del biochar.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Aprovechamiento de residuos sólidos

Según Motta (2024), se entiende como el cumulo de estrategias y procesos orientados a gestionar de manera eficiente los residuos generados por las actividades humanas y económicas, con el objetivo de disminuir su impacto ambiental, maximizar la recuperación de recursos y promover la sostenibilidad. De acuerdo con el MINAM (2017), el enfoque abarca la segregación en fuente, el reúso, reciclaje y valorización energética, así como optar por última opción una disposición final adecuada, además, considera aspectos técnicos, económicos y sociales, como la búsqueda y puesta en funcionamiento de tecnologías adecuadas como compostaje, reciclaje mecánico, químico, pirólisis, gasificación, entre otros, y también la evaluación de impactos en la salud y el ecosistema, la viabilidad económica, la gobernanza, las políticas públicas, la seguridad ocupacional y la aceptación comunitaria.

2.2.2. Pirólisis

De acuerdo con Vilca et al. (2022), se trata de un proceso termoquímico mediante el cual los materiales orgánicos son expuestos a temperaturas superiores a 400 °C en un entorno con bajo o nulo contenido de oxígeno, con el fin de transformarlos en productos sólidos y líquidos de alta densidad energética. Las transformaciones físicas que se producen en el proceso de este tratamiento dependen de la estructura del sustrato, especialmente de la proporción de hemicelulosa, celulosa y lignina, así como de las condiciones operativas del reactor, como temperatura, tiempo de residencia y sistema de obturación. Esta dependencia de la composición y las condiciones de proceso determina las propiedades finales del material obtenido, su uso potencial y su comportamiento durante futuros tratamientos o aplicaciones.

2.2.3. Fuentes de materia prima para el pirólisis

Existen numerosas fuentes para la obtención del biocarbón, aunque no todos los desechos pueden considerarse materia prima adecuada para su producción. Entre las principales materias primas se destacan el estiércol, residuos agrícolas y forestales, desechos biológicos industriales y diversos materiales de origen marino y acuático, como algas y lodos residuales; otras fuentes incluyen cáscaras de frutos secos y cítricos, así como restos de plantas secas, desechos de arroz y papel, y residuos orgánicos urbanos (Shristi, et al., 2025).

Cabe destacar que la utilización de biomasa residual para la producción de biocarbón es una práctica ventajosa, ya que no compite con cultivos alimentarios, y con la

energía necesaria para la producción de alimentos, evitando la competencia por tierras cultivables (Arziyah et al., 2025).

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Rendimiento (%)			Referencia
				Biocarbón	Bioaceite	Syngas	
Lenta	300-800	> 60min	5-7	30-55	-	-	(Ghodake et al., 2021)
	300-800	> 60min	5-7	35-50	-	-	(Lee et al., 2018)
	300	25min	6-48	25-65	-	-	(Hasan et al., 2021; Lu et al., 2020)
	300-700	>2s	-	35	30	35	(Cantrell et al., 2012; Yaashikaa et al., 2020)
Pirólisis Rápida	400-600	1-10 s	300-800	16-37	-	-	(Ghodake et al., 2021)
	400-600	0.5-10 s	300-800	15-35	-	-	(Lee et al., 2018)
	400-700	25min	10-100	10-25	40-70	10-20	(Hasan et al., 2021; Sipra et al., 2018)
	500-1000	-	-	12	75	13	(Cantrell et al., 2012; Yaashikaa et al., 2020)
Flash	400-1000	2-3s	1000	11-22	-	-	(Ghodake et al., 2021)
	400-1000	<2s	1000	10-20	-	-	(Lee et al., 2018)
	700-900 o más	<0.5s	1000	10-15	10-20	60-80	(Garcia et al., 2020; Hasan et al., 2021; Kataki et al., 2018)
	300-600	<30min	-	37	-	-	(Nunoura 2005; Yaashikaa et al., 2020,)

Figura 1. Eficiencia del proceso de pirólisis

Fuente: Adaptado de Arziyah, et al. (2025).

2.2.4. Productos del pirólisis de residuos

Se pueden obtener varios productos pero a continuación se detallan los principales:

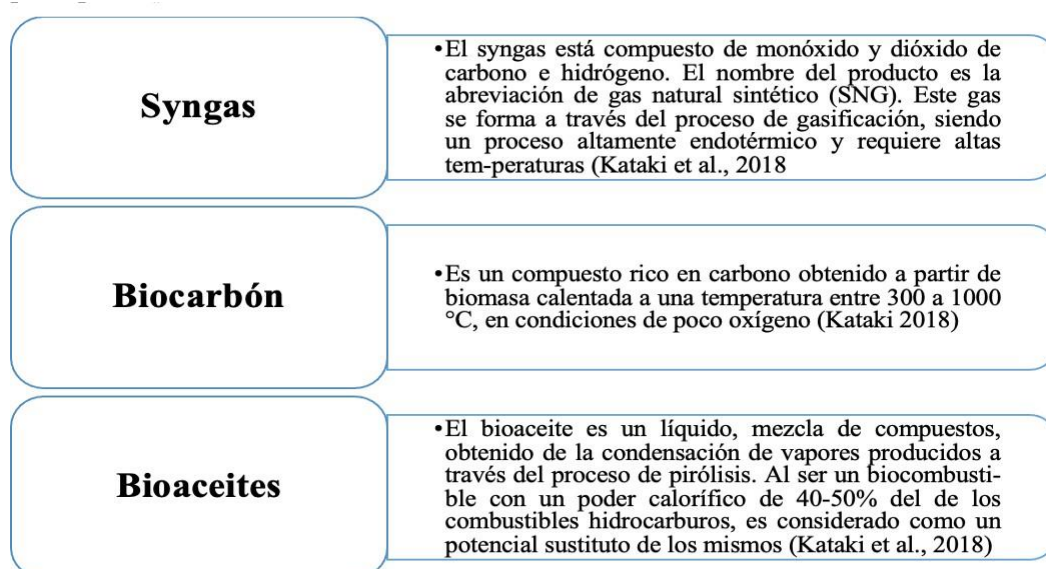


Figura 2. Principales productos del pirólisis

Fuente: Weber & Quicker (2018)

2.2.5. Biochar

Es un tipo de carbón producido al someter biomasa, como astillas de madera, residuos agrícolas o desechos de cultivo, a un proceso de pirólisis en un ambiente con bajo nivel de oxígeno. Durante este tratamiento las altas temperaturas (350° y 700° C) eliminan compuestos volátiles y generan un material estable con alto contenido de carbono. Esta sustancia presenta propiedades destacadas que la hacen abrir un amplio abanico de aplicaciones, desde el almacenamiento de carbono a largo plazo y la mejora de la salud y estructura del suelo, hasta el incremento de la fertilidad y los rendimientos de los cultivos, lo que resulta de interés tanto para agricultores como para investigadores y emprendedores ambientales. En especial, su capacidad para modificar la dinámica de nutrientes, mejorar la contención de agua y reducir la lixiviación la sitúa como una herramienta prometedora en estrategias de manejo sostenible de suelos y mitigación del cambio climático (Manyá, et al. 2018).



Figura 3. Biochar

Fuente: MINCETUR (2016)

2.2.6. El potencial del Biochar

Los sistemas de biochar poseen un gran potencial para absorber emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Las iniciativas centradas en Biochar podrían reducir aproximadamente entre 3,4 y 6,3 mil millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente (PgCO₂e), posicionándose como un recurso eficaz en los esfuerzos para combatir el calentamiento global. Su notable estabilidad del carbono convierte al biochar en una alternativa

prometedora dentro de las estrategias de mitigación, ya que el carbono que se incorpora al proceso de pirólisis a partir de biomasa se transforma en un material resistente que, al enterrarse en el suelo, puede mantener capturado el carbono durante cientos, e incluso miles de años (Zhang, et al., 2023).

De acuerdo con Song, et al., (2022), el creciente interés nace de su capacidad para abordar múltiples desafíos ambientales mientras genera beneficios tangibles. Iniciativas como el Proyecto Biochar de Enfield, con apoyo potencial a través de marketplaces en Maine (EE. UU.), destacan la creación de instalaciones piloto de pirólisis para producir Biochar y estudiar su impacto en suelos y ecosistemas. Este artículo explora el concepto de Biochar y su papel como un “cambio de juego” en la gestión del carbono, examinando tanto las bases científicas como las posibles aplicaciones prácticas y los retos para su adopción a gran escala.

2.2.7. Importancia del biochar en la agricultura

Las prácticas agrícolas modernas, al repetirse cosecha tras cosecha, están agotando los nutrientes del suelo y reduciendo significativamente la materia orgánica disponible, lo que compromete la estructura, la retención de agua y la productividad a largo plazo. Ante este escenario, la estrategia más extendida para mitigar el agotamiento consiste en incorporar enmiendas al sustrato en forma de fertilizantes y correcciones que restauren la fertilidad y mejoren las condiciones del suelo. En este contexto, el biochar emerge como una opción versátil: al ser agregado al suelo, puede contribuir a enriquecer la materia orgánica, mejorar la porosidad y la retención de agua, y actuar como un depósito estable de carbono, lo que añade un componente de mitigación climática a la recuperación productiva (Kusuma, et al. 2024).

Además, el biochar ofrece beneficios complementarios al manejo de residuos y a la sostenibilidad agroambiental. Su capacidad para disminuir la lixiviación de nutrientes, modular la disponibilidad de micronutrientes y potenciar la actividad biológica del suelo lo posiciona como una enmienda con múltiples impactos positivos sobre la salud del suelo y la productividad de los cultivos (Khedulkar, et al. 2023). A largo plazo, su adopción podría facilitar prácticas agrícolas más resilientes, reducir la dependencia de insumos químicos y contribuir a una gestión más eficiente de los recursos naturales, siempre que se determinen dosis apropiadas y se consideren las características específicas de cada suelo y cultivo.

2.2.8. Inconvenientes del biochar

Aunque el biochar ofrece múltiples beneficios potenciales para la agricultura, también resulta esencial considerar sus posibles desventajas, pues ello es fundamental para tomar decisiones informadas y prevenir efectos adversos. Abordar retos como el costo de producción y adopción, las implicaciones a largo plazo en el suelo y el ecosistema, posibles desequilibrios de nutrientes, preocupaciones ambientales y marcos regulatorios contribuirá a un uso más sostenible y responsable del biochar. En este sentido, las últimas investigaciones continúan, los avances tecnológicos y la colaboración entre productores, científicos, reguladores y comunidades ayudarán a maximizar el potencial del biochar al tiempo que se minimizan efectos indeseados, garantizando una implementación prudente y adaptada a contextos específicos (Qian, et al. 2023).

2.2.9. Historia del biocarbón

En Asia, el carbón vegetal ha sido históricamente uno de los principales abonos utilizados por los agricultores, derivado principalmente de desechos del cultivo de arroz, pero también de materiales como coco, palma de aceite y bambú; su uso en la agricultura aparece documentado por primera vez en Japón en el libro *Nogyo Zensho* (Enciclopedia de Agricultura) de 1697, donde se describe como “abono de fuego” o “abono de cenizas”, indicando una larga tradición de incorporación de carbón al suelo. Se ha propuesto que su empleo se remonta a los orígenes de la siembra de arroz en Asia, ofreciendo una vía para transformar subproductos como la cáscara de arroz, que se descomponen lentamente debido a su alto contenido de silicio (Ogawa y Okimori, 2010).

En términos contemporáneos, para Kumar y Bhattacharya (2021), la evidencia sugiere que al suministrar biocarbón al suelo, mejora significativamente las propiedades físicas y químicas del sustrato, aumentando la retención de nutrientes y su disponibilidad para las plantas, lo que puede traducirse en mayores rendimientos y mayor resiliencia frente a estresores abióticos. Además, la presencia de biocarbón induce cambios en la estructura de las comunidades microbianas del suelo y estimula la actividad microbiana, favoreciendo la acumulación de microorganismos beneficiosos y la integración de abonos orgánicos, con consecuencias positivas para el crecimiento de las plantas y en la inducción de respuestas de defensa sistémica.

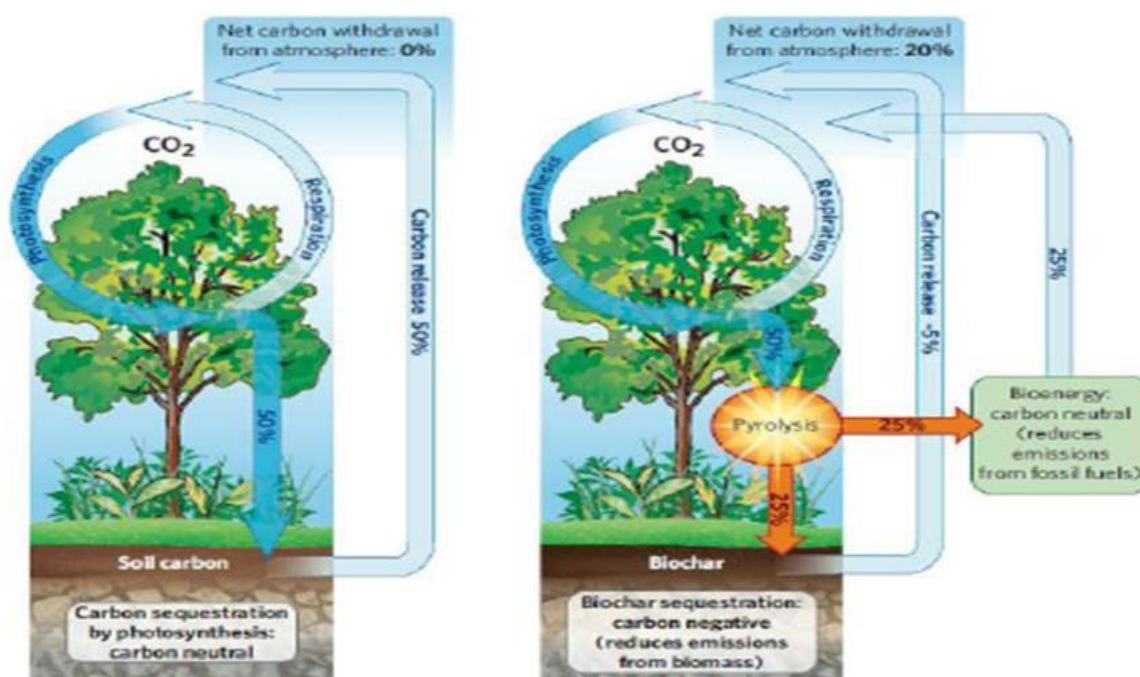


Figura 4. Posibles efectos de la aplicación del biochar como enmienda del suelo.

2.2.10. Parámetros físicos y químicos del biochar

a) pH

Es una propiedad clave para entender la interacción suelo-biochar, ya que determina en gran medida su efecto sobre la salud y la fertilidad del sustrato. Existen distintas metodologías para medir este parámetro, y tomar la lectura en una muestra fresca puede no reflejar con precisión el pH resultante en el suelo una vez que el biochar ha alcanzado equilibrio con el CO₂ atmosférico, proceso que tiende a convertir muchos hidróxidos alcalinos en carbonatos y, por ende, a disminuir el pH. Además, la preparación de una solución de biochar para pruebas puede verse obstaculizada por su baja humectabilidad, resultado de factores como elevados contenidos de aceites y alquitrán hidrofóbico, o la presencia de una fracción de madera torrefacta; en ciertos biochars, también puede haber una gran cantidad de microporos que requieren vapor de agua para humedecerse y permitir la movilidad de los constituyentes dentro de sus poros. Estas dos primeras limitaciones dificultan su uso inmediato como enmienda, mientras que la característica positiva de un biochar bien humedecido y con acceso a sus microporos facilita su dispersión y efecto beneficioso en el sustrato (Ponce, 2025).

b) Capacidad de Intercambio Catiónico

Es una propiedad clave del suelo, porque regula la adsorción y desorción de nutrientes y, en consecuencia, su disponibilidad para las plantas. En el biochar, una CIC elevada puede estar asociada a la presencia de grupos funcionales oxidados, como los grupos

carboxílicos, en la superficie, lo que suele incrementarse tras procesos de degradación microbiana y oxidación. La indicación de estos grupos a menudo se refleja en una mayor fracción de oxígeno respecto al carbono (mayor relación O/C), lo que sugiere mayor capacidad de retención de cationes y de complejación de nutrientes. Con el tiempo y la incorporación al suelo, las superficies de las partículas de biochar se oxidan y establecen interacciones con los constituyentes del sustrato, aumentando la densidad de grupos funcionales y la carga superficial negativa, lo que potencialmente amplía aún más la CIC y la disponibilidad de nutrientes. No obstante, la medición puntual de la CIC de un biochar determina su estado en el momento de muestreo y no predice necesariamente mejoras adicionales de capacidad de intercambio que podrían materializarse en el futuro, ya que dependen de la evolución de la química de la superficie y de las condiciones edafoclimáticas (Hernández, 2023).

c) Conductividad eléctrica o Sólidos Totales Disueltos (STD)

La conductividad de sales disueltas en biochar representa el contenido total de sales presentes en la solución asociada al material, incluyendo fertilizantes y sales neutras que pueden encontrarse en la matriz; aunque no siempre constituye un problema, un exceso de sales puede tener efectos adversos en muchas plantas al interferir con la absorción de agua y nutrientes (Machado, et al. 2024). En general, los biochars con un contenido significativo de cenizas tienden a exhibir mayores niveles de STD, ya que estas sales se cuantifican a través de las cenizas y, por tanto, pueden incrementar los sólidos disueltos totales; este aspecto debe evaluarse con cuidado al considerar usos agrícolas del biochar para evitar impactos negativos en la salud de las plantas (Chuquiyauri, 2021).

2.2.11. Caracterización del biochar

La selección de la materia prima, la técnica de producción y las condiciones de procesamiento es crucial para obtener un biochar con propiedades específicas; no obstante, resulta aún más importante definir y delimitar las pruebas analíticas y los análisis esenciales que conformarán un conjunto mínimo de datos de caracterización que facilite la comparación de resultados. Asimismo, además de determinar las características a evaluar, es indispensable establecer un conjunto de métodos estandarizados, dado que este es un campo de investigación relativamente nuevo y no existe una norma única aceptada. En este contexto, es relevante destacar las iniciativas de la International Biochar Initiative (IBI), que ha propuesto directrices como las “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil”. Aunque no se ha consolidado una jerarquía universal de las propiedades del biochar, la caracterización suele apoyarse en normas y métodos ya establecidos, especialmente

las normas ASTM diseñadas para la caracterización de combustibles sólidos; entre ellas destacan el análisis proximal y el análisis ultimate, que evalúan el comportamiento del carbón en procesos de combustión y permiten inferir su idoneidad para usos específicos. Estas pautas buscan homogenizar la evaluación, promover la reproducibilidad y facilitar la adopción del biochar en aplicaciones agrícolas y ambientales, al tiempo que facilitan la comparación entre estudios y la toma de decisiones informadas sobre su implementación (Abad, 2022).

2.3. Determinación de la Estabilidad Biológica

Para conocer el nivel de estabilización de un residuo se puede realizar un test respirométrico y así averiguar la biodegradabilidad de la muestra. Este tipo de test se basa en una estimación de la actividad biológica potencial de la muestra, a través del desprendimiento de CO₂ o el consumo de O₂ por parte de la biomasa microbiana que es parte integrante de la misma. Uno de los test más usados es el AT4, donde se mide el consumo de oxígeno a los cuatro días.

2.3.1. Test de actividad respiratoria AT4

AT4 espirometría estática: la determinación de la AT4 o respirometría estática se basa en el método ÖNORMS 2027- 4 en el cual se cuantifica la cantidad de oxígeno por gramo de materia seca que consume una muestra de residuo orgánico transcurridos 4 días de incubación, es decir, la estabilidad de la muestra en función del oxígeno consumido por los microorganismos presentes. Para ello ha sido necesario preparar la muestra con unas condiciones de humedad específicas mediante ‘fist test’ (técnica para la humectación de muestras orgánicas), tenerla en reposo 4 horas, realizar el procedimiento de materia seca e introducir la muestra en un bote con una trampa de sosa y un cabezal de lectura oxitop. La muestra se ha incubado durante 4 días y posteriormente se han realizado los cálculos pertinentes para obtener el resultado final. (Grupo Tragsa, 2021).

2.3.2. Metodología Binner en actividades respirométricas

La medición del Test de actividad respiratoria AT4, para determinar la estabilidad biológica, basada en la metodología Binner (Especialmente desarrollada en Australia), se aplica en normativas europeas y españolas que regulan el depósito de residuos en vertedero. Se trata de una norma austríaca de estandarización para los residuos del tratamiento mecánicobiológico donde la cuarta parte detalla la medición de la estabilización de los residuos a través de la respirometría.

Parámetro	Unidad	Límite (AT4)
Estabilidad biológica	[mg O ₂ /g] M.S.	< 7

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución

3.1.1 Ubicación

La presente investigación se realizó en la Planta de Valorización de Residuos Sólidos Orgánicos del distrito de Tocache, provincia de Tocache y departamento de San Martín; la misma que se encuentra ubicado en el sector Pucayacu. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas UTM 18S 328950 m E y 9094029 m N, a una altitud de 480 m.s.n.m., con un área de 0.9 ha., en la carretera Tocache – Uchiza, a unos 430 metros de la Carretera Fernando Belaunde Terry.



Figura 5. Mapa de ubicación del lugar de ejecución

La planta de valorización está dividida en diferentes ambientes para procesos específicos descritos a continuación:

Tabla 1. Áreas de la Planta de Valorización

Item	Descripción	Área (m ²)
1	Recepción	169
2	Pilas	173
3	Trituración	16
4	Almacén	151
5	Oficina	61

Item	Descripción	Área (m ²)
6	Auditorio	62
7	Zarandeo y pesado	17
8	Vivero municipal	2023
9	Acopio de residuos inorgánicos	189
10	Áreas verdes y otros	6140

Fuente: Plan anual de Valorización de residuos sólidos orgánicos municipales de la provincia de Tocache- 2021

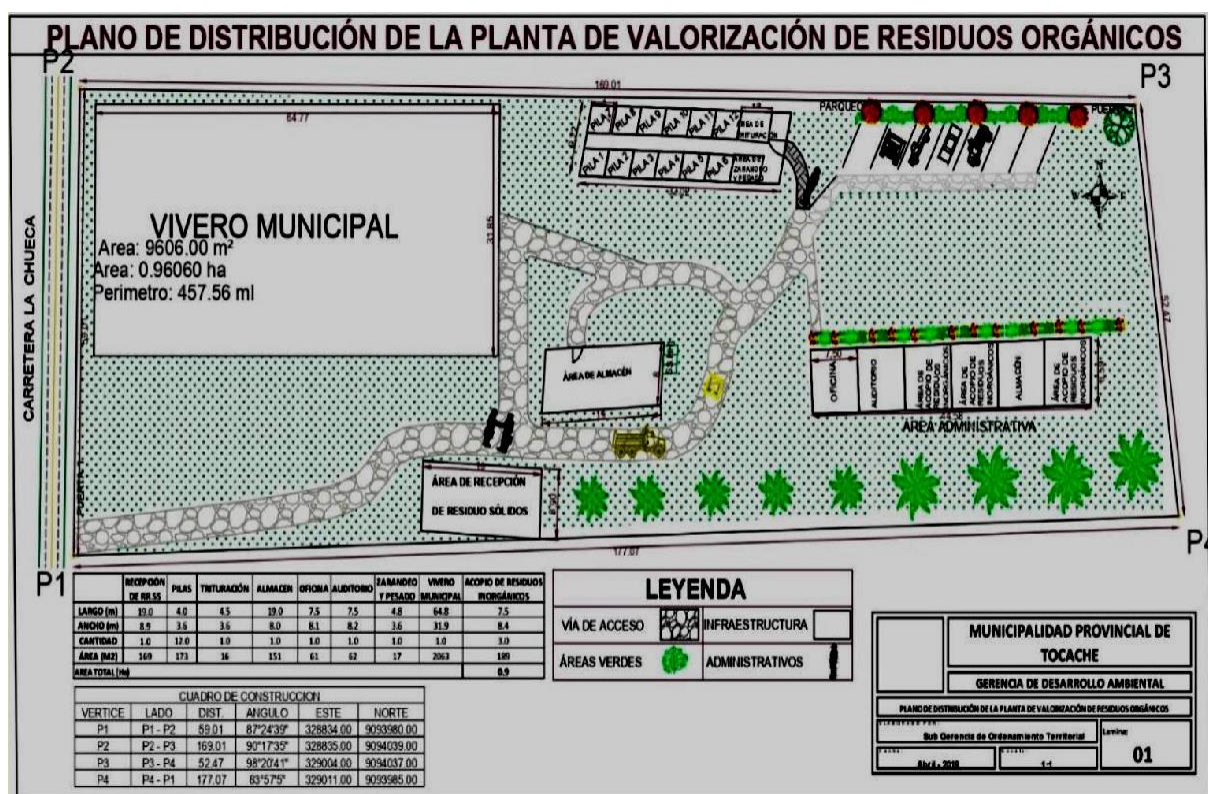


Figura 6. Distribución de la Planta de Valorización

Fuente: Plan anual de Valorización de residuos sólidos orgánicos municipales de la provincia de Tocache- 2021

3.1.2 Aspectos climáticos

En la zona de estudio se caracteriza por un clima tropical cálido y muy húmedo, con temperatura promedio de 21 a 33 °C, la precipitación promedio mensual supera los 50 mm, el viento tiene una velocidad promedio entre 4-7 km/h con ráfagas de hasta 22 km/h y en cuanto a la humedad se estima un promedio de 75% mensual (SENAMHI, 2025).

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Materiales

Saco de 50 Kg, bolsas de papel de 13 x 20 cm con pestillos, hacha, machete, martillo, guantes de protección, mascarilla de gases, lapiceros, libreta de apuntes y cámara fotográfica, en cuanto a los materiales de laboratorio éstos fueron set de tamices #20, #80 y #100 ASTM, bolsas Ziploc de polietileno, crisoles de porcelana, mortero de ágata con pilón de 100 ml, embudos de vidrio, cilindros graduados vasos precipitados.

3.2.2 Equipos

Horno pirolítico artesanal, termómetro digital infrarrojo Prasek de 550 °C, multiparámetro AMT-300, balanza romana de 25 kg de capacidad, molinos eléctricos Thomas – Wiley, horno de estufa (105 + 3°C), horno de mufla (950 + 5°C), balanza analítica, pH-metro digital con una precisión de + 0.05, analizador de COT Shimadzu L5000A, equipo detector de gas portátil SKY2000-M.

3.3 Técnicas de investigación

3.3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación, según la clasificación de Hernández et al. (2014), es aplicado, ya que se recurrió a las ciencias física, química y ambiental para evaluar los impactos ambientales que generan los residuos orgánicos de cultivos agrícolas.

3.3.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo, debido a que se hizo la evaluación del impacto ambiental que generan los residuos orgánicos de cultivos agrícolas, para ello se describió la variable en estudio.

3.3.3 Diseño de investigación

En la presente investigación el diseño es experimental donde se consideró los siguientes tratamientos con tres repeticiones por cada uno.

- T1: Biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) al 100%.
- T2: Mezcla de Biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) al 50% y compost al 50 %.
- T3: Mezcla de Biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) al 50% y humus de lombriz al 50 %.

3.3.4 Variables experimentales

Variable independiente

Biochar de cascarilla de arroz

Variable dependiente

Test de actividad respiratoria

3.4 Análisis estadístico

Los datos recopilados fueron analizados estadísticamente mediante el procedimiento de análisis de varianza (ANOVA), se consideró un nivel de significancia de $p < 0,05$. Este método permitió evaluar el efecto de los tratamientos y detectar posibles interacciones entre los factores principales. Cuando el ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas, se procedió a aplicar la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con el fin de identificar con precisión cuáles tratamientos diferían entre sí.

La interpretación de los resultados se realizó siguiendo los criterios propuestos por Steel y Torrie (1992), estableciéndose que las diferencias fueron consideradas significativas cuando el valor de p fue inferior a 0,05. Este enfoque estadístico aseguró un análisis riguroso y confiable de la variabilidad presente en los datos, proporcionando una base sólida para la discusión e interpretación de los efectos observados en el estudio.

3.5 Metodología

3.5.1 Estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*)

Se elaboró el biochar mediante una pirolisis lenta de 300 a 700 °C de temperatura para ello se realizará los siguientes pasos:

3.5.1.1 Selección y recolección de la materia prima

La materia prima seleccionada y recolectada (cascarilla de arroz) fue traído del distrito de Tocache, provincia de Tocache, de la región San Martín.

3.5.1.2 Acondicionamiento de la materia prima

La muestra se distribuyó sobre mantas y se secó a temperatura ambiente hasta alcanzar una consistencia crujiente.

3.5.1.3 Diseño y fabricación del Horno Pirolítico

La fabricación del horno cónico pirolítico se apoyó en un diseño habitual que utiliza un tambor cilíndrico y uno cónico, concebidos para producir biochar en lotes reducidos con fines analíticos y de investigación.

3.5.1.4 Componentes del horno pirolítico

El sistema utiliza un tambor cilíndrico y uno cónico en configuración de horno pirolítico. El tambor pequeño, ubicado de forma vertical, funciona como la cámara interna y mide aproximadamente 40 cm de diámetro por 70 cm de altura y una capacidad estimada de 2–10 kg, depending on biomass density. En la parte lateral de este cilindro se realizaron orificios pequeños para una aireación regulable, mientras que en la base inferior se perforó un único orificio central para facilitar la liberación de energía concentrada y activar la combustión.

La estructura cónica grande actúa como la cámara de combustión externa y presenta unas dimensiones de alrededor de 70 cm de diámetro por 100 cm de altura, con un volumen aproximado de 0.175 m³. A lo largo de las secciones media y superior de esta figura cónica grande se realizaron orificios continuos para la ventilación, y en la sección inferior se disponen ventanas regulables para controlar el flujo de aire hacia el interior del horno.

Cada estructura cuenta con dos tapas: una completamente sellada y la otra en el tambor grande, diseñada para acoplarse a una chimenea de ventilación.

3.5.1.5 Producción de biochar

Cada muestra fue recolectada, sometida a un secado parcial, mezclada y luego dividida en dos porciones equivalentes para su procesamiento en el horno pirolítico.

3.5.1.6 Acondicionamiento de la muestra

Para el acondicionamiento de las muestras se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM E1757-01(07): Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis. En cuanto al secado, las muestras con alto contenido de humedad teórico se llevaron a 105°C durante 12 horas o hasta lograr peso constante, mientras que las de menor humedad se secaron 4 horas a la misma temperatura. Posteriormente, las muestras se molieron con un mini molino eléctrico para disminuir y estandarizar el tamaño de partícula a menos de 1–2 mm de diámetro y se procedió al tamizaje con un juego de tamices ASTM No. 20 (850 µm) y No. 80 (180 µm). La fracción retenida en la malla No. 20 (+20) se reprocesó, mientras que la fracción retenida entre No. 80 (-20/+80) se pesó (Wt20/80) y se destinó al análisis de composición; la fracción retenida en el fondo del set (-80) resultó la más fina y se pesó (Wt80) para su análisis de cenizas. Antes de cada prueba, las muestras se volvieron a secar a 105°C para reportar todos los resultados analíticos sobre base seca, y en ningún caso la masa de una muestra se corrigió por su contenido de humedad.

3.5.1.7 Rendimiento del biochar

El rendimiento se calculó considerando la relación entre la cantidad o el peso del producto final obtenido (biochar enfriado) y la biomasa seca empleada al inicio del proceso, expresándose dicha proporción en porcentaje:

$$\text{Rendimiento} = (\text{Peso del biochar} / \text{peso de la biomasa seca}) \times 100$$

3.5.2 Determinación de las características fisicoquímicas del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*)

Los diversos análisis fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología y Microbiología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.5.2.1 Análisis fisicoquímico

Se determinaron las siguientes propiedades fisicoquímicas de la biomasa residual:

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la biomasa residual

Parámetro	Unidad de medida		Metodología
Morfológico estructural	y	-	-
Humedad		%	Norma ASTM E1756-08 (Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass).
Ceniza		%	Norma ASTM E1755-01 (Standard Test Method for Ash in Biomass).
pH		-	ASTM D1512-05 (Standard Test Methods for Carbon Black-pH Value)
Oxido de Fósforo P ₂ O ₅		%	
Conductividad eléctrica o Sólidos Totales Disueltos (TDS)		dS/m	Conductímetro
Materia orgánica		%	Analizador de COT Shimadzu L5000A

Parámetro	Unidad de medida	Metodología
Relación C/N	%	Relación mediante la determinación del contenido de Nitrógeno Total y el contenido de Carbono Orgánico

3.5.2.2 Análisis macronutrientes

Se determinaron los siguientes elementos constituyentes de la materia prima:

Tabla 3. Relación de elementos constituyentes y metodología aplicada

Macronutrientes	Método
Sodio (Na)	%, Método de Sodio Total.
Potasio (K)	%, Método de Potasio Total.
Calcio (Ca)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio (Mg)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Zinc (Zn)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Hierro (Fe)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Cobre (Cu)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Manganeso (Mn)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica

3.5.3 Determinación del tiempo de estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratoria (AT4)

Para la determinación de este parámetro, primero se realizó el montaje del sistema experimental de actividad respiratoria – AT4 como indica la metodología de BINNER et al. (1999), utilizando un sistema de captación y otro de cuantificación de CO₂. El test respirométrico, consiste en la medición de la respiración de los microorganismos al ser

agregado el resto carbonado, este proceso produjo CO₂, la cual fue cuantificada de manera indirecta por captación alcalina, durante un periodo de incubación variable, se usó el equipo detector de gas portátil SKY2000-M, donde se colocó las muestras por 4 días y posteriormente se descargaron los datos obtenidos.

Según la “Guía para el Tratamiento Biomecánico de los Residuos Sólidos” (“MBA-Richtlinie”), el resultado del test de actividad respiratoria – AT4 no debe superar los 7mg O₂/ g Ms para ser considerada una muestra estable.

Con los datos obtenidos a través del equipo detector de gas portátil SKY2000-M, en el Test de actividad respiratoria AT4, sobre la producción de CO₂ en gramos y conociendo la cantidad de Materia Seca también en gramos, procedemos a determinar la cantidad del consumo de O₂, en mg de O₂/ gramos de Materia Seca.

Factor de conversión masa molares:

$$\text{Masa molar: } \frac{32\text{g O}_2}{44\text{g CO}_2} \approx 0.727$$

$$\frac{\text{mgO}_2}{\text{g MS}} = \left(\frac{\text{gramos CO}_2 \text{ producido} \times 0.727 \times 1000}{\text{gramos Materia Seca (MS)}} \right)$$

Nota: Si los niveles de producción de CO₂ supera a 2.90 gramos, en 300 gramos de materia seca, el nivel de consumo de O₂ en mg de O₂/gramos de Materia Seca, se considera que el material es biológicamente inestable o no suficientemente estabilizado, por que superaría el nivel de 7mg O₂/ g Ms .

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*)

La Tabla 4 presenta un rendimiento del 36.15% para un proceso de pirólisis de 3 horas, operando a una temperatura media de 321.22 °C. Este valor indica que, bajo las condiciones experimentales empleadas, la fracción de biochar obtenida representa una parte significativa de la biomasa inicial, lo que sugiere una eficiencia de conversión razonable en relación con la temperatura y el tiempo de residencia. La combinación de duración considerable y temperatura moderadamente alta favorece la transición de la biomasa hacia un material carbonoso, caracterizado por una estructura relativamente estable y mayor densidad de carbono en comparación con los productos gaseosos o líquidos generados.

Tabla 4. Análisis físico elemental del biochar

Biochar	Muestra	Biomasa (Kg)	Biochar resultante (Kg)	Rendimiento (%)	Promedio T°C	Tiempo promedio pirólisis Hrs
Cascarilla de arroz (<i>Oryza</i> <i>Sativa</i>)	1	10	3.615	36.15	321.22	3

Durante la quema y la evaluación de la temperatura, fue necesario un suministro constante de biomasa para mantener estable la temperatura de proceso; aun cuando se observó una generación mínima de emisiones durante la pirólisis, la duración total de la quema se extendió a 3 horas. Por otra parte, el tiempo de espera para lograr la homogeneidad de la muestra osciló entre 48 y 72 horas. En la monitorización de la temperatura, se utilizó un sensor infrarrojo para registrar la fase de carbonización de la biomasa. El gráfico corresponde a la temperatura de la llama. Varios autores destacan que el rendimiento del biochar disminuye al aumentar la temperatura de pirólisis, debido a la descomposición de compuestos volátiles, así como Dai et al. (2025), quienes indican que operando entre 300 y 400 °C se optimiza el rendimiento del biochar sin llegar a comprometer la calidad del mismo, en la investigación realizada se utilizó una temperatura promedio de 321.22°C y se generó un rendimiento de 36.15%.

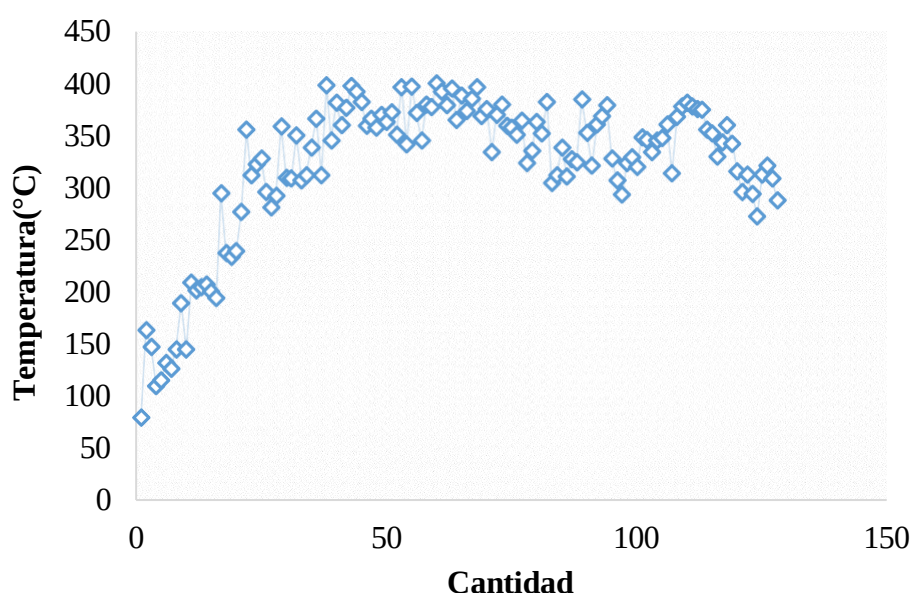


Figura 7. Temperatura (°C) evaluada en relación a la cantidad de muestras tomadas durante la elaboración del biochar.

Por otro lado, una investigación realizada por O. Samuel Olugbenga et al. (2024), indicó que 3 horas de pirólisis representa un equilibrio adecuado entre rendimiento y calidad del producto, coincidiendo así con la presente investigación debido a que un tiempo de residencia más prolongado entre 2 y 4 horas mejora la estabilidad del biochar, pero se debe tener en consideración que podría reducir ligeramente su rendimiento por la liberación de gases volátiles. Así mismo, para Zhou et al. (2022), encontraron rendimientos entre 35-40% para condiciones similares de temperaturas moderadas y tiempos medios, lo que indica que para evaluaciones experimentales los valores son aceptables, así mismo, se debe precisar que la eficiencia de conversión del biochar está estrechamente vinculada con la composición de la biomasa y las condiciones térmicas.

4.2 Determinación de las características físicas y químicas del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*)

4.2.1 Análisis físico del biochar

En comparación con la Figura 8, que representa las muestras de biomasa residual y su biochar derivado (cascarilla de arroz y biochar de cascarilla de arroz), se observa que la forma y el tamaño permanecen relativamente inalterados respecto a la muestra original, mientras que sus características estructurales se modifican mediante la introducción de cadenas carbonadas, como grafeno, lo que sugiere una reorganización estructural a nivel molecular sin una alteración marcada en la morfología externa de las muestras, así mismo para (Li et al., 2023) que La biomasa de origen influye directamente en las propiedades físicas del producto final. Las biomásas leñosas generan biocarbones de textura predominantemente gruesa, mientras que las biomásas agrícolas residuales producen biocarbones más delgados. En el caso de las cascarillas de arroz, los biocarbones resultantes conservan una contextura delgada similar a la del material original.

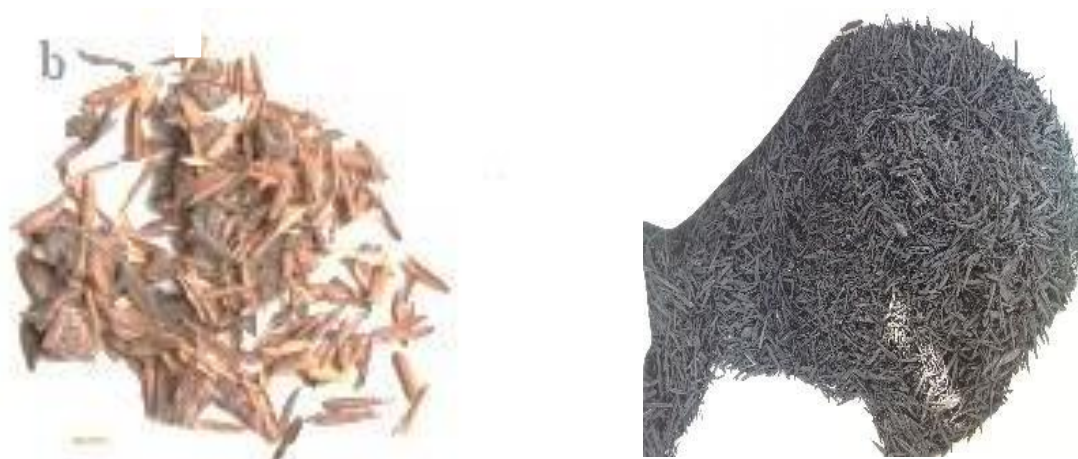


Figura 8. Muestras representativas de biomasa residual y respectivo biochar resultante (cascarilla de arroz y biochar de cascarilla de arroz)

4.2.2 Análisis químico del biochar

Las investigaciones recientes indican que la composición química de los biocarbones puede variar ampliamente; sin embargo, comparten propiedades comunes como un elevado contenido de carbono, bajos niveles de nitrógeno, pH alcalino y una densidad reducida, aspectos que ya han sido analizados previamente. En el marco del análisis comparativo presentado en la Tabla 5, se destacan las características particulares del biochar obtenido a partir de la cascarilla de arroz, así como de sus mezclas con compost y con humus. En este contexto, se identifican ciertos aspectos distintivos que permiten diferenciar entre los diferentes tipos de biocarbón y evaluar su adecuación para aplicaciones agroambientales:

Tabla 5. Análisis químico elemental del biochar resultante

T	Tratamientos	pH	CE dS/m	MO %	N%	C%	Humedad%	Ceniza %
	Biochar							
T1	Cascarilla de arroz	7.33	2.49	62.07	0.39	31.03	4.43	33.50
	Biochar							
T2	Cascarilla de arroz + compost	6.29	0.54	44.98	0.85	22.49	7.66	47.37
	Biochar							
T3	Cascarilla de arroz + humus	7.15	5.45	18.43	0.84	9.22	17.05	64.52

4.2.2.1 Potencial hidrógeno (pH)

Como se aprecia en la Figura 9, los biochars obtenidos de la cascarilla de arroz presentan un pH más alto (7.33) en comparación con el biochar de cascarilla de arroz + compost (6.29) y el biochar de cascarilla de arroz + humus (7.15). Esta divergencia sugiere una neutralización o estabilización progresiva de las propiedades del suelo a medida que se incorporan materiales orgánicos complementarios, siendo el biochar puro el más alcalino entre las muestras evaluadas. En términos generales, un pH elevado en biochar resulta favorable para suelos ácidos, ya que puede actuar como un amortiguador de la acidez y mejorar la disponibilidad de nutrientes.

Los valores observados, que oscilan entre 7.33 y 6.29, se alinean con la literatura que asocia biochars alcalinos con mejoras en la calidad del suelo ácido. Sin embargo, la influencia precisa sobre parámetros como la dinámica de nutrientes y la microbiota del suelo depende de las condiciones del sitio y de la naturaleza de la biomasa de origen.

Investigaciones como la realizada por Varkolu et al. (2025), indican que el biochar elaborado a partir de la cáscara de arroz tiende a ser más alcalinos identificándose pH que varía entre 7 y 9, neutralizando de esa forma suelos ácidos que previamente pudieron haber

presentado actividades que lo acidificaron, como las plantaciones de hoja de coca, así mismo, Muhammad et al. (2022), indican que, mejora la disponibilidad de nutrientes esenciales como calcio, magnesio y potasio. Por otro lado, de acuerdo con Huang et al. (2022), incorporar compost o humus proporciona un material más estable y compatible con diferentes tipos de suelos debido a la presencia de ácidos húmicos y fúlvicos, que reducen la alcalinidad pero no intervienen en la fertilidad del suelo.

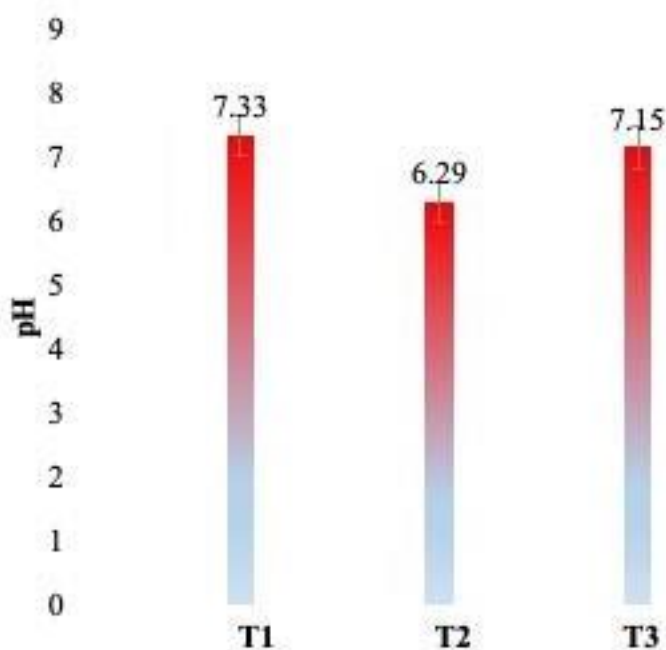


Figura 9. pH del biochar en sus tres tratamientos

4.2.2.2 Conductividad eléctrica (CE)

En la figura 10 se puede observar que los valores de CE varían significativamente entre los tres tratamientos, lo que podría estar relacionado con la concentración de sales solubles en los biochar, debido principalmente al material de origen y el grado de estabilización de cada una de la enmiendas orgánicas, por ejemplo, el valor más alto se obtuvo en el T3 (5.45 dS/m), lo que sugiere una mayor presencia de iones móviles posiblemente relacionado con Na^+ , K^+ y otros, así mismo, esto puede incrementar la fertilidad del suelo a corto plazo, y además se relaciona con la descomposición del humus, Rahmat et al (2025), en su investigación observaron que la aplicación del biochar de cascarilla de arroz en suelos latosoles incrementó el valor de CE y evidenció un aumento de la liberación de nutrientes y de carbono soluble.

En cambio, el tratamiento con compost (T2) muestra el valor más bajo de CE (0.54 dS/m), lo que refleja un mayor grado de madurez y humificación del material lo que ha reducido

las sales solubles, investigaciones realizadas por Abban-Baidoo et al. (2024), señalan que la combinación de biochar con compost disminuye la CE final del producto debido a la estabilización microbiana y por ende, reduce la inmovilización de iones durante el proceso del compostaje.

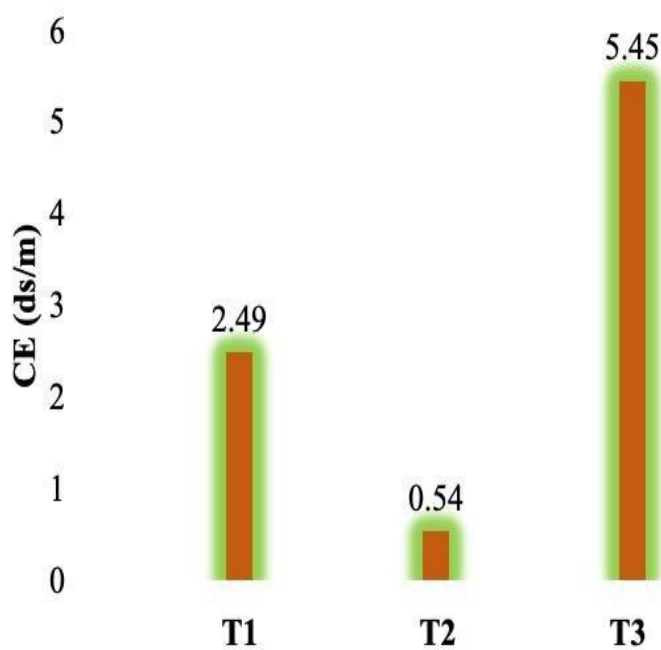


Figura 10. Conductividad eléctrica (dS/m) y los tratamientos evaluados

4.2.2.3 Nitrógeno (%)

La figura 11, muestra que existe diferencia entre los tratamientos T2 y T3, debido a que la incorporación de compos o humus aumenta el contenido total de nitrógeno en el biochar, casi duplicando el valor observado en el biochar puro (T1), particularmente, el compost aporta microorganismos activos y compuestos amínicos estables, que se van a fijar en la matriz porosa del biochar, aumentando su capacidad de retención de N^+ , tal como lo indica Li et al. (2024), quienes indican que la co-compostación con biochar incrementa el valor de N total en un 10 y 22%, debido a la pérdida por volatilización de amoníaco y a la conversión de N inorgánico en formas orgánicas que se encuentran más estables.

Por otro lado, el tratamiento con humus (T3), muestra un comportamiento similar, relacionándose con la alta actividad microbiana y el contenido de compuestos húmicos nitrogenados ya que el humus aporta formas de nitrógeno más estables, tal como lo indica Barrezueta, et al (2022).

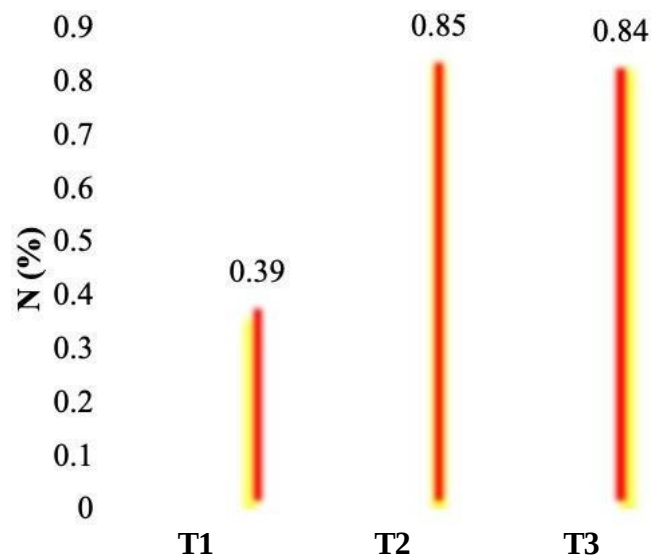


Figura 11. Nitrógeno (%) en los tratamientos evaluados

4.2.2.4 Carbono total (CT) (%)

Como se observa en la Figura 12, la cantidad de carbono total en los tres tratamientos con biochar difieren significativamente. Los rangos varían de 31.03 a 9.22 %, lo que confirma la capacidad del biochar en su estado puro conservar el carbono y evidencia una disminución del carbono total cuando el biochar se combina con compost o humus, lo cual se relaciona con la mineralización parcial de CT (%) durante el proceso de mezcla y la descomposición biológica de los materiales orgánicos complementarios.

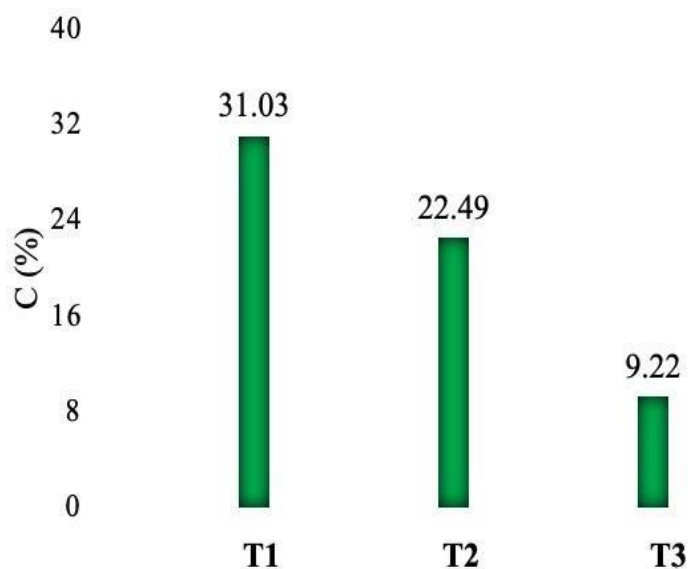


Figura 12. Relación entre el %C y los tratamientos evaluados

El biochar puro (T1) presenta el valor más alto reflejando así su naturaleza recalcitrante y alta proporción de carbono estable derivado del proceso de pirólisis, este carbono en particular posee una estructura aromática resistente a la degradación microbiana, lo que le permite contribuir al secuestro de carbono en el suelo a largo plazo, así es que, Amritha y Sankar (2021), concluyeron en su investigación que el biochar de cascarilla de arroz posee una estructura porosa y rica en compuestos aromáticos, lo que le da una alta estabilidad y potencial para almacenar carbono de forma persistente en el suelo.

Por otro lado, la combinación con compost (T2), reduce el porcentaje del carbono, que es susceptible de ser utilizado por los microorganismos durante la descomposición, además, favorece la fertilidad en el suelo, Pramono et al. (2021), demostraron que la aplicación conjunta de compost y biochar mejora el rendimiento de los suelos y mitiga emisiones de GEI. Finalmente, el tratamiento T3, presenta el valor más bajo de CT, lo que sugiere una intensa mineralización del carbono orgánico y una mayor liberación de compuestos carbonatados y CO₂, así Annisa y Setiawati (2020), han señalado que la mezcla de biochar con materia orgánica activa como el humus promueve un reciclaje más rápido del carbono, mejorando su productividad en el suelo y reduciendo la fracción de carbono estable.

4.2.2.5 Relación C/N

La relación C/N muestra diferencias marcadas entre los tratamientos, evidenciando cómo los materiales añadidos modifican la estabilidad y disponibilidad de nutrientes del biochar. El T1 (C/N = 79.17) presenta una relación muy alta, característica de un biochar recalcitrante, con baja disponibilidad de nitrógeno e impacto principalmente estructural en el suelo. En T2 (C/N = 26.59), la incorporación de compost reduce la C/N a un nivel intermedio, favoreciendo una mineralización moderada y mejor equilibrio entre estabilidad y aporte nutricional. Finalmente, T3 (C/N = 10.97) muestra la relación más baja por efecto del humus, indicando un material más maduro y rico en N. Así mismo, Delgado et al. (2019) destacan que mantener una relación C/N menor a 20 durante el compostaje favorece una buena calidad agronómica del producto final, ya que promueve la descomposición equilibrada de la materia orgánica y evita la acumulación de compuestos fitotóxicos.

Por otro lado, Vázquez et al. (2020) observaron que la incorporación de compost y vermicompost mejora la absorción de nutrientes y la materia orgánica del suelo, además de estabilizar el pH y disminuir la densidad aparente, lo que evidencia el papel del compost maduro (con baja relación C/N) en la mejora estructural y funcional del suelo.

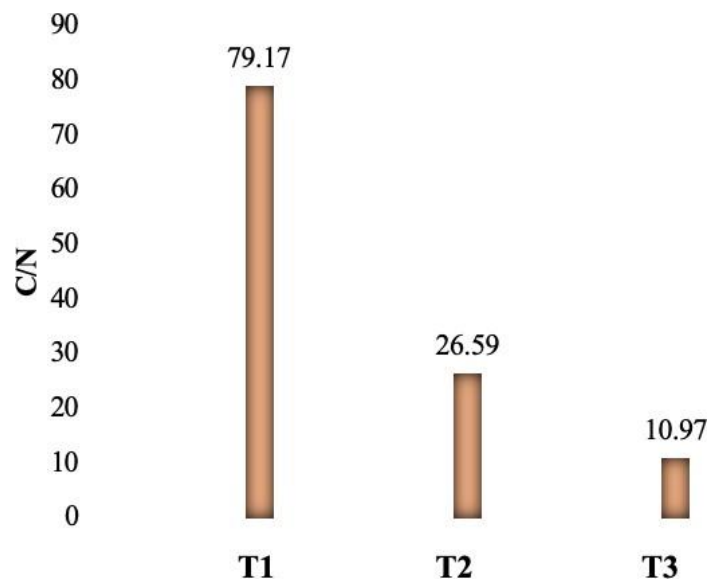


Figura 13. Relación de C/N en los tratamientos evaluados.

4.2.2.6 Humedad

De acuerdo con la figura 14, el contenido de humedad del biochar muestra un aumento progresivo entre tratamientos: T1 (4.43%), T2 (7.66%) y T3 (17.05%). Esto indica que la adición de compost y humus incrementa la capacidad del material para retener agua, probablemente por la mayor presencia de materia orgánica y porosidad.

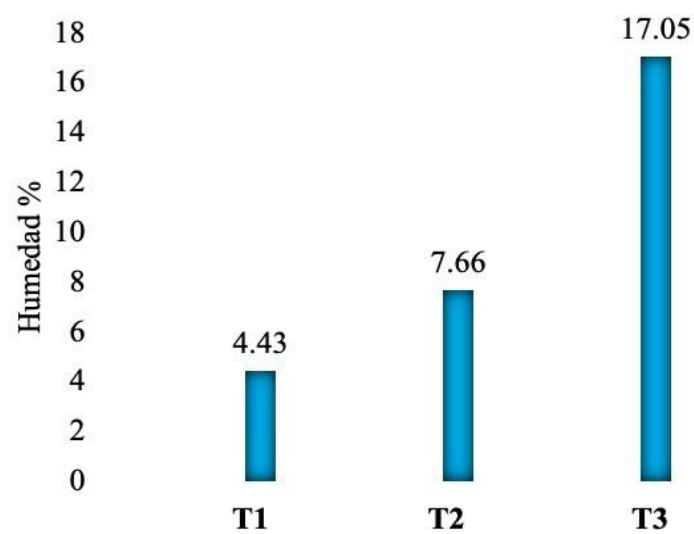


Figura 14. Humedad de los tratamientos evaluados

El incremento de humedad en el biochar con la adición de compost y humus sugiere una mejora en la capacidad de retención de agua del material, favoreciendo la estabilidad física y biológica del suelo. Según Volveras et al. (2020), los suelos con alta porosidad y contenido de materia orgánica presentan una mayor capacidad de retención hídrica y menor degradación estructural, lo que mejora la regulación de la humedad y la aireación. Así mismo, Jara-Samaniego et al. (2020), señalan que el uso de materiales estructurantes como la cascarilla de arroz en mezclas de compost y humus mejora la capacidad de retención de agua y la aireación, promoviendo una mayor madurez y calidad del producto final.

4.2.2.7 Cenizas

El contenido de ceniza del biochar muestra un incremento progresivo entre tratamientos: T1 (33.50%), T2 (47.37%) y T3 (64.52%). Este aumento indica una mayor presencia de minerales inorgánicos como calcio, potasio, fósforo y magnesio, especialmente en el tratamiento con humus (T3), lo que sugiere una mayor mineralización y concentración de nutrientes disponibles para el suelo. El aumento del contenido de ceniza en los tratamientos con compost y humus refleja un enriquecimiento mineral del biochar, favoreciendo la fertilidad del suelo. De acuerdo con Rofner y Escobar (2019), los abonos orgánicos como el compost incrementan el contenido de elementos minerales en el suelo, además, Cabello et al. (2021) señalan que los biochar con mayor proporción de cenizas poseen mejor capacidad para adsorber metales y mantener la calidad del suelo, contribuyendo a su estabilidad química y a una mayor retención de nutrientes.

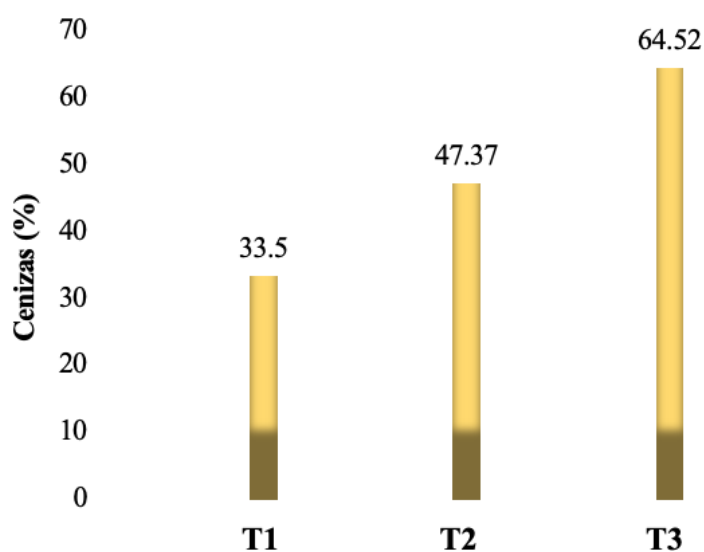


Figura 15. % Ceniza en los tratamientos evaluados

4.2.2.8 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica (MO) del biochar disminuye notoriamente entre los tratamientos: T1 (62.07%), T2 (44.98%) y T3 (18.43%). Esta reducción sugiere que la incorporación de compost y humus promueve una mayor mineralización y descomposición de la materia orgánica.

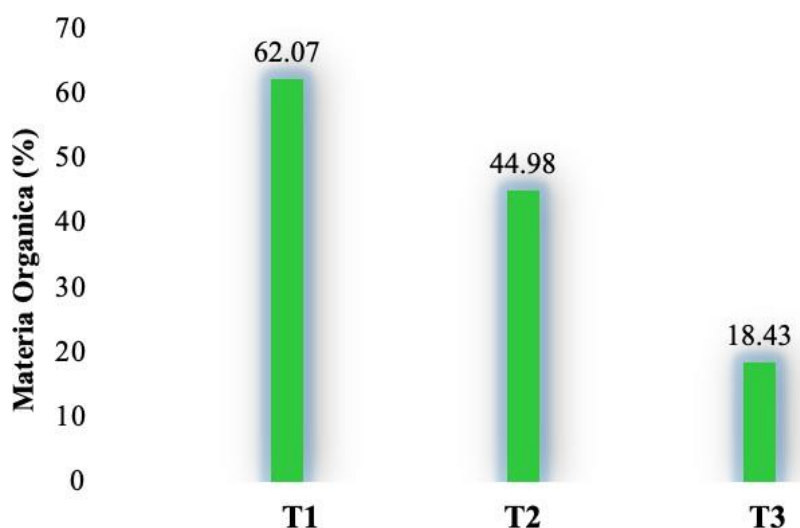


Figura 16. % MO en los tratamientos evaluados

4.2.2.9 Oxido de Fósforo P₂O₅ (%)

Los valores de P₂O₅ (%) indican un incremento importante cuando se incorpora compost o humus al biochar. El T1 (biochar solo) muestra el valor más bajo (0.22%), mientras que T2 alcanza el nivel más alto (0.76%) y T3 presenta un valor intermedio (0.49%). El incremento del fósforo disponible en el biochar tratado con compost y humus se relaciona con la capacidad de estos materiales para liberar lentamente nutrientes minerales y mejorar la estructura química del suelo, Molina et al. (2021) señalan que la fertilización orgánica con materiales ricos en fósforo, como compost o humus, mejora el reciclaje de nutrientes y contribuye al sostenimiento de la fertilidad del suelo mediante una liberación gradual del fósforo disponible para las plantas, es decir, los materiales orgánicos añadidos incrementan significativamente la disponibilidad de fósforo en el biochar, especialmente cuando se usa compost, lo que puede favorecer la fertilidad del suelo y el desarrollo vegetal.

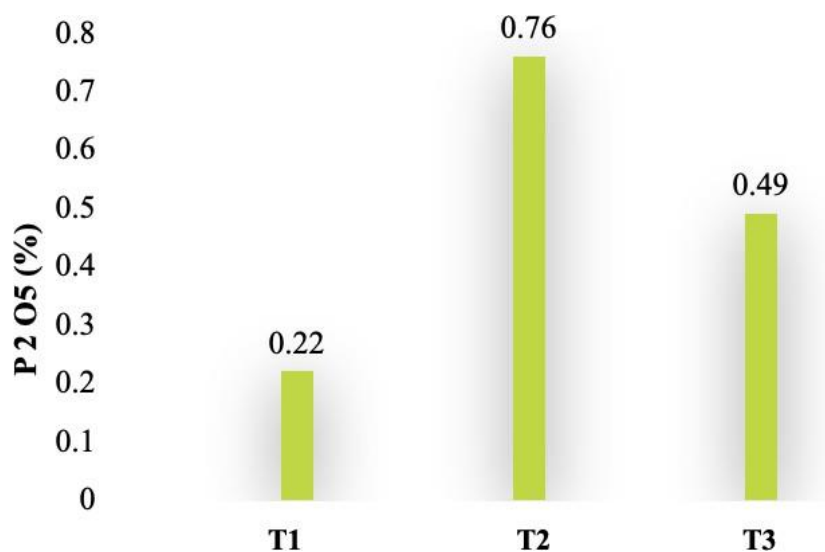


Figura 17. % P₂O₅ en los tratamientos evaluados

4.2.2.10 Elementos disponibles (ppm)

En la figura 18, se observa que el tratamiento con compost + biochar (T2) presenta los valores más altos de calcio (Ca = 5%) y potasio (K = 2.61%), mientras que el biochar solo (T1) muestra los niveles más bajos en casi todos los elementos. El humus + biochar (T3), aunque mejora respecto al T1, no alcanza los niveles de T2. Esto indica que la combinación de compost con biochar favorece la liberación y disponibilidad de nutrientes esenciales, debido a la sinergia entre la materia orgánica del compost y la capacidad de retención iónica del biochar. Además, el contenido relativamente estable de magnesio (Mg) en todos los tratamientos sugiere que este elemento no es tan sensible a las combinaciones, a diferencia de Ca y K.

De acuerdo con estudios recientes, la mezcla de biochar con compost mejora la fertilidad del suelo y la retención de nutrientes en comparación con el uso de biochar solo. Por ejemplo Alomari et al. (2024), reportaron que el uso combinado de biochar y compost aumentó significativamente los niveles de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas, mejorando también la calidad de las plantas, de forma similar Tito et al. (2025), mencionan que los composts de origen orgánico incrementan la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de Ca y Mg en comparación con el biochar solo.

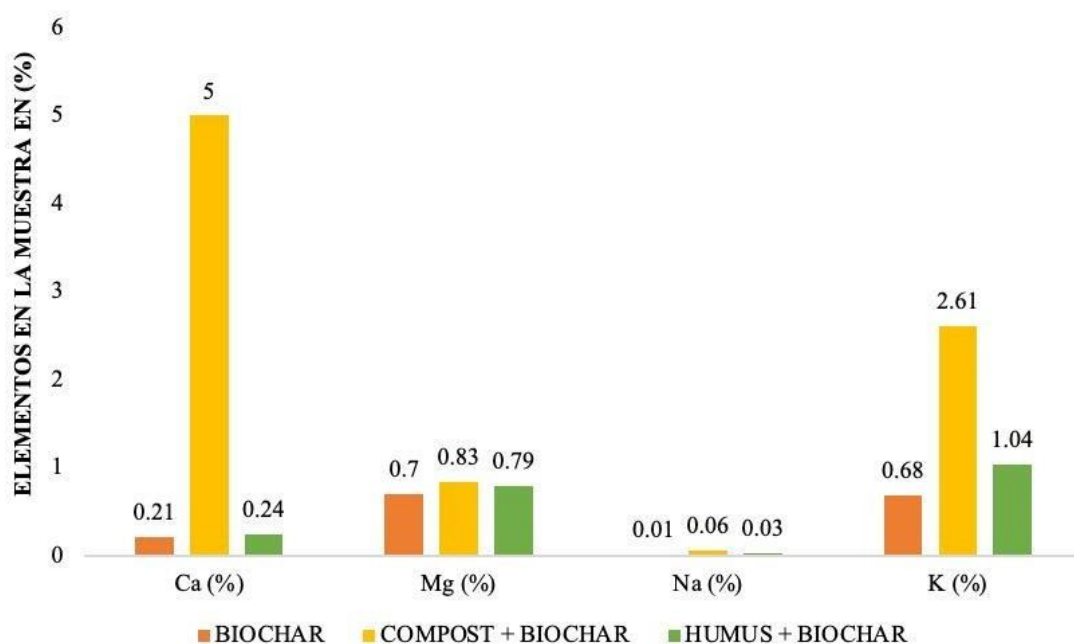


Figura 18. Calcio, magnesio, sodio y potasio (%) en los tratamientos evaluados

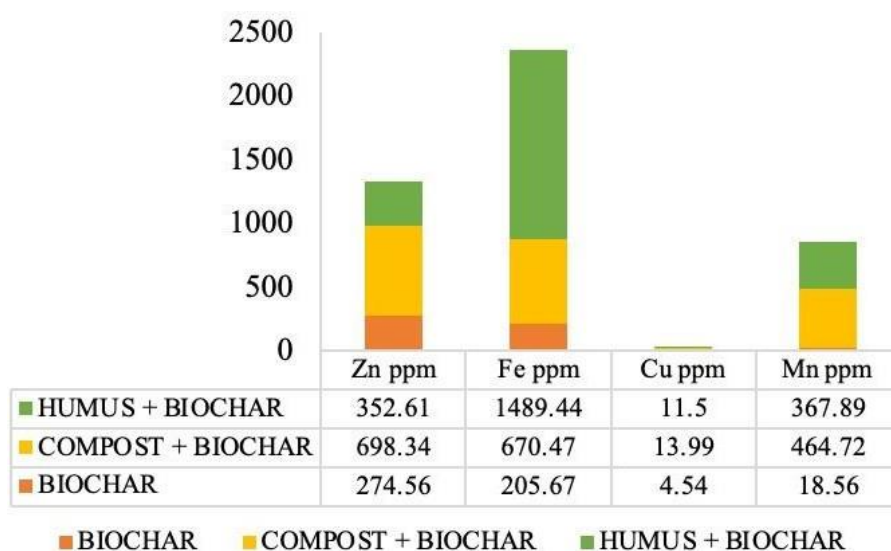


Figura 19. Zinc, hierro, cobre y manganeso (ppm) en los tratamientos evaluados

La figura 19 muestra que, el tratamiento con humus + biochar (T3) presenta los valores más altos de hierro (Fe = 1489.44 ppm) y manganeso (Mn = 367.89 ppm), mientras que el compost + biochar (T2) destaca en zinc (Zn = 698.34 ppm) y cobre (Cu = 13.99 ppm). El biochar solo (T1) presenta los niveles más bajos en todos los micronutrientes, lo que indica que la mezcla del biochar con materia orgánica (humus o compost) mejora significativamente la disponibilidad de estos elementos esenciales, ello coincide con lo descrito por Hafez y Zhang (2025), quienes, demostraron que el uso conjunto de humus y vermicompost incrementa la disponibilidad de Fe, Zn, Cu y Mn en suelos calcáreos, mejorando la estructura del suelo y la

absorción por las plantas, además, Getahun et al. (2020), encontraron que la combinación de biochar con compost o estiércol aumentó de forma significativa las concentraciones de micronutrientes como Fe, Mn, Cu y Zn.

4.3 Determinación del tiempo de estabilidad del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) mediante el test de actividad respiratoria (AT4)

La tabla 6 y la figura 20, muestran que la actividad respiratoria del suelo (AT4) disminuye progresivamente durante los cuatro días en todos los tratamientos. El biochar solo (T1) inicia con la mayor actividad (12 mg O₂/g MS) y mantiene valores más altos durante todo el periodo, mientras que biochar + compost (T2) presenta los valores más bajos, terminando con 5.2 mg O₂/g MS. Por su parte, biochar + humus (T3) muestra una respiración intermedia y más estable, indicando una descomposición más equilibrada.

Tabla 6. Datos obtenidos detector multigas SKY2000-M

DATOS: DETECTOR MULTIGAS PORTATIL SKY2000-M								
Día (0) Biochar (T1)			Día (0) Biochar + Compost (T2)			Día (0) Biochar + Humus (T3)		
CO ₂	= 4.95 g	12 mg	CO ₂	= 4.125 g	10 mg	CO ₂	= 2.89 g	7 mg
MS	= 300 g	O ₂ /g MS	MS	= 300 g	MS	MS	= 300 g	O ₂ /g MS
Día (1) Biochar (T1)			Día (1) Biochar + Compost (T2)			Día (1) Biochar + Humus (T3)		
CO ₂	= 5.36 g	12.99	CO ₂	= 4.13 g	10.01 mg	CO ₂	= 3.72 g	9.02 mg
MS	= 300 g	mg O ₂ /g MS	MS	= 300 g	O ₂ /g MS	MS	= 300 g	O ₂ /g MS
Día (2) Biochar (T1)			Día (2) Biochar + Compost (T2)			Día (2) Biochar + Humus (T3)		
CO ₂	= 4.125 g	10 mg	CO ₂	= 2.89 g	7 mg	CO ₂	= 3.72 g	9.01 mg
MS	= 300 g	O ₂ /g MS	MS	= 300 g	MS	MS	= 300 g	O ₂ /g MS
Día (3) Biochar (T1)			Día (3) Biochar + Compost (T2)			Día (3) Biochar + Humus (T3)		
CO ₂	= 3.71 g	8.99 mg	CO ₂	= 3.09 g	7.49 mg	CO ₂	= 3.3 g	8 mg
MS	= 300 g	O ₂ /g MS	MS	= 300 g	MS	MS	= 300 g	O ₂ /g MS

Día (4) Biochar (T1)			Día (4) Biochar + Compost (T2)			Día (4) Biochar + Humus (T3)		
CO ₂	= 2.68 g	6.496 mg O ₂ /g MS	CO ₂	= 2.145 g	5.20 mg O ₂ /g MS	CO ₂	= 2.68 g	6.496 mg O ₂ /g MS
MS	= 300 g		MS	= 300 g		MS	= 300 g	

Factor de conversión masa molares:

$$\text{Masa molar: } \frac{32\text{g O}_2}{44\text{g CO}_2} \approx 0.727$$

$$\frac{\text{mgO}_2}{\text{g MS}} = \left(\frac{\text{gramos CO}_2 \text{ producido} \times 0.727 \times 1000}{\text{gramos Materia Seca (MS)}} \right)$$

Tabla 7. Actividad respiratoria de los 3 tratamientos evaluados durante los 4 días

Días	AT ₄ (mg O ₂ /g MS)		
	T1(Biochar Cascarilla de arroz)	T2(Biochar Cascarilla de arroz + compost)	T3(Biochar Cascarilla de arroz + humus)
0	12	10	7
1	13	10	9
2	10	7	9
3	9	7.5	8
4	6.5	5.2	6.5

Mikajlo et al. (2024), observaron que el biochar compostado incrementa la actividad microbiana y la estabilidad del carbono del suelo más que el biochar aplicado directamente, debido a que la combinación promueve una descomposición más lenta y controlada de la materia orgánica. Esto coincide con la tendencia del T2 y T3, donde la respiración disminuye con el tiempo, reflejando una comunidad microbiana más eficiente en el uso del carbono. De forma similar, Hammerschmiedt et al. (2021), encontraron que la combinación de biochar con sustancias húmicas aumentó la biomasa microbiana y la actividad enzimática, pero con menor tasa de respiración, indicando una estabilización del carbono y un metabolismo microbiano más equilibrado.

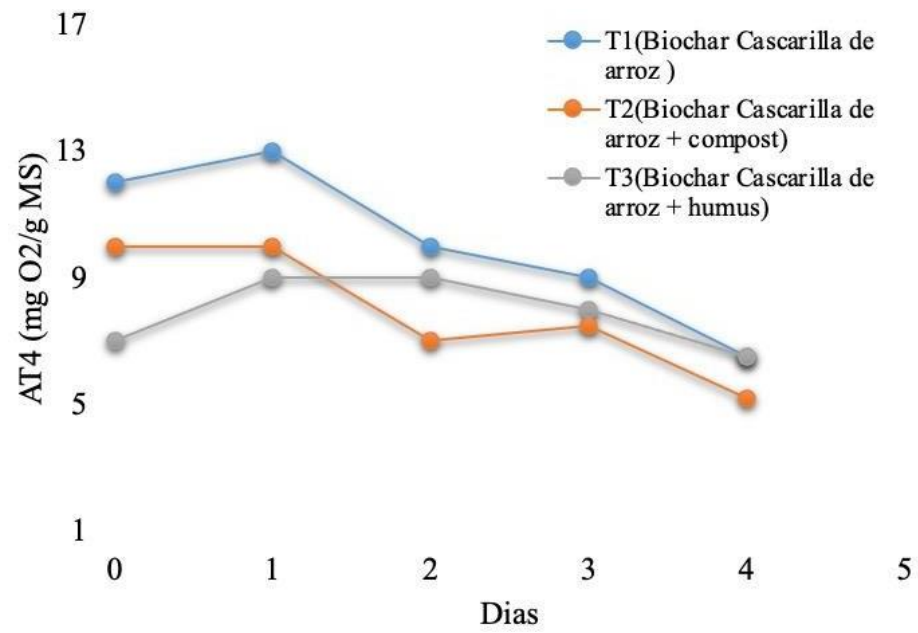


Figura 20. Variación de la actividad respiratoria de los 3 tratamientos en relación al tiempo (días).

V. CONCLUSIONES

1. El rendimiento del biochar de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), obtenido fue de 36.15%, donde este proceso se llevó a cabo en un tiempo de 3 horas y para homogeneidad de la muestra total un promedio entre 48 a 72 horas promedio, con una temperatura de 321.22 °C. Desarrollado mediante una pirolisis lenta la cual favorece a descomponer la parte lignocelulósica de la cascarilla de arroz, transformándola en material carbonoso. Los errores más frecuentes que podrían influenciar o alterar el resultado obtenido en una pirolisis lenta serían los cambios de temperatura, el control de oxígeno, la biomasa y el tiempo de residencia, que podría alterar la producción del Biochar y calidad de la misma.
2. Los biochars elaborados con cascarilla de arroz muestran que la forma y tamaño del material se conservan, mientras que químicamente el pH es más alto en el biochar puro (7.33) y se estabiliza al mezclarse con compost o humus. La conductividad eléctrica es mayor en el biochar con humus (5.45 dS/m), y el nitrógeno alcanza su valor más alto en la mezcla con compost (0.85%). El carbono total no presenta diferencias importantes entre tratamientos, aunque las relaciones C/N son muy elevadas, indicando baja disponibilidad de nitrógeno. La humedad es mayor en el biochar con humus (10.26%) y los contenidos de cenizas (33.50–64.52%) reflejan una combustión moderada. La materia orgánica destaca en el biochar puro (62.07%), y finalmente, los elementos C, P, K, Cu, Mg y Zn no muestran variaciones significativas entre tratamientos.
3. La estabilidad del biochar mediante el test de actividad respiratoria AT4, para el cuarto día tenemos al T1(6.5) (mg O₂/g MS), al T2 (5.2) (mg O₂/g MS), y al T3 (6.5) (mg O₂/g MS), pero en promedio mostró que, la mayor actividad respiratoria lo presentó el biochar solo con cascarilla de arroz con un promedio de consumo de oxígeno de 10.1 (mg O₂/g MS), seguido del biochar cascarilla de arroz + compost de 7.94 (mg O₂/g MS), y finalmente, el biochar cascarilla de arroz + humus) de 7.9 (mg O₂/g MS). Si los tratamientos evaluados superarían los 7 mg O₂/gMS, se considera una muestra biológicamente inestable, indicaría una alta tasa de consumo de oxígeno (respiración), evidenciaría una gran cantidad de materia orgánica no carbonizada, que podría generar desequilibrio biológico en el suelo, emisiones de gases de efecto invernadero hasta fitotoxicidad.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Optimizar el proceso de pirólisis, mejorando el diseño del reactor y el manejo de los co-productos (como gases y vapores) para aprovecharlos como fuente de energía en sistemas de calefacción o cocinas eficientes.
2. Realizar estudios técnicos sobre las emisiones generadas durante la pirólisis, con el fin de conocer mejor los gases producidos y así mejorar la eficiencia y seguridad del proceso.
3. Unificar métodos de análisis del biochar, estableciendo criterios y lineamientos estándar que permitan comparar resultados entre investigaciones y asegurar la calidad del producto.
4. Evaluar la aplicación del biochar en diferentes suelos, realizando pruebas que definan las dosis adecuadas para cada tipo de suelo y cultivo, considerando un riesgo dual de metales pesados como fuente contaminante o de remediación, para su uso agrícola responsable.
5. Promover la difusión de esta tecnología, especialmente en el sector agropecuario, para impulsar el aprovechamiento de residuos orgánicos y el cumplimiento de las normas ambientales vigentes.
6. Realizar las pruebas de estabilidad a través del test de actividad respiratoria AT4, ya que es una herramienta normada en países europeos antes de los procesos de vertimientos.
7. Considerar la evaluación del consumo en el test AT4, utilizando el equipo Oxitop, para obtener un resultado directo y no tener que reemplazar los datos mediante fórmulas.

VII. REFERENCIAS

- Abad, E. (2022). Aplicación de Biochar a partir de biomasa residual de Bolaina blanca (Guazuma Crinita C.martius) en el suelo agrícola para mejorar la producción del tomate regional (Costoluto Fiorentino) distrito de Yarinacocha, Ucayali 2019 – 2020. [Tesis pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio UDH <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/123456789/3375>.
- Abban-Baidoo, E., Manka'abusi, D., Apuri, L., Marschner, B., & Frimpong, K. (2024). Biochar addition influences C and N dynamics during biochar co-composting and the nutrient content of the biochar co-compost. *Scientific Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67884-z>.
- Amritha, K., & Sankar, S. (2021). Surface morphology and structural characteristics of rice husk, its biochar and vermicompost. *Journal of Natural Resource Conservation and Management*. <https://doi.org/10.51396/anrcm.2.2.2021.114-119>.
- Annisa, W., & Setiawati, E. (2020). Benefits of Biochar Compost (BIOCHOM) to Yield Rice Productivity on Tropical Swampland, South Kalimantan, Indonesia. *BIO Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202001009>.
- Arziyah, D., Kasim, A., Asben, A., & Busniah, M. (2025). Analysis of the chemical content of coconut husk as a raw material for furfural production. *J. Appl. Agric. Sci. Technol.*, 9 (2025), pp. 413-424, 10.55043/jaast.v9i3.393
- Barrezueta, S., Rizzo, J., & Añazco, H. (2022). Efecto del abono orgánico con biocarbón sobre las características morfológicas de mazorca de Theobroma cacao CCN51. *Ciencia y Agricultura*, 19(2), 1-12. <https://doi.org/10.19053/01228420.v19.n2.2022.14265>
- Cabello, R., Romero, J., Valdiviezo, L., Munive, R., & Castañeda, C. (2021). Biochar derived from pig manure with ability to reduce the availability of Pb in contaminated agricultural soils. *Scientia Agropecuaria*. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.050>.
- Chuquiyauri, M. (2021). Efectos del biochar de cascarilla de Oryza sativa (arroz) sobre daphnia magna (pulga de agua) y lactuca sativa (lechuga), en fase de laboratorio, Lima – Perú. [Tesis pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS, <https://repositorio.unas.edu.pe/items/712666ac-5590-4fad-aec6-aa2fd332f26f>.
- Dai, W., Bao, Z., Meng, J., Chen, T., & Liang, X. (2025). Biochar Makes Soil Organic Carbon More Labile, but Its Carbon Sequestration Potential Remains Large in an Alternate

- Wetting and Drying Paddy Ecosystem. *Agronomy*, 15(7), 1547. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071547>
- Delgado, M., Mendoza, K., González, M., Tadeo, J., & Martín, J. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 35(4),965-977. DOI: 10.20937/RICA.2019.35.04.15
- Derdag, S. M., & Ouazzani, N. (2025). Advancements in Sustainable Biochar Production from Waste: Pathways for Renewable Energy Generation and Environmental Remediation. *Biomass*, 5(2), 32. <https://doi.org/10.3390/biomass5020032>
- FAO. (2023). Global report on food crises. [En línea] <https://www.fsinplatform.org/sites/default/files/resources/files/GRFC2023-hi-res.pdf>
- Fasabi, I. (2023). Efecto de la incorporación del biochar de origen orgánico (cascarilla de arroz) en la calidad del suelo agrícola contaminado, Colpa Baja, Huánuco, 2022. [Tesis pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio UDH, <https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/4177>.
- Garau, M., Pinna, M., Nieddu, M., Castaldi, P., & Garau, G. (2024). Mixing Compost and Biochar Can Enhance the Chemical and Biological Recovery of Soils Contaminated by Potentially Toxic Elements. *Plants*, 13. <https://doi.org/10.3390/plants13020284>.
- Grupo Tragsa. (2021). Estudio para la determinación de la eficiencia en el tratamiento de residuos en plantas TMB [Archivo PDF]. Miteco. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgecocir/vertederos/Estudio%20para%20la%20determinacion%20de%20la%20eficiencia%20en%20el%20tratamiento%20de%20residuos%20en%20plantas%20TMB%20espa%C3%B1olas.pdf#:~:text=Este%20tipo%20de%20test%20se%20basa%20en,se%20mide%20el%20consumo%20de%20ox%C3%ADgeno%20a>
- Hafez, M., Zhang, Z., Younis, M., Abdelhamid, M., & Rashad, M. (2025). Enhancing Micronutrient Availability Through Humic Substances and Vermicompost While Growing Artichoke Plants in Calcareous Soil: Insights from a Two-Year Field Study. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14081224>.
- Hammerschmiedt, T., Holátko, J., Pecina, V., Húška, D., Látal, O., Kintl, A., Radziemska, M., Muhammad, S., Gusiatin, Z., Kolácková, M., Nasir, M., Baltazár, T., Ahmed, N., & Brtnický, M. (2021). Assessing the potential of biochar aged by humic substances to enhance plant growth and soil biological activity. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00242-7>.

- Hernandez, A. (2023). Efecto de la aplicación de biochar durante el proceso de compostaje en un sistema de compostaje en pila. [Tesis pregrado, Universidad de la Laguna]. Repositorio RIULL, <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/37453>
- Huang, J., Zhu, C., Kong, Y., Cao, X., Zhu, L., Zhang, Y., Ning, Y., Tian, W., Zhang, H., Yu, Y., & Zhang, J. (2022). Biochar Application Alleviated Rice Salt Stress via Modifying Soil Properties and Regulating Soil Bacterial Abundance and Community Structure. *Agronomy*, 12(2), 409. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020409>
- Jara, J., Gallegos, J., & Pullopaxi, A. (2020). Biotransformación de residuos orgánicos generados en la escuela superior politécnica de Chimborazo-Ecuador mediante compostaje. 21, 202-221. <https://doi.org/10.15517/isucr.v21i44.43944>.
- Khedulkar, A. P., Pandit, B., & Doong, R. A. (2023). Agricultural waste to real worth biochar as a sustainable material for supercapacitor. *Science of the Total Environment*, 869, 161441.
- Kusuma, H. S., Az-Zahra, K. D., Saputri, R. W., Utomo, M. D. P., Jaya, D. E. C., Amenaghawon, A. N., & Darmokoesoemo, H. (2024). Unlocking the potential of agricultural waste as biochar for sustainable biodiesel production: a comprehensive review. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101848.
- Kumar, A., & Bhattacharya, T. (2021). Biochar: a sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 6642-6680.
- Li, M., Jiang, H., Li, R., Liu, W., Xie, Y., Wu, W., Liu, D., Wu, M., & Qiu, Z. (2024). Effects of biochar-loaded microbial agent in regulating nitrogen transformation and integration into humification for straw composting. *Bioresource technology*, 131873 . <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131873>.
- Li, Z., Zheng, Z., Li, H., Xu, D., Li, X., Xiang, L. y Tu, S. (2023). Revisión del biocarbón de cáscara de arroz como adsorbente para la remediación de suelos y aguas. *Plants* , 12 (7), 1524. <https://doi.org/10.3390/plants12071524>
- Machado, M., Eustáquio, T., Rodrigues, F., Unsonst, H., Didonet, M., Martins, A. (2024). Caracterização do biochar proveniente do endocarpo da macaúba (*Acrocomia aculeata*) e seu uso para melhoria na fertilidade do solo. v. 19 n. 1 (2024): Anais do XII Congresso Brasileiro de Agroecologia, Rio de Janeiro, RJ. <https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/7989>

- Manyà, M. Azuara, J.A. Manso. (2018). Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: seeking the best operating conditions. *Biomass Bioenergy*, 117 (2018), pp. 115-123, 10.1016/j.biombioe.2018.07.019
- Mikajlo, I., Lerch, T., Louvel, B., Hynšt, J., Záhora, J., & Pourrut, B. (2024). Composted biochar versus compost with biochar: effects on soil properties and plant growth. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00379-2>.
- MINAM. (2016). Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Sequía 2016-2030. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/LUCHA-CONTRA-LA-DESERTIFICACION-Y-LA-SEQUIA-2016-2030.pdf>
- MINAM. (2017). Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, aprobado con D.L N°1278. [En línea]: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N%C2%B0-1278.pdf>
- MINEM. (2019). Resolución Ministerial N.º 376-2019-MINEM/DM “ Relación PriOryzada de Sitios Impactados por Actividades de Hidrocarburos”. <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/363679-376-2019-minem-dm>
- Molina, J., Cabrales, L., Pachajoa, L., Buitrago, M., & Suárez, Y. (2021). Producción de hojarasca y su aporte de nutrientes en cacao bajo diferentes esquemas de fertilización, Rionegro-Santander. *Agronomía Costarricense*, 45, 193-206. <https://doi.org/10.15517/rac.v45i1.45790>.
- Motta-Machicado, L. A. (2024). Aprovechamiento de residuos sólidos de la agroindustria en la remoción de contaminantes, un estudio de revisión. *Revista Biodiversidad Amazónica*, 3(1), e295-e295.
- Muhammad Numan Khan, Dongchu Li, Asad Shah, Jing Huang, Lu Zhang, Avelino Núñez-Delgado, Tainfu Han, Jiangxue Du, Sehrish Ali, Tanveer Ali Sial, Zhilong Lan, Sikandar Hayat, Yi Song, Yijing Bai, Huimin Zhang. (2022). The impact of pristine and modified rice straw biochar on the emission of greenhouse gases from a red acidic soil. *Environmental Research*, 208, 112676. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112676>.
- Olunusi Samuel Olugbenga, Promise Goodness Adeleye, Sunday Blessing Oladipupo, Aderemi Timothy Adeleye, Kingsley Igenepo John. (2024). Biomass-derived biochar in wastewater treatment- a circular economy approach. *Waste Management Bulletin*, 1(4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.07.007>.
- Ogawa M, Okimori Y. (2010) Pioneering works in biochar research, Japan. *Australian Journal of Soil Research* 48, 489–500. <https://doi.org/10.1071/SR10006>

- OEFA. (2022). Inventario Nacional de Areas Degradadas por Residuos Sólidos. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3296015/Resolucion%2000018-2022-OEFA-DSIS.pdf.pdf?v=1656347766>
- Palacios, R., Calle, J., & Césare, M. (2023). Análisis de estabilidad de biochar de residuos agroforestales. *Acta Agronómica*, 71(4), 377–387. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n4.94948>.
- Pramono, A., Adriany, T., Yulianingsih, E., Sopiawati, T., & Hervani, A. (2021). Combined compost with biochar application to mitigate greenhouse gas emission in paddy field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 653. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012109>.
- Pérez, C., Juárez, P., Anzaldo, J., Alia, I., Salcedo, E., Guillén, D., & Castro, R. (2021). Chemical characterization of biochar from sugarcane tips produced by hydrothermal carbonization and addition of organic catalysts. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>
- Ponce, A. (2025). Uso de biochar para la recuperación de suelos agrícolas en la finca “García”, parroquia la “Unión”. [Tesis pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí], Repositorio digital UNESUM, <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/7939>
- Qian, S., Zhou, X., Fu, Y., Song, B., Yan, H., Chen, Z., ... & Lai, C. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the total environment*, 870, 162024.
- Rahmat, A., Agustin, L., Indriyani, ., Lukman, M., Alfakihuddin, B., Nurhayati, S., Kiswondo, S., Amilia, E., , A., Saefullah, A., Saefuddin, R., & Mutolib, A. (2025). Characteristics of latosol soil after application of rice husk biochar in Bogor Regency, Indonesia. *BIO Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515501018>.
- Rofner, N., & Escobar, F. (2019). Efecto de compost y npk sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.503>.
- Shristi S., Francis, A., Rado, G., Tandra, M., Partha, S., & Winny R.. (2025). A comprehensive characterization of tender coconut waste biochar produced through slow pyrolysis at different temperatures and heating rates. *Biomass and Bioenergy*, 207, 108728. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108728>.

- Song, B., Almatrafi, E., Tan, X., Luo, S., Xiong, W., Zhou, C., ... & Gong, J. (2022). Biochar-based agricultural soil management: An application-dependent strategy for contributing to carbon neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112529.
- Sumari, C. (2023). Caracterización y toxicidad del biochar obtenido a partir de la pirólisis de cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándano. [Tesis pregrado, Universidad Científica del Sur]. Repositorio Científica, <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/2737>.
- Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts*, 15(3), 243. <https://doi.org/10.3390/catal15030243>
- Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). The incorporation of organic amendments in the form of compost and vermicompost reduces the negative effects of monoculture in soils. *Scientia Agropecuaria*, 11, 105-112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12>.
- Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M. A., & Gosgot, W. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 43-56.
- Vismaya Uday, P.S. Harikrishnan, Kanchan Deoli, Faiza Zitouni, Jürgen Mahlke, Manish Kumar. (2022). Current trends in production, morphology, and real-world environmental applications of biochar for the promotion of sustainability. *Bioresource Technology*, 359, 127467. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127467>.
- Weber, K., Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217 (2018), pp. 240-261, [10.1016/j.fuel.2017.12.054](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054)
- Yuwen Zhou, Shiyi Qin, Shivpal Verma, Taner Sar, Surendra Sarsaiya, Balasubramani Ravindran, Tao Liu, Raveendran Sindhu, Anil Kumar Patel, Parameswaran Binod, Sunita Varjani, Reeta Rani Singhania, Zengqiang Zhang, Mukesh Kumar Awasthi. (2021). Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review. *Bioresource Technology*. 337, 125451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451>.
- Zhang, Y. Ji, C. Li, Y. Zhang, S. Sun, Y. Xu, L. Jiang, C. Wu. (2023). The application of biochar for CO₂ capture: influence of biochar preparation and CO₂ capture reactors. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 62 (2023), pp. 17168-17181, [10.1021/acs.iecr.3c00445](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00445)

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Datos de la investigación



1. DATOS																									
SOLICITANTE:		PONCE CABANILLAS LUIS				MUESTREADO POR:				EL SOLICITANTE															
PROCEDENCIA		TOCACHE - SAN MARTIN				FECHA DE REPORTE:				12/07/2025															
MUESTRA:		SUSTRATOS				RECIBO N° :				910519															
REFERENCIA:						MUESTREADO POR:				EL SOLICITANTE															
2. RESULTADOS DEL ANALISIS SOLICITADO																									
DATOS DE LA MUESTRA				RESULTADOS		RESULTADOS EN BASE HUMEDA										RESULTADOS EN BASE SECA									
Código	Dato	PH (1:1)	CE (dS/m)	Humedad (%)	Materia Seca (%)	Materia Organica (%)	Carbón (%)	C (%)	N (%)	C/N	P ₂ O ₅ (%)	Ca (%)	Mg (%)	Na (%)	K (%)	Zn ppm	Fe ppm	Cu ppm	Mn ppm						
E25-0248	BIOCAM	7.33	2.49	4.43	95.57	62.07	33.50	31.03	0.39	79.17	0.22	0.21	0.70	0.01	0.68	274.56	205.67	4.54	18.56						
E25-0249	COMPOST + BIOCAM	6.29	0.54	7.66	92.34	44.98	47.37	22.49	0.85	26.59	0.76	5.00	0.83	0.06	2.61	698.34	670.47	13.99	464.72						
E25-0250	RIUMES + BIOCAM	7.15	5.45	17.05	82.95	18.43	64.52	9.22	0.84	10.97	0.49	0.24	0.79	0.03	1.04	352.61	1489.44	11.50	367.89						



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María



Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Anexo 2. Medios probatorios de la investigación



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CARTA N°001-2025-ILCPC

PARA : Ing. Vidal Gonzales Zavaleta
Alcalde Municipalidad provincial de Tocache

DE : Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas
Testista EPIA – UNAS - Tingo María - Huánuco

ATENCIÓN : GERENCIA DE DESARROLLO AMBIENTAL

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TOCACHE
TRAMITE DOCUMENTARIO

24 FEB. 2025

FECHA 16-37
N.º 2975 FOLIOS 02

ASUNTO : Solicito permiso para desarrollar la producción de BIOCHAR de cascarilla de arroz, a pequeña escala, como parte de la ejecución de mi proyecto de tesis titulado: Estabilidad del Biochar de Cascarilla de Arroz (ORYZA SATIVA) Mediante el Test de Actividad Respiratoria (AT4).

FECHA : Tocache, 24 de febrero de 2025.

Mediante la presente me es muy grato dirigirme a usted para saludarlo al mismo tiempo desearle éxitos en sus funciones laborales. A la vez manifestarle lo siguiente:

Que habiéndose iniciado la ejecución del proyecto de tesis "Estabilidad del Biochar de Cascarilla de Arroz (ORYZA SATIVA) Mediante el Test de Actividad Respiratoria (AT4).", realizada por el Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas con DNI 46470602. Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental en la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Habiendo iniciado la ejecución de mi tesis y como parte del proceso se tiene que solicitar la autorización debida para obtener las muestras de BIOCHAR de cascarilla de arroz, en menor escala mediante (calderas transportables metálicas autoconstruidas) en las instalaciones de la Planta de Valorización de Pucayacu, de la Municipalidad Provincial de Tocache. Considerando que una vez recibida la autorización se realizará la estructuración de las calderas transportables metálicas autoconstruidas con la metodología Kon-Tiki, para crear las muestras de biochar y llevar las muestras a laboratorio para la evaluación correspondiente. En un promedio de tiempo de 2 a 3 meses aproximadamente.

Este documento es necesario para la validación de mi trabajo de investigación, lo cual es relevante para la evaluación de mi tesis.

Cualquier consulta o comunicación mi número de teléfono es 949185731 o al correo lucarponca_11@hotmail.com

Muy agradecido por su colaboración en esta investigación me despido de usted no sin antes reiterarle las muestras de mi especial consideración y estima personal. Quedo a la espera de su pronta respuesta.


Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas
DNI: 46470602



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CARTA N°002-2025-ILCPC

PARA : ESTIMADOS MIEMBROS DEL JURADO Y ASESOR

Presidente : Mblgo. MSc. LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO

Miembro : Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ

Miembro : Ing. MSc. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO

Suplente : Blgo. MSc. CESAR AUGUSTO GOZME SULCA

Asesor : Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO

DE : Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas

Tecista EPIA – UNAS -Tingo María – Huánuco.

ASUNTO : INVITACIÓN PARA LA VERIFICACIÓN IN SITU, del desarrollo del primer objetivo de la Tesis titulado "Estabilidad del Biochar de Cascarilla de Arroz (ORYZA SATIVA) Mediante el Test de Actividad Respiratoria (AT4)". Donde se desarrolla la estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa).

FECHA : Las fechas de programación para la visita sería los días jueves 05 o viernes 06 de junio según disposición de los miembros del jurado y asesor.

Mediante la presente me es muy grato dirigirme a ustedes para saludarlo al mismo tiempo deseándole éxitos en sus labores académicas. A la vez manifestarle lo siguiente:

Que habiéndose iniciado la ejecución del proyecto de tesis "Estabilidad del Biochar de Cascarilla de Arroz (ORYZA SATIVA) Mediante el Test de Actividad Respiratoria (AT4)." Realizado por el Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas con DNI 46470602, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental en la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Teniendo como desarrollo del primer objetivo la estimación de la producción del biochar de cascarilla de arroz (Oryza sativa), en menor escala mediante (calderas transportables metálicas autoconstruidas) con la metodología Kon-Tiki. En las instalaciones de la Planta de Valorización Pucayacu, de la Municipalidad Provincial de Tocache, en la ciudad de Tocache.

Considerando que todos los gastos logísticos que implique la visita será cubierta en su totalidad por el tesista, cualquier consulta o comunicación mi número de teléfono es 949185731 o al correo carlos.ponce@unas.edu.pe

Esperando tener el honor de sus visitas me despido de ustedes no sin antes reiterarle las muestras de mi especial consideración y estima personal. Quedo a la espera de su pronta respuesta.

Bach. Luis Carlos Ponce Cabanillas
 DNI: 46470602

Anexo 3. Panel fotográfico

Figura 21. Preparación de Horno pirolítico KON TIKI



Figura 22. Ambiente diseñada para la producción de biochar en pequeña escala



Figura 23. Primeras pruebas para la producción de Biochar



Figura 24. Diseño con mejor resultado en la producción de biochar por la homogeneidad.



Figura 25. Proceso del desarrollo de la producción de biochar



Figura 26. Muestras obtenidas tras resultado de producción de biochar



Figura 27. Verificación de la Producción de biochar a pequeña escala IN SITU



Figura 28. Verificación de las muestras de biochar obtenidas tras la pirolisis



Figura 29. Muestras de Humus, Compost y Biochar



Figura 30. Extracción de la solución (p/v) luego de la centrifugación.



Figura 31. Muestras evaluadas para los análisis comparativos.



Figura 32. Equipo para evaluación de la estabilidad respiratoria método AT4



Figura 33. Toma de datos con el detector multigas SKY2000-M.



Figura 34. Evaluación diaria de las muestras en el T1, T2 y T3.