



Universidad
Nacional
Villa María

Biblioteca Central "Vicerrector Ricardo A. Podestá"
Repositorio Institucional

Estudio de Digestatos y Biocarbones: aplicación en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa

Año
2025

Autora
Martínez, Daiana Soledad

Directoras de tesis
Galván, María José y Rodríguez, María Jimena

Este documento está disponible para su consulta y descarga en el portal on line de la Biblioteca Central "Vicerrector Ricardo Alberto Podestá", en el Repositorio Institucional de la **Universidad Nacional de Villa María**.

CITA SUGERIDA

Martínez, D. S. (2025). *Estudio de Digestatos y Biocarbones: aplicación en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa*. [Trabajo final de grado, Universidad Nacional Villa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Villa María. http://biblio.unvm.edu.ar/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=48758



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional



Universidad Nacional de Villa María

Instituto A. P. Ciencias Básicas y Aplicadas

**Trabajo Final de Grado para optar al título de Licenciada en
Ambiente y Energías Renovables**

**ESTUDIO DE DIGESTATOS Y BIOCARBONES:
APLICACIÓN EN UN SUELO
REPRESENTATIVO DE LA PLANICIE
FLUVIOEÓLICA CENTRAL CORDOBESA**

AUTORA

Daiana Soledad Martínez

Villa María – Córdoba

Diciembre 2025

**ESTUDIO DE DIGESTATOS Y BIOCARBONES: APLICACIÓN EN UN
SUELO REPRESENTATIVO DE LA PLANICIE FLUVIOEÓLICA
CENTRAL CORDOBESA**

Universidad Nacional de Villa María

Instituto A.P. de Ciencias Básicas y Aplicadas

Título del Trabajo Final de Grado:

Autor:

Director:

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Tribunal evaluador (Art. N° 15, Res. N° 48/2000 del Consejo Superior)

.....
Nombre y apellido	Firma

.....
Nombre y apellido	Firma

.....
Nombre y apellido	Firma

.....
Nombre y apellido	Firma

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Asesor (Art. N° 2, Res. 77/2006 del Consejo Directivo IAP Ciencias Básicas y Aplicadas)

.....
Nombre y apellido	Firma

Universidad Nacional de Villa María
Instituto Académico Pedagógico de Ciencias Básicas y
Aplicadas

Trabajo Final de Grado para optar al título de
Licenciada en Ambiente y Energías Renovables

ESTUDIO DE DIGESTATOS Y BIOCARBONES:
APLICACIÓN EN UN SUELO
REPRESENTATIVO DE LA PLANICIE
FLUVIOEÓLICA CENTRAL CORDOBESA

AUTORA

Daiana Soledad Martínez

DIRECTORA

Dra. María José Galván

Co-DIRECTORA

Dra. María Jimena Rodríguez

Villa María - Córdoba

Diciembre 2025

DEDICATORIA:

A MIS QUERIDOS PADRES, HERMANOS Y MI AMADA ABUELA.

Hoy, al alcanzar este gran logro en mi vida, no puedo evitar voltear atrás y recordar cada paso del camino que me ha traído hasta aquí. Este triunfo no es solo mío, sino de ustedes, que con amor, sacrificio y apoyo incondicional me han acompañado durante este gratificante camino.

A mi Mamá Griselda y a mis hermanos Alejandro y Belén, porque son mi pilar, porque me dieron la oportunidad de tener estudios universitarios, porque me apoyaron y mantuvieron la confianza en mí. Porque me acompañaron, me motivaron y se alegraron mis logros, conmigo. Por qué me apoyaron en mis largas noches de estudio, porque soñaron conmigo y por qué me recordaron que no estuve sola en este camino.

A mi Papá Mariano, por creer en mí desde siempre, porque me demostró su amor haciendo su mayor inversión que fue mi educación y bienestar. Soy muy afortunada, estas en mí para siempre.

A mi querida abuela Vicenta por ser una visionaria, creer en sus nietos y por ser la iniciadora de nuestra vida universitaria en Villa María.

AGRADECIMIENTOS:

Al finalizar esta etapa tan significativa de mi vida, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han sido fundamentales en este camino.

A mi directora María José Galván y Co-directora María Jimena Rodríguez por darme una oportunidad, por confiar en mí, por permitirme aprender y proyectar a su lado, por su generosidad y su apoyo. A ambas les agradezco poder haber recibido en todo este tiempo sus saberes, su profesionalismo y cariño.

A la Universidad Nacional de Villa María y al Instituto Académico Pedagógico de Ciencias Básicas y Aplicadas, les expreso mi profundo agradeciendo por brindarme una educación pública, de calidad y gratuita, que me ha permitido acceder a conocimientos de excelencia y la posibilidad de alcanzar este título. Cada experiencia vivida en sus aulas ha sido clave para mi desarrollo académico y humano.

A cada uno de los Profesores de la Licenciatura en Ambiente y Energía Renovables quienes con su dedicación, vocación y compromiso han guiado mi aprendizaje y formación profesional.

A mis compañeros y amigos más cercanos, con quienes compartí innumerables desafíos y alegrías. Su apoyo, compañerismo y amistad han sido un pilar fundamental en esta etapa.

Y, por último, pero no menos importante, Gracias Dios por ocuparte y hacer tu voluntad, bendecir mi camino, por sostenerme en la adversidad y por darme fuerzas para lograr este objetivo.

A todos ustedes, les estoy agradecida.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE SIGLAS.....	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Digestión Anaerobia.....	5
2.1.1. Parámetros del proceso de DA.....	6
2.2. Sustratos utilizados para la digestión anaerobia	7
2.2.1. Purín de cerdo y residuos lácteos	8
2.3. Energía de Biomasa	10
2.3.1. Cultivos y Residuos energéticos	10
2.4. Subproductos	11
2.4.1 Residuos orgánicos	11
2.5. Digestato o Biodigestato digerido	11
2.5.1. Composición del digestato	12
2.5.2. Separación sólido-líquido del digerido	13
2.5.3. Estabilización del digestato	13
2.5.4. Almacenamiento del digestato	14
2.6. Biocarbón; Biochar	14
2.6.1. Utilización agronómica del digerido y biocarbón	14
2.6.2. Momento de aplicación del digestato y biocarbón en suelos	16
2.7. Biogás	16
2.8. Biorrefinería	17
2.9. Codigestión.....	18
2.10. Pirólisis	18
2.11. Suelo	19
2.12. Materia orgánica de los suelos	19
2.12.1. Ciclos biogeoquímicos	20
2.12.2. Fertilidad de suelos	21
2.12.3. Agricultura orgánica/sustentable	21

2.12.4. Papel de los suelos en el secuestro de carbono y cambio climático ...	22
2.13. Nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas.....	22
2.14. Normativa nacional vigente	23
3. OBJETIVOS	24
3.1. Objetivo General	24
3.2. Objetivos específicos	24
4. MATERIALES Y MÉTODOS	25
4.1 Características del área de estudio	25
4.2 Origen de los digestatos	27
4.3 Carbonización de la fracción sólida y caracterización de los productos obtenidos.....	28
4.3.1 Sólidos Totales	29
4.3.2 Pirólisis	29
4.3.3 pH	29
4.3.4 Carbono Orgánico	29
4.3.5 Nitrógeno total	30
4.3.6 Conductividad eléctrica	30
4.3.7 Nitrógeno amoniacal	30
4.3.8 Sodio, calcio, potasio y magnesio	30
4.3.9 Grupos funcionales y características morfológicas de los biocarbones	30
4.4 Diseño experimental para la aplicación directa de digestato/biocarbón en el suelo ..	30
4.5 Análisis del suelo después del tratamiento	33
4.5.1 pH	33
4.5.2 Conductividad Eléctrica	33
4.5.3 Carbono Orgánico Total	33
4.5.4 Grado de Humificación del suelo	33
4.5.5 Respiración Microbiana	34
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1. Biocarbones obtenidos a partir de la fracción sólida y caracterización de los productos obtenidos	36
5.2. Comportamiento del suelo post tratamiento	45
6. CONCLUSIONES	52
7. CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	54
8. BIBLIOGRAFIA	55
9. ANEXOS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materias primas para la DA	7
Tabla 2. Materias primas para la DA	16
Tabla 3: Parámetros físicos y químicos del suelo, de la fracción sólida de los digestatos y del biocarbón obtenido a 350°C	39
Tabla 4. Diámetro de las muestras de Biochar (μm)	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso químico global de la digestión anaerobia de sustratos orgánicos para producción de metano - Biogás	6
Figura 2. Recursos de biomasa	8
Figura 3. Distribución de productores porcinos en Argentina, según su potencial de generación de biogás	9
Figura 4. Distribución de tambos en la Argentina, según potencial de generación de biogás	10
Figura 5. Modelo de ciclo de vida de Biorrefinerías	18
Figura 6. Mapa de identificación de zona de muestreo de suelo	26
Figura 7. Ubicación del área de estudio y suelo representativo	27
Figura 8. Mapa de identificación de las tres plantas de biogás en estudio	28
Figura 9. Muestra de suelo	31
Figura 10. Descripción de los materiales utilizados para las mezclas (digestatos, biocarbón y combinación de digestato y biocarbón) y las diferentes proporciones de las mezclas	32
Figura 11. Digestatos y Biocarbones	38
Figura 12. B350 -1: Estructuras de las fracciones sólidas y las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C	42
Figura 13. B350 -2: Estructuras de las fracciones sólidas y las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C	42
Figura 14. B350 -3: Estructuras de las fracciones sólidas y las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C	43
Figura 15. Microestructuras de Biochar 350°C 2 µm, 1 µm	43
Figura 16. Microestructuras de Biochar 350°C 2 µm, 1 µm	44
Figura 17 a. pH del suelo	45
Figura 17 b. Conductividad Eléctrica del suelo	45
Figura 17 c. Carbono Orgánico Total del suelo	46
Figura 17 d. Grado de Humificación del suelo	46
Figura 17 e. Respiración Microbiana del suelo	47
Figura 18. Análisis de Sólidos Totales	63
Figura 19. pH-metro electrónico HANNA HI 8424	63
Figura 20. Balanza analítica	64
Figura 21. Espectrofotómetro APERA EC910	64
Figura 22. Estufa tubular (T- 150, INDEF)	64

ÍNDICE DE SIGLAS

3C: 3C Biogás.

AF: Ácidos Fúlvicos.

AGV: Ácidos Grasos Volátiles

AH: Ácidos Húmicos.

Al: Aluminio

AIE: Agencia Internacional de Energía.

AO: Agricultura Orgánica.

AOAC: Métodos Oficiales de Análisis de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales.

As: Arsénico

B: Boro

B350: Biocarbón 350 °C.

BE: Beisa Yanquetruz.

C/N: Relación carbono/nitrógeno.

C: Carbono.

Ca: Calcio

CaCO₃: Carbonato de calcio.

CADER: Comité de Biomasa de la Cámara Argentina de Energías Renovables.

cc: Centímetros Cúbicos.

Cd: Cadmio

CE: Conductividad Eléctrica.

CH₄: Metano.

Cl: Cloro.

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica

CAMMESA: Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico.

CO: Carbono Orgánico.

Co: Cobalto.

CO₂: Dióxido de Carbono.

COT: Carbono Orgánico Total.

Cr: Cromo

Cu: Cobre.

DA: Digestión Anaerobia

DDT: Diclorodifeniltricloroetano.

EN: Enreco.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

FAN: Nitrógeno Amoniacal Libre.

Fe: Hierro.

FL: Fracciones Líquidas.

FS: Fracciones Sólidas.

g: Gramos.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GH: Grado de Humificación.

h: Horas.

H⁺: Ion Hidrógeno

HCl: Ácido Clorhídrico

IMITAB: Instituto Multidisciplinario de Investigación y Transferencia Agroalimentaria y Biotecnológica.

K: Potasio.

kg de N/ha: Kilogramos de N por hectárea.

M: Molar.

m³: Metros Cúbicos

Mg: Magnesio.

MgCO₃: Carbonato de Magnesio.

mm: Milímetros.

Mn: Manganeseo.

MO: Materia Orgánica.

Mo: Molibdeno.

N: Nitrógeno.

Na: Sodio

NaOH: Hidróxido de sodio.

NH₃: Amoníaco.

NH₄⁺: Ion Amonio.

Ni: Níquel

NO₃⁻: Nitrato.

NT: Nitrógeno Total.

O₂: Oxígeno.

°C: Grados Centígrados.

OD: Oxígeno Disuelto.

ODS: Objetivos para el Desarrollo Sostenible.

P: Fósforo.

Pb: Plomo.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

RenovAr: Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

RM: Respiración Microbiana.

RO: Residuos Orgánicos.

S: Azufre.

SB1, SB2, SB3: Suelo - Biocarbón, muestra 1,2,3.

SD1, SD2, SD3: Suelo - Digestato, muestra 1,2,3.

SDB1, SDB2, SDB3: Suelo - Digestato - Biocarbón, muestra 1,2,3.

SDT: Sólidos Disueltos Totales.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

ST: Sólidos Totales

SV: Sólidos Volátiles.

TAN: Nitrógeno Amoniacal Total.

TKN: Nitrógeno Kjeldahl Totales.

TRH: Tiempo de Retención Hidráulica.

UNRC: Universidad Nacional de Río Cuarto.

UNVM: Universidad Nacional de Villa María.

USEPA: Métodos de Análisis de la Agencia de Protección Ambiental.

Zn: Zinc.

ESTUDIO DE DIGESTATOS Y BIOCARBONES: APLICACIÓN EN UN SUELO REPRESENTATIVO DE LA PLANICIE FLUVIOEÓLICA CENTRAL CORDOBESA

Autora: Daiana Soledad Martínez

Directora: Dra. María José Galván

Co- Directora: Dra. María Jimena Rodríguez

RESUMEN

El proceso de digestión anaerobia, transforma los materiales orgánicos en biogás y en un residuo rico en nutrientes conocido como digestato que puede servir como fertilizante. Sin embargo, la aplicación directa o en exceso, sin regulación de la dosis del digestato (tratamiento y cantidad) sobre el suelo puede presentar problemas microbiológicos, desequilibrios en la química del suelo por la liberación de nutrientes en exceso, retraso en la germinación y la reducción del crecimiento de cultivos, presencia de patógenos y fitotoxicidad alta, afectando la salud general del suelo. El digestato es un residuo que se obtiene de la industria bioenergética en la producción de biogás, tiene una alta carga orgánica y se puede reutilizar como fertilizante orgánico, por estos beneficios es necesario revalorizarlo, presentando nuevas tecnologías alternativas, mediante la aplicación de nuevos enfoques como la pirólisis, donde se transforma el digestato en un residuo sólido poroso rico en carbono, conocido como biocarbón. El mismo posee excelentes propiedades para la retención de agua y la liberación gradual de nutrientes. Es empleado como enmienda para el suelo, su uso presenta características interesantes en términos de huella de carbono ya que demuestra un papel distintivo en el secuestro de carbono, por lo que contribuye a reducir las emisiones de dióxido de carbono y a mitigar el cambio climático. Este enfoque permite presentar una estrategia integral de revalorización de los productos y subproductos provenientes de procesos de biorrefinerías anaerobias que es la producción de biocarbón a partir de los diferentes digestatos y con diferentes temperaturas finales de carbonización para mejorar la calidad del suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa, la sostenibilidad en prácticas agrícola y la mitigación del cambio climático. El objetivo general es evaluar las características de los digestatos y biocarbones de biorrefinerías anaerobias y su aplicación en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa. Conjuntamente se realizó la carbonización de la fracción sólida a partir de diferentes digestatos proveniente de biorrefinerías anaerobias y la caracterización de tres tipos diferentes de biocarbón con una mezcla de diferentes tipos de materias primas. Se determinó y describió el diseño experimental usado para la aplicación directa en diversas concentraciones y combinaciones a un suelo típico de la región. Finalmente se analizó su aplicación directa en suelo, sus efectos físico químicos sobre propiedades del suelo como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, grado de humificación, respiración microbiana y su actividad microbiológica después del tratamiento. Los resultados obtenidos en este estudio, demostraron que la aplicación de biocarbón derivado de procesos de digestión anaerobia tiene un impacto positivo en varias propiedades del suelo. Estos efectos incluyen la mejora del pH del suelo, el aumento de la retención de nutrientes, la estabilidad de la materia orgánica y la promoción de la actividad microbiana. La adición de biocarbón, especialmente en combinación con digestatos, tuvo un efecto mejorador sobre la calidad del suelo, lo que sugiere un potencial beneficioso para las prácticas agrícolas sostenibles, su potencial uso como fertilizante orgánico y herramienta de mitigación al cambio climático.

Palabras claves: Biorrefinerías anaerobia; pirólisis; Biochar; haplustol; sustentabilidad; prácticas agrícolas.

STUDY OF DIGESTATES AND BIOCHAR: APPLICATION IN A REPRESENTATIVE SOIL OF THE CENTRAL FLUVIO-EOLIAN PLAIN OF CÓRDOBA

Autora: Daiana Soledad Martínez

Directora: Dra. María José Galván

Co- Directora: Dra. María Jimena Rodríguez

ABSTRACT

The anaerobic digestion process transforms organic materials into biogas and a nutrient-rich residue known as digestate, which can be used as fertilizer. However, the direct or excessive application of digestate without regulation of dosage (treatment and quantity) on the soil may pose microbiological risks, cause imbalances in soil chemistry due to excess nutrient release, delay germination and reduce crop growth, introduce pathogens, and lead to high phytotoxicity—ultimately affecting overall soil health. Digestate is a byproduct obtained from the bioenergy industry during biogas production. It has a high organic load and can be reused as an organic fertilizer. Due to these advantages, it is necessary to revalorize digestate by introducing alternative technologies such as pyrolysis. This process transforms digestate into a porous, carbon-rich solid residue known as Biochar. Biochar has excellent properties for water retention and the gradual release of nutrients. It is used as a soil amendment and offers interesting benefits in terms of carbon footprint, as it plays a distinctive role in carbon sequestration, contributing to the reduction of carbon dioxide emissions and helping mitigate climate change. This approach proposes a comprehensive strategy to revalorize products and byproducts from anaerobic biorefinery processes through the production of biochar from different digestates using varying final carbonization temperatures. The goal is to improve the quality of a representative soil from the central Córdoba fluvio-eolian plain, enhance sustainability in agricultural practices, and contribute to climate change mitigation. The general objective is to evaluate the characteristics of digestates and biochars derived from anaerobic biorefineries and their application in a representative soil of the central Córdoba fluvio-eolian plain. The study included the carbonization of the solid fraction from different anaerobic digestates and the characterization of three types of biochar made from a mixture of various feedstocks. The experimental design used for direct application of different concentrations and combinations on a typical regional soil was determined and described. Finally, the direct application on soil and its physicochemical effects were analyzed, including pH, electrical conductivity, organic matter content, humification degree, microbial respiration, and microbial activity after treatment. The results obtained in this study showed that the application of biochar derived from anaerobic digestion processes had a positive impact on various soil properties. These effects include improvement in soil pH, increased nutrient retention, enhanced organic matter stability, and promotion of microbial activity. The addition of biochar, especially when combined with digestates, had an enhancing effect on soil quality, suggesting beneficial potential for sustainable agricultural practices, its use as an organic fertilizer, and a tool for climate change mitigation.

Keywords: Anaerobic biorefineries; pyrolysis; Biochar; haplustoll; sustainability; agricultural practice.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo se enfrenta a una crisis derivada de la gran dependencia de los hidrocarburos en la producción de energía. Lo mismo ocurre en Argentina, cuya matriz energética se sustenta prácticamente en su totalidad en los combustibles fósiles. Surgió una creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles, lo que desencadenó una crisis energética y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para ello, recientemente se han desarrollado fuentes de energías renovables alternativas que permiten reemplazar, en al menos un cierto porcentaje, a los combustibles convencionales. Las mismas tienen un gran potencial para mitigar el cambio climático y además pueden aportar otros beneficios. Por ejemplo, si se utilizan de forma adecuada pueden contribuir al desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía, la seguridad del suministro y reducir los efectos negativos de los combustibles fósiles sobre el ambiente y la salud.

Una de las energías renovables potencialmente aprovechables es la energía de la biomasa, que engloba una multiplicidad de fuentes y procesos. Para lograr una transición hacia las energías renovables, resulta fundamental el desarrollo de políticas públicas motivadas en gran parte por el deseo de mejorar la calidad del aire y aumentar la seguridad energética a través de una diversificación de la matriz.

En las últimas décadas, Argentina ha promovido la producción de energía renovable para diversificar su matriz energética nacional mediante la aprobación de leyes y programas como el RenovAR, debido a que se ha notado una aceleración en los niveles de consumo de los recursos naturales y fuentes de energía. El objetivo es fomentar la participación de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar, en 2025 un 20 % del consumo de energía eléctrica nacional, valorando a la biomasa como una fuente de alta relevancia (FAO, 2019). Como respuesta al incentivo normativo y gracias a las condiciones agroclimáticas que presenta el país, que permiten la generación de biomasa para su aprovechamiento, se instalaron y se encuentran proyectadas numerosas plantas de generación de energía renovable a partir de biomasa. De acuerdo a estadísticas del CADER (Comité de Biomasa de la Cámara Argentina de Energías Renovables), Argentina posee entre 60 y 80 plantas de biomasa, de las cuales 20 son grandes instalaciones.

En 2024, la generación de energía eléctrica a partir de la producción nacional de biogás según informes oficiales de CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico) fue de aproximadamente 512 GWh/año este valor representa cerca del 2,2 % del total de la producción de biogás, no es fácilmente aislable estos números en los informes generales de CAMMESA, ya que se agrupa dentro de las energías renovables (ER) pero se sabe que las energías renovables tienen una baja participación en la matriz energética nacional, aproximadamente del 16,3%, mientras que el gas natural domina la matriz, el biogás tiene un potencial creciente pero aún marginal.

La composición de la matriz energética argentina sigue dominada por una alta dependencia de combustibles fósiles (petróleo y gas), representando más del 84-88% de la oferta interna, marcando una gran diferencia para las ER, donde la participación total de ER varía, pero se mantiene entre 10-20%, lejos del objetivo del 20% para 2025. Desde 2018 a 2024 la energía generada por biogás en

Argentina se más que duplicó, pasando de alrededor de 145 GWh/año a más de 500 GWh/año según análisis de series históricas basadas en datos de (CMMESA, 2024).

Actualmente, la generación de biogás representa un núcleo pequeño pero creciente de la matriz renovable eléctrica argentina, con importantes proyectos vinculados a residuos agroindustriales y ganaderos.

Según datos extraídos del Proyecto PROBIOMASA titulado “Relevamiento Nacional de Biodigestores: Diagnóstico integral sobre la biodigestión anaeróbica en Argentina”, utilizamos cifras reales sobre la distribución de biomasa húmeda en la Argentina, según potencial de generación de biogás y las cuencas de biogas, concentradas en un 90% en Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, ubicadas en zonas rurales, siendo el objetivo principal la producción de electricidad. Esta información nos permitió tener el número de plantas de biogas que hay en el país, el total de sustrato de origen agrícola-ganadero que emplean estas como materia prima para la producción de biogas, cuánto biogas se produce y energía eléctrica se produce y el volumen de digestato excedente para realizar una estimación concreta de la cantidad de digestato disponible que actualmente se lo reconoce como un efluente de la industria del biogas, con potencial para revalorizarlo como un fertilizante orgánico integrando a sistemas de biorrefinerías anaerobias y la producción de biocarbones, a partir de la carbonización de la fracción sólida de digestato INTI. (2019). Las estimaciones sobre la producción de biogás y disponibilidad de digestato se hallan detalladas en la sección de anexos.

En 2016, la producción mundial de biogás fue de aproximadamente 60 mil millones de m³/año. Esto representa una generación aproximada de 550 mil millones de toneladas/año de digestato (Aso, 2020). Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), la producción mundial de biogás y biometano en 2023 fue de alrededor de 50 mil millones de m³/equivalentes de gas natural, representando una pequeña fracción de la demanda global, su presencia en la matriz energética global es aún marginal, pero con un potencial enorme de producción sostenible, principalmente a partir de residuos orgánicos, con Europa liderando, pero con gran crecimiento en China e India, y el digestato (fertilizante) siendo un subproducto clave para la agricultura (AIE, 2025).

En la provincia de Córdoba, hay algunas plantas de gran capacidad centrándose, en la actualidad, en establecer políticas energéticas que aporten nuevas tecnologías orientadas a la generación de energía, que tienen carácter renovable y producen un menor impacto al ambiente. Entre ellas se encuentra la producción de biogás, que se genera a partir de la digestión anaerobia (DA). Se está trabajando en la revalorización de los productos y subproductos de la DA, los cuales se encuentran en grandes volúmenes y con perspectivas de incrementarse.

En el centro de la producción de biogás se encuentra el proceso de DA, que transforma los materiales orgánicos en dos productos, en biogás y en un residuo conocido como biodigestato digerido o digestato que puede servir como fertilizante orgánico, ya que se lo considera un recurso agrícola de especial interés por ser rico en nutrientes (McCabe *et al.*, 2020; Dar *et al.*, 2021). A sí mismo, es una alternativa para reemplazar los fertilizantes inorgánicos o reducir su uso, ya que por sus características puede ser utilizado como biofertilizante o fertilizante orgánico en suelos, generando beneficios tales como la estabilización de residuos orgánicos, la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI), el suministro de nutrientes a cultivos, entre otros (Stiles *et al.*, 2018). En especial la producción

agropecuaria genera anualmente grandes volúmenes de residuos orgánicos (RO). Lo que hace que su adecuada disposición final sea una preocupación creciente debido a sus características, ya que contienen grandes cantidades de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P).

El incorrecto manejo del digestato crudo o biodigestato digerido de mayor carga orgánica, puede ocasionar problemas ambientales, dificultando su disposición final. Sin embargo, la aplicación directa o en exceso de las fracciones líquidas (FL) y sólidas (FS) del digestato sobre el suelo puede presentar problemas microbiológicos que pueden afectar a la salud general del suelo. La gestión inadecuada de estos residuos orgánicos podría tener consecuencias perjudiciales para el entorno, porque la liberación de nutrientes en exceso puede desencadenar problemas ambientales, como la eutrofización de cuerpos de agua cercanos. Además, la descomposición de estos residuos sin un tratamiento adecuado puede generar olores desagradables.

Actualmente grandes cantidades de digestato se aplican directamente al suelo sin ningún tipo de tratamiento previo, ni análisis de su composición y sin el uso de tecnologías adecuadas para estos procesos. Ante esto, se debe tener en cuenta que un exceso de nutrientes puede generar problemas de contaminación en suelo, agua y atmósfera. Puntualmente la forma compuesta de N que contiene está disponible en su mayoría para la absorción de las plantas, pero sin embargo es posible que se produzcan pérdidas luego de la aplicación en el suelo, lo cual generaría riesgos en zonas donde existen excesos de N (Stiles *et al.*, 2018). Si no se trata o gestiona adecuadamente, el digestato puede introducir microorganismos patógenos con actividad microbiana incontrolada en el suelo resultante de un aporte excesivo de nutrientes y provocar desequilibrios en el microbiota del suelo, lo que puede suponer un riesgo para la salud tanto de los trabajadores agrícolas como de los consumidores de cultivos sembrados en suelos contaminados (Panahi *et al.*, 2020; Yousuf, Naqash y Singh, 2020). Además, la manipulación y el almacenamiento inadecuados del digestato pueden favorecer la proliferación de bacterias nocivas, agravando aún más estos problemas microbiológicos.

Si el digestato se aplica en exceso o sin tener debidamente en cuenta su contenido en nutrientes, puede dar lugar a escorrentías de nutrientes, causando potencialmente la contaminación del agua y desequilibrios en los ecosistemas acuáticos (Lamolinara *et al.*, 2022). La manipulación y el transporte de los digestatos también pueden resultar difíciles y costosos desde el punto de vista logístico (Ioannou-Ttofa *et al.*, 2021). Es por estas razones que los residuos orgánicos provenientes de los subproductos agropecuarios se han convertido en uno de los sustratos más destacados y utilizados en todo el mundo para la producción de biogás (Mortola *et al.*, 2022). Estos deben gestionarse cuidadosamente para garantizar unas prácticas agrícolas sostenibles y la protección del medio ambiente (Dar *et al.*, 2021).

Por lo anteriormente expuesto, se puede enmarcar al uso del digestato como fertilizante dentro del concepto de economía circular, contribuyendo así también al tratamiento de residuos orgánicos y a la sostenibilidad agrícola (Ning *et al.*, 2017). Debido a esto, se lo considera una opción viable de aprovecharlo tanto ambiental como económicamente, porque contribuye a la agricultura sustentable y a la promoción de la economía circular (Ning *et al.*, 2017). El uso del digerido es parte fundamental del ciclo de reincorporación de la materia orgánica (MO) y nutrientes a los sistemas productivos.

Para evitar los problemas que se puedan llegar a generar, se debe programar la aplicación y la dosis del fertilizante según el cultivo, el estado del suelo al que se le aplique, y la dilución o pretratamiento del digestato, además se deben analizar posteriormente sus características químicas, estabilidad y condiciones de higienización que posee (Méndez *et al.*, 2011). La fracción sólida del digestato plantea los principales problemas de sostenibilidad y gestión. Los retos abarcan el volumen, la composición, la recuperación de nutrientes, el transporte y el almacenamiento.

En síntesis, las amenazas más significativas a la función del suelo a escala global asociada a la aplicación directa de digestato sobre el suelo son la erosión, la pérdida de carbono orgánico (CO) y el desequilibrio de nutrientes. Tal es su importancia y preocupación internacional, que los países ponen en agenda las problemáticas y la preservación del recurso, mediante los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2015). La vulnerabilidad de un sistema depende, no sólo de los factores formadores de un suelo, sino también del uso y manejo de la tierra (Rodríguez *et al.*, 2021).

Por lo tanto, se debe gestionar cuidadosamente el digestato, para resolver estos problemas, han cobrado importancia la aplicación de nuevos enfoques innovadores como la pirólisis. Este proceso convierte la MO en gas de síntesis, bioaceite y un residuo sólido rico en carbono, conocido como biocarbón, sobre el cual se enfoca este trabajo. Estos productos tienen una aplicabilidad potencial; el gas de síntesis y el bioaceite pueden utilizarse para la generación de energía mediante combustión. Mientras que el biocarbón es un material con aplicaciones multifacéticas, incluyendo la mejora del suelo (Wang y Lee, 2021). Según cálculos la reducción de emisiones puede ser del 12 al 84% mayor si el biocarbón es reincorporado en el suelo en lugar de quemarse para uso como combustible fósil. En consecuencia, el secuestro de carbono con biocarbón ofrece una oportunidad para mover la bioenergía hacia una industria de carbono negativo (Lehmann, 2007) y a mitigar el cambio climático (Winsley, 2007). Además, el biocarbón puede incrementar la fertilidad en suelos ácidos, la productividad agrícola, brindar protección contra algunas enfermedades foliares y edáficas y a reducir la presión sobre los bosques (Ronga *et al.*, 2020; Abdo, 2021).

El biocarbón influye positivamente en la calidad y química del suelo, afecta a la actividad microbiana, mejora la biodisponibilidad y la retención de nutrientes, y retrasa su liberación al medio ambiente, puede secuestrar carbono a largo plazo, reduciendo así el (CO₂) atmosférico y mejorando las aplicaciones económicas y medioambientales centradas en la sostenibilidad (Martínez, 2024).

Se pretende de este trabajo que los resultados obtenidos de la aplicación de biocarbón derivado de procesos de digestión anaerobia tengan un impacto positivo en varios aspectos, propiedades relacionadas con la calidad del suelo y la retención de nutrientes. Estos efectos incluyen la mejora del pH del suelo, el aumento de la retención de nutrientes, la estabilidad de la materia orgánica y la promoción de la actividad microbiana, lo que sugiere un potencial beneficioso para las prácticas agrícolas sostenibles, su potencial uso como fertilizante orgánico y herramienta de mitigación al cambio climático. En resumen, el mismo desea brindar valores teóricos, llenar vacíos de conocimiento, demostrar relevancia social y las implicancias prácticas que nos ofrece el “Estudio de la aplicación de digestatos y biocarbones provenientes de procesos de digestión anaerobia en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa”.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Digestión Anaerobia

La DA es un proceso natural, donde, con ciertas condiciones físicas, químicas y biológicas específicas, ocurre la descomposición de la materia orgánica por medio de microorganismos que se desarrollan en un ambiente anaeróbico, es decir, en ausencia total de oxígeno (McCabe *et al.*, 2020; Dar *et al.*, 2021).

La DA, también denominada como proceso de producción de biogás o biometanización, es un proceso natural que ocurre en muchos ambientes anóxicos, como cursos de agua, sedimentos, suelos anegados y en el intestino de los mamíferos. También es el más utilizado en la actualidad para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de energía, en ausencia total de oxígeno. Dentro de un biodigestor es donde ocurre este proceso, las reacciones que suceden en él son llevadas a cabo por grandes cantidades de microorganismos. Los mismos son los encargados de transformar la MO compleja, con la que se alimenta en un principio, en compuestos más simples. Como resultado final se genera biogás y digestato. La DA se puede clasificar según la alimentación y el mantenimiento de los sustratos, en DA húmeda, que involucra sustratos con un contenido de sólidos menor al 15% y en DA seca, que opera con sustratos con un contenido superior al 15%. Esta versatilidad permite adaptar el proceso a diferentes tipos de materias primas (Ampese *et al.*, 2022). En el centro de la producción de biogás se encuentra el proceso de digestión anaerobia (DA), este proceso que transforma los materiales orgánicos en dos productos en biogás y en un residuo rico en nutrientes conocido como biodigestato (McCabe *et al.*, 2020; Dar *et al.*, 2021). La DA, descomposición en condiciones de poco oxígeno de una materia prima biodegradable, es un proceso versátil que puede utilizar muchos tipos diferentes de materias primas, tales como: lodos de depuradora, desechos animales, residuos agrícolas, industriales, cultivos energéticos, residuos municipales, lodos de aguas residuales, desechos de alimentos u otros productos de desecho orgánicos. Además, produce dos productos principales: digestato fibroso que se compone de formas sólidas y líquidas, y el biogás de origen natural que se emite durante el proceso de DA. Además, como se mencionó anteriormente produce un residuo húmedo, que puede encontrarse en estado líquido o semilíquido, llamado digestato. El mismo está conformado por MO parcialmente degradada, microorganismos y compuestos inorgánicos (Alburquerque *et al.*, 2012).

La DA generalmente se desarrolla en cuatro fases distintas, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis como se muestra en la Figura 1. Estos pasos del proceso funcionan simultáneamente en el mismo digestor. Durante la fase metanogénica se da la producción significativa de gas, por ello los parámetros de los procesos se ajustan a las exigencias que conlleva esta última etapa.

En la primera etapa, se lleva a cabo la hidrólisis de partículas y moléculas complejas, como proteínas, carbohidratos y lípidos, que se transforman en compuestos solubles más sencillos, tales como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga. En la etapa de acidogénesis, las bacterias acidogénicas metabolizan estos compuestos, generando ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, CO₂ y otros productos intermedios. En la fase acetogénica, los ácidos grasos de

cadena corta experimentan una transformación, convirtiéndose en ácido acético, hidrógeno y CO_2 mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Finalmente, en la fase de metanogénesis, los microorganismos metanogénicos producen (CH_4) a partir de estos últimos compuestos generados, esta fase es la más limitante de la DA porque las bacterias metanogénicas son muy sensibles a los cambios que puedan ocurrir dentro del biodigestor, como variaciones de la temperatura, el pH, tasa de alimentación, etc (FAO, 2010; Atelge *et al.*, 2020).

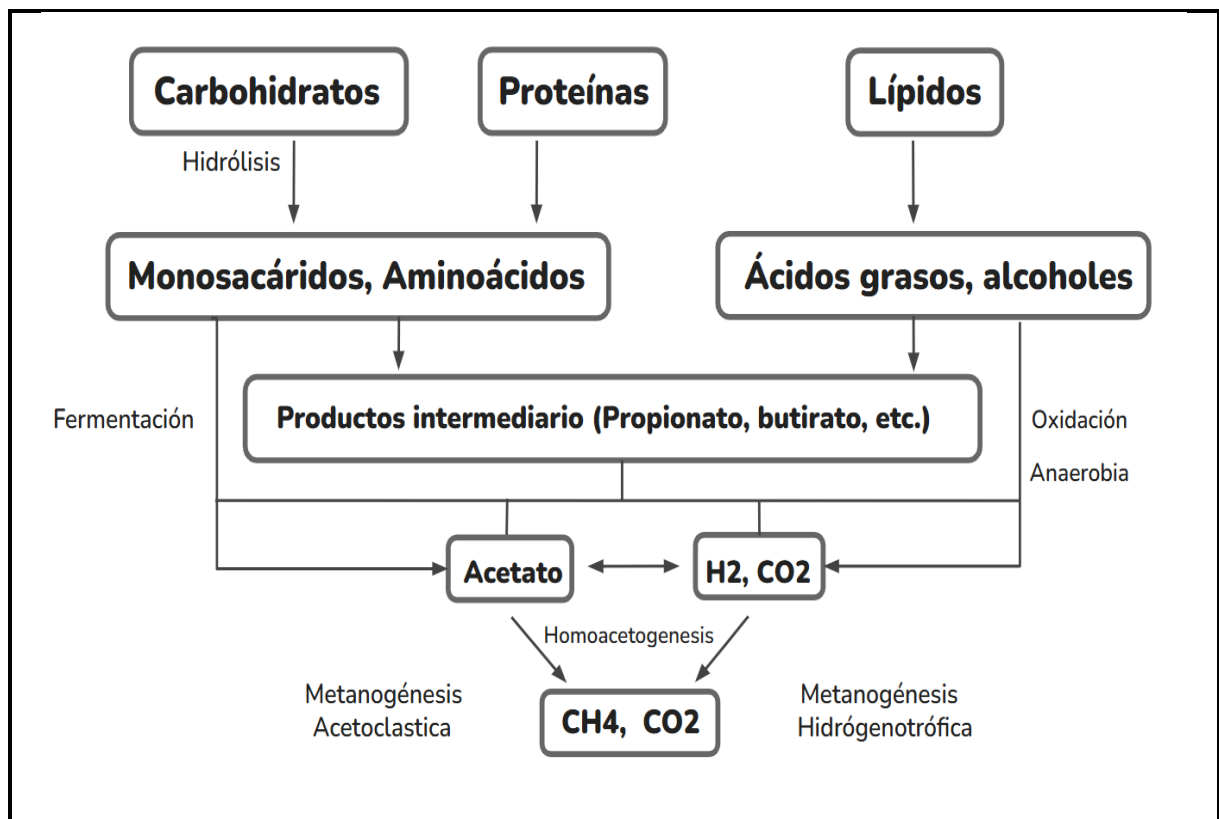


Figura 1. Proceso químico global de la digestión anaerobia de sustratos orgánicos para producción de metano - Biogás (Burboa *et al.*, 2023).

2.1.1. Parámetros del proceso de DA

Los parámetros que caracterizan la eficiencia del proceso de DA son principalmente el pH, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes. Un pH neutro (6,5-7,5) es el adecuado para el proceso. La temperatura influye principalmente en los microorganismos que actúan en el proceso de DA. Por ende, las variaciones de este parámetro dentro del sistema pueden provocar un desequilibrio en la biodisponibilidad de microorganismos. Por ello, es importante que la misma permanezca estable durante todo el proceso de DA, y debe estar monitoreado constantemente.

La disponibilidad de nutrientes no solo se refiere a los macronutrientes como el Carbono (C), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), sino también microelementos que son necesarios para la estabilidad del proceso, tales como Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), entre otros (Samoraj *et al.*, 2022).

2.2. Sustratos utilizados para la digestión anaerobia

Los sustratos utilizados para el proceso de digestión anaerobia, para la producción de biogás y obtención de biocarbones son variados, en tanto materias primas que se pueden clasificar en residuos de origen animal, vegetal, humano, agroindustriales, forestales, cultivos acuáticos, residuos agrícolas, aguas residuales municipales, industriales, desechos de la industria alimentaria, cultivos energéticos, etc. (Ward *et al.*, 2008).

Existen diversas materias primas que pueden ser utilizadas en el proceso de DA, sus principales componentes deben ser carbohidratos, proteínas y grasas. Dependiendo de las características de las mismas será la composición del digerido final y su posible uso como biofertilizante. El proceso puede ocurrir tanto con un único sustrato (monodigestión) o con combinaciones de sustratos (codigestión), esta última se realiza para obtener un sustrato con mejores nutrientes y rendimientos. Por ejemplo, en el caso de los desechos agrícolas es necesaria la codigestión con algún cultivo energético o biomasa vegetal para lograr una adecuada relación carbono/nitrógeno (C/N). Los desechos y subproductos animales, tienen un alto contenido de carbono y una relación C/N favorable (Samoraj *et al.*, 2022).

En la Tabla 1 se pueden observar los sustratos que se encuentran comprendidos en cada grupo mencionado (Atelge *et al.*, 2020). Mientras que en la Figura 2, se observan los distintos recursos biomásicos disponibles que pueden ser utilizados como sustratos para la producción de biogás.

Son grandes los volúmenes de los pasivos ambientales característicos de la región centro de Argentina, los mismos son comercializados a precios marginales, y se dificulta su transformación y transporte.

Tabla 1. Materias primas para la DA (FAO, 2011).

Residuos de origen animal	Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

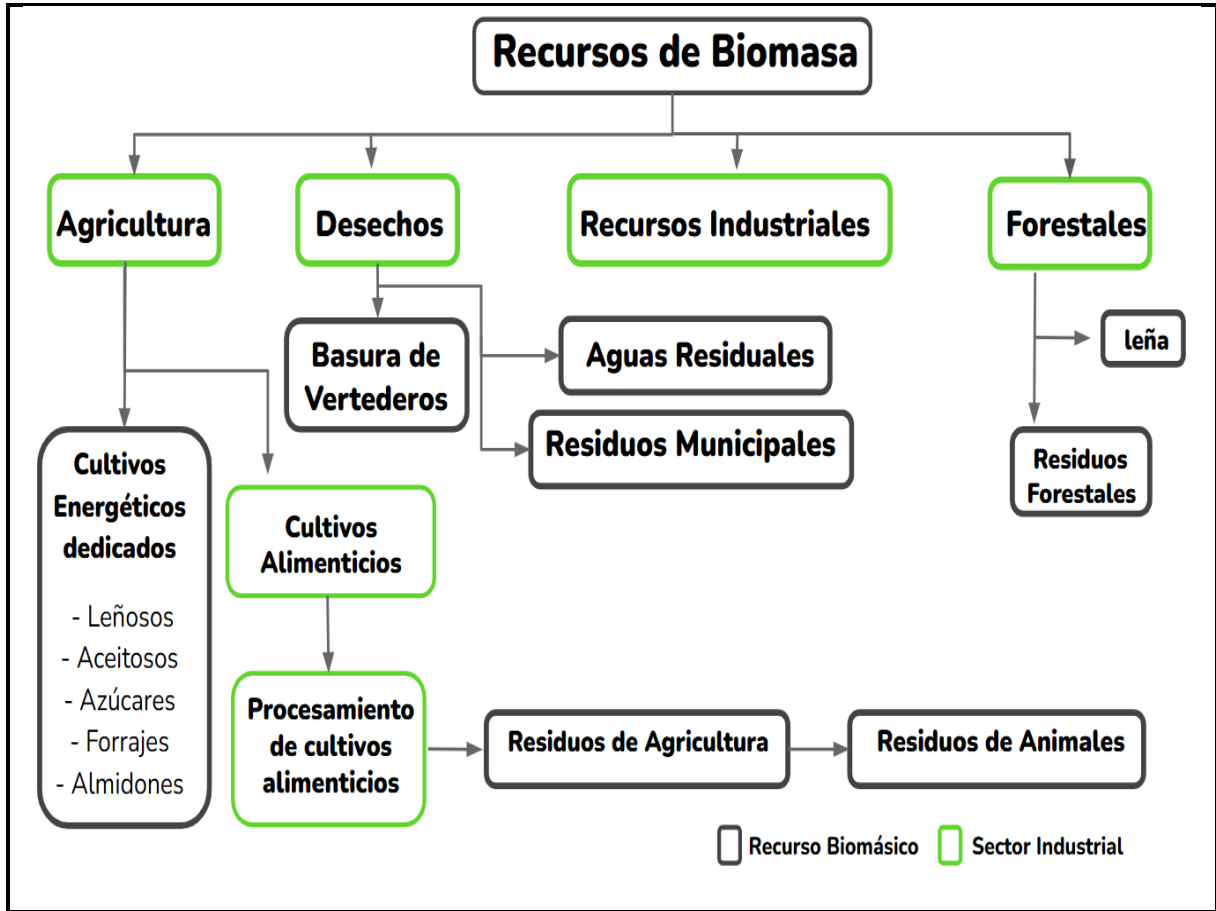


Figura 2. Recursos de biomasa (Ortiz *et al.*, 2019)

2.2.1. Purín de Cerdo y residuos lácteos

Los purines son residuos orgánicos que provienen de actividades ganaderas porcinas y se componen por las excreciones de los animales (heces y orina), aguas de lavado de los establecimientos y residuos de comida. Se estima que cada cerdo de engorde produce aproximadamente 7,7 Litros de purín por día (Alcobendas, 2020). La actividad porcina en Argentina creció considerablemente en los últimos años. Como muestra la Figura 3 los establecimientos porcinos se encuentran concentrados mayormente en la región núcleo agrícola del país, que comprende el norte de Buenos Aires, el centro de Córdoba y el sur de Santa Fe. De esta forma queda representada la distribución de productores porcinos en Argentina, según su potencial de generación de biogás, en este tipo de establecimientos se producen grandes cantidades de efluentes líquidos y sólidos, principalmente provenientes de las deyecciones de los animales, que poseen un alto contenido de nutrientes que deben ser tratados de manera adecuada para su disposición final, sin afectar el entorno. Ya que un deficiente manejo de los efluentes generados, pueden producir degradaciones a los cuerpos de aguas, el suelo y el aire, además de la proliferación de plagas sinantrópicas como moscas, roedores, etc. y la emisión de olores desagradables. El manejo de purines mediante la DA resulta una alternativa viable para alcanzar los objetivos de mitigación de la contaminación y valorización energética de residuos pecuarios en la Argentina, con el desarrollo de proyectos que agreguen valor en origen a los productores de porcinos y fomenten la producción animal intensiva de manera sustentable.

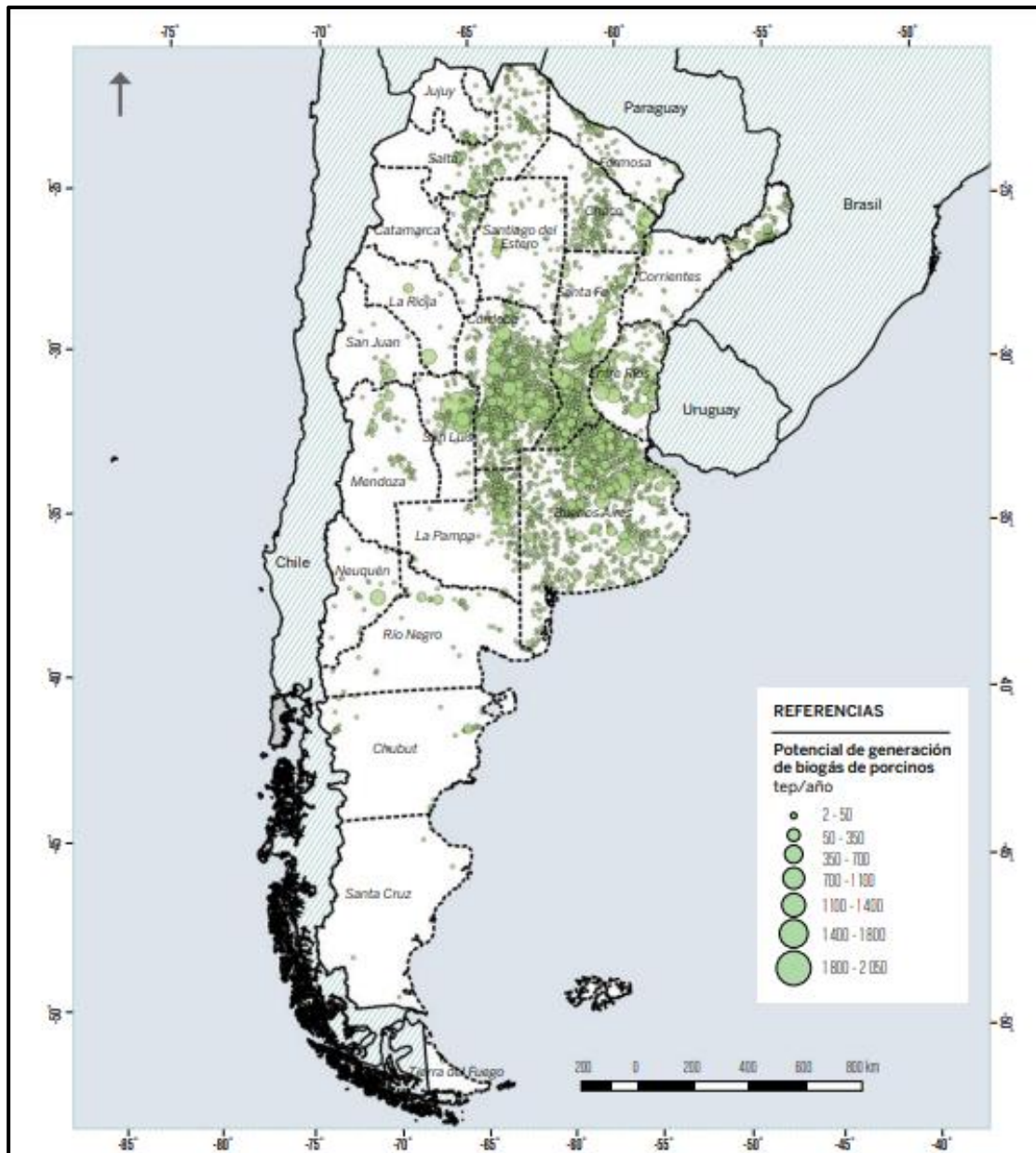


Figura 3. Distribución de productores porcinos en Argentina, según su potencial de generación de biogás (FAO, 2019).

La mayor cantidad de efluentes producidos por la actividad lechera, se da en las instalaciones de ordeño. Se componen principalmente por el agua de lavado de los establecimientos y del equipamiento utilizado, y también de las deyecciones de los animales. En la Figura 4 queda representada la distribución de tambos en la Argentina, según potencial de generación de biogás. Estos efluentes por sus características fisicoquímicas tienen un alto potencial para la producción de biogás (FAO, 2019).

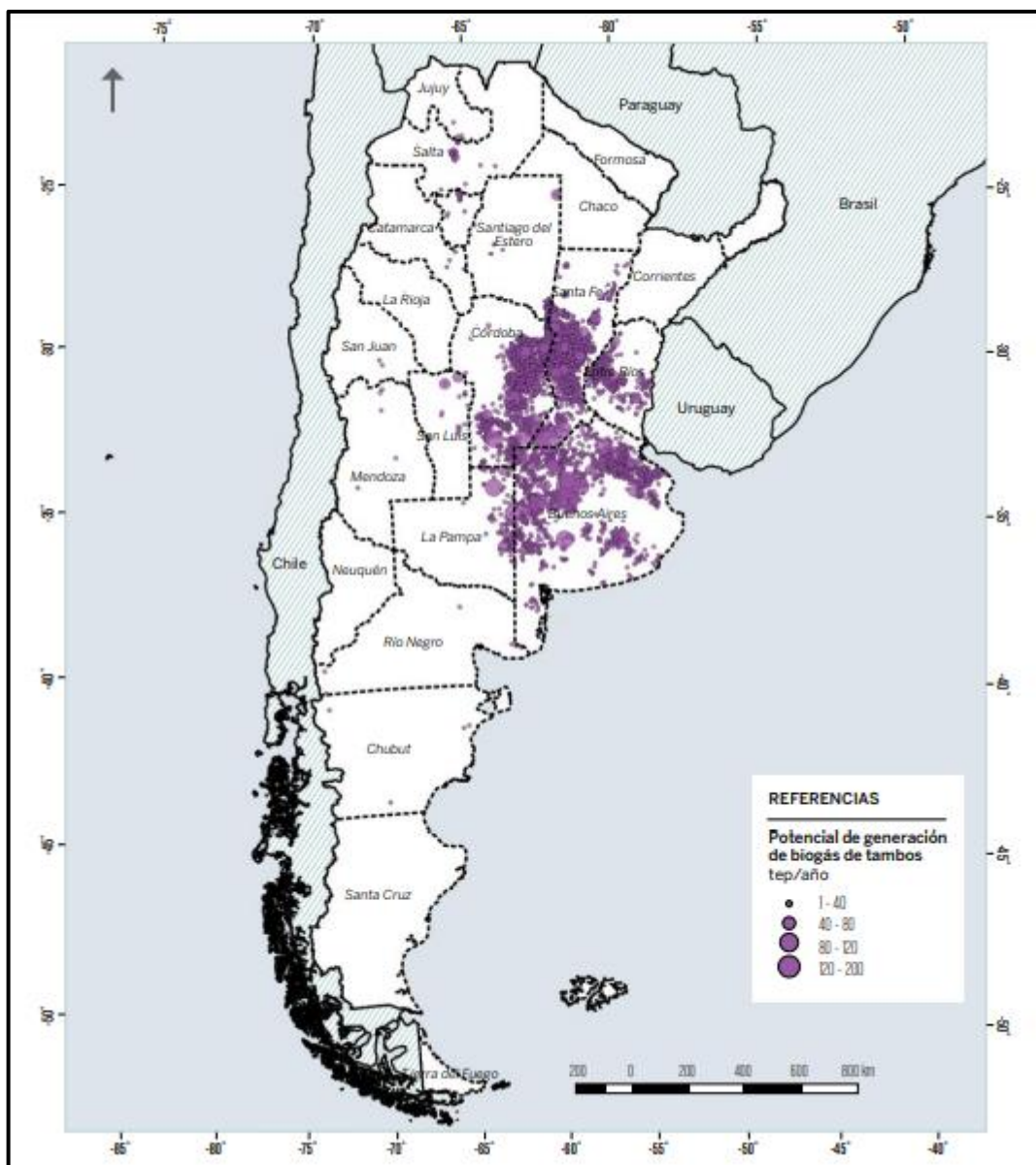


Figura 4. Distribución de tambos en la Argentina, según potencial de generación de biogás (FAO, 2019).

2.3. Energía de Biomasa

La energía de biomasa es energía solar, convertida en materia orgánica por la vegetación, que se puede recuperar por combustión directa o transformando la materia en biocombustible. En muchas ocasiones, se denomina biocombustibles a aquellos combustibles que están en estado sólido, biocarburantes a los que se obtienen en estado líquido y biogás a los que se obtienen en estado gaseoso (Velo, 2009).

2.3.1. Cultivos y Residuos energéticos

Los cultivos energéticos se consideran adecuados para su uso como sustrato en la DA. Los mismos pueden utilizarse después de la cosecha o almacenarse para que se encuentren disponibles durante todo el año (Atelge *et al.*, 2020).

Los residuos de cultivos como tallos, paja y corteza, son un sustrato utilizado para la producción de energía durante el proceso de DA. Los mismos están compuestos por mezclas lignocelulósicas como celulosa, hemicelulosa y lignina, que son difíciles de digerir debido a esta característica (Atelge *et al.*, 2020).

2.4. Subproductos

Los subproductos, (digestatos y biocarbones) son provenientes de procesos de digestión anaerobia. A nivel mundial este tratamiento ha ganado una amplia aceptación para la gestión de residuos orgánicos junto con la producción de energía (biogás) y la de nutrientes (digestato), ambos productos pueden reutilizarse (Galván *et al.*, 2024).

2.4.1 Residuos orgánicos

Los residuos orgánicos RO son materiales que se pueden degradar biológicamente, es decir, por la acción de microorganismos. Son una parte importante de los residuos domésticos e industriales, y pueden incluir: restos de comida, residuos húmedos, residuos forestales, residuos cloacales, residuos de la industria agropecuarios y alimenticia.

Los RO pueden ser tratados para generar compost, biogás, fertilizantes orgánicos, o para generar energía. Sin embargo, si no se gestionan adecuadamente, pueden tener impactos negativos en el medioambiente, como: generación de GEI, principalmente metano, contaminación de agua y suelo, generación de malos olores y plagas, pérdida de recursos, impacto en la biodiversidad (Pedreño *et al.*, 1995).

2.5. Digestato o Biodigestato digerido

Se trata de una mezcla compleja, compuesta por fracciones líquidas y sólidas, que presenta tanto oportunidades como retos. El biodigestato es rico en nutrientes y puede servir como fertilizante. Está compuesto principalmente por materia orgánica parcialmente degradada, microorganismos y compuestos inorgánicos y se puede separar en dos fracciones, líquida y sólida. Debido a sus características, el mismo puede ser utilizado como biofertilizante para cultivos. El digestato es el material que queda tras la DA (descomposición en condiciones de poco oxígeno) de una materia prima biodegradable. Esta digestión es un proceso versátil que puede utilizar muchos tipos diferentes de materias primas, tales como: lodos de depuradora, desechos animales, residuos agrícolas, industriales, cultivos energéticos, residuos municipales, lodos de aguas residuales, desechos de alimentos u otros productos de desecho orgánicos. Además, produce dos productos principales: digestato fibroso que se compone de formas sólidas y líquidas, y el biogás de origen natural que se emite durante el proceso de DA. Este puede definirse como un subproducto que proviene del tratamiento anaeróbico y contiene diferentes productos finales del metabolismo microbiano, juntamente con la fracción de material que no ha sido degradado en el proceso (Singh *et al.*, 2020). Durante el proceso de DA, se genera como subproducto grandes cantidades de digestato. El mismo es un producto húmedo, semi líquido, que contiene principalmente compuestos orgánicos, minerales y biomasa de organismos vivos que no fueron descompuestos durante el proceso de DA. Como los

sustratos en el proceso pueden ser variados, también el digestato puede tener diferentes propiedades fisicoquímicas (Samoraj *et al.*, 2022). El digestato se produce tanto por acidogénesis como por metanogénesis y cada uno tiene características diferentes. Cuando se produce una descomposición adicional de estos productos por separado, se pueden extraer residuos valiosos de cada uno de ellos, lo que hace que la DA sea una forma eficiente y rentable de producir energía limpia y renovable, también de reciclar y reducir los materiales (Chong *et al.*, 2022). El digestato obtenido del tratamiento de los residuos orgánicos en las plantas de biogás es un recurso agrícola de especial interés (Martínez, 2024).

A su vez el digerido puede separarse en dos fracciones, la fracción sólida (FS) y la fracción líquida (FL). FS representa aproximadamente el 30% del volumen total del líquido digerido, también denominado como "Biosol". Esta fracción puede ser compostada o utilizada como enmienda orgánica para enriquecer el suelo, siempre y cuando haya pasado por un proceso de estabilización que garantice su efectividad. La FL o "Biol", representa el 70% del digerido, la misma contiene la mayor concentración de nutrientes provenientes del digestato, lo que la vuelve semejante a la composición de fertilizantes inorgánicos, por lo que puede ser utilizado como biofertilizante para los cultivos y la mejora de la calidad del suelo (Bres *et al.*, 2021).

Los digestatos son ricos en nutrientes como N (aproximadamente un 21%), P (aproximadamente un 3,5%) ambos en formas disponibles para las plantas, también contienen otros macros y micronutrientes, por esto se considera que puede enriquecer el suelo y mejorar su estructura, capacidad de absorción, las características físicas y químicas del suelo, reduciendo la densidad aparente, la saturación hidráulica, la conductividad y mejorando la retención de humedad, siendo utilizado como biofertilizante mejorando el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Nkoa, 2014). Es importante resaltar que la composición del digerido puede variar según la naturaleza del sustrato que se aplique, el mismo puede ser único como en el caso de la monodigestión o combinaciones de sustratos en el proceso de codigestión; también va a depender del reactor que se utilice, el tiempo de retención, entre otros factores determinantes (Drosg *et al.*, 2015).

2.5.1. Composición del digestato

La composición del digestato varía según el sustrato o los sustratos que se utilicen para el proceso de DA y de la configuración del biodigestor. Pero en general poseen nutrientes biodisponibles como N, P y K. Se sugiere que el digestato contiene más N disponible en forma de amonio ($\text{NH}_4^+ \text{N}^-$) que el sustrato original utilizado para producirlo (Samoraj *et al.*, 2022). El contenido de (NH_4^+) está relacionado directamente con el contenido de nitrógeno total (NT) del sustrato original. Los digestatos de materias primas con alta degradabilidad como lo son el estiércol de aves, el purín de cerdo, granos de cereales, se caracterizan por altas proporciones de NH_4^+ y poca relación (C/N). En cambio, las materias primas fibrosas con bajo contenido de N dan resultados bajos de NH_4^+ (Moller y Muller, 2012). Esta forma de N puede perderse fácilmente por la volatilización del NH_4^+ durante el almacenamiento y la aplicación del digerido en suelos. Además, el NH_4^+ tiende a nitrificar rápidamente en el suelo en condiciones favorables, lo cual lo vuelve altamente disponible para los cultivos, pero también pueden producirse la lixiviación del digerido a través del suelo, pudiendo así contaminar el acuífero más próximo (Alburquerque *et al.*, 2012).

El pH de los digestatos suele ser ligeramente alcalino, esto se debe a que durante la DA se produce la degradación de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y la producción de NH_4^+ (Tambone *et al.*, 2009). Si el tiempo de retención hidráulica (TRH) dentro del digestor es menor que el tiempo necesario para la estabilización del digerido (entre 30 y 90 días), según los sustratos utilizados, la región geográfica donde se encuentre el digestor y la presencia de inóculos que aceleran las reacciones (Alcobendas, 2020), puede llevar a que el mismo emita olores, contenga compuestos orgánicos tóxicos, patógenos y tenga una fitotoxicidad alta (Nkoa, 2014). Estos pueden causar efectos nocivos en los cultivos, tales como el retraso en la germinación de la semilla, la muerte de las plantas o la reducción de su crecimiento (Alburquerque *et al.*, 2012).

2.5.2. Separación sólido-líquido del digerido

Al separar el digestato se obtienen dos fracciones, la líquida y la sólida. Las dos fracciones tienen diferentes propiedades agronómicas, lo que las vuelve eficiente para la sustitución total o parcial de los fertilizantes minerales (Tambone *et al.*, 2017). La FL suele ser empleada como fertilizante líquido o también se le realiza una extracción del amoníaco (NH_3) para así poder separar y utilizar por separado los nutrientes que lo componen. La FS puede ser utilizada como enmienda orgánica, a través del proceso de compostaje (Teglia *et al.*, 2011). Los fertilizantes son aplicados en el suelo para favorecer a la nutrición de los cultivos, debido a que aportan macronutrientes N-P-K. Estos son esenciales para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la productividad en los cultivos. En el caso de las enmiendas orgánicas se utilizan para restaurar la calidad de los suelos (permeabilidad, infiltración del agua, estructura, etc.) que han sufrido un proceso de degradación, el cual puede limitar la productividad de los cultivos (Teglia *et al.*, 2011). La FL concentra la mayor cantidad de N en forma de NH_3 aproximadamente un 60%, el mismo está disponible para los cultivos (Tambone *et al.*, 2017). Es necesario evaluar principalmente la salinidad y los índices de fitotoxicidad de las FL antes de aplicar los digestatos con fines fertilizantes (Samoraj *et al.*, 2022). Es por este motivo que se estudia la transformación de digestato sólido-líquido en un biocarbón.

2.5.3. Estabilización del digestato

Esto se realiza porque, si se aplica agronómicamente el digerido que no ha sido estabilizado por completo, puede generar efectos negativos en los suelos y cultivos. Esto provoca principalmente una activación acelerada de los microorganismos del suelo, generando un alto desprendimiento de CO_2 que puede crear condiciones de hipoxia/anoxia en las raíces, una inmovilización del nitrógeno inorgánico en el suelo, causando una deficiencia nutricional en las plantas. Además, se produce la generación de compuestos fitotóxicos, lo que limitaría su uso como fertilizante. Si el digestato, no estabilizado, no es aplicado inmediatamente y se almacena, puede generar problemas, como la emisión de olores, la producción de compuestos tóxicos y el desarrollo de organismos patógenos (Méndez *et al.*, 2011).

2.5.4. Almacenamiento del digestato

El almacenamiento dependerá del tipo de digestato y del tratamiento que se le requiera dar posteriormente. Es importante evitar las pérdidas de N por volatilización durante el almacenamiento. Para evitar la lixiviación, fugas o derrames del digerido se deben impermeabilizar las estructuras utilizadas para el almacenamiento.

2.6. Biocarbón; Biochar

El término Biocarbón o 'Biochar' fue acuñado por Peter Read para definir el carbón usado como mejora del suelo (Read, 2009). Este es el nombre que recibe el carbón vegetal cuando es empleado como enmienda para el suelo. Es decir, es biomasa de origen vegetal procesada por medio de la pirólisis (quema) (Geoffrey, 2008). El Biochar es un residuo alto en carbono que hoy en día es producido a través de modernos procesos de pirólisis, que es una descomposición directa de la biomasa por medio del calor y en ausencia de oxígeno —lo cual evita la combustión— para obtener una serie de productos sólidos ósea el Biochar, líquidos como los biocombustibles y gaseosos como el gas sintetizado (Gaunt y Lehmann, 2008). Este uso del biocarbón se está investigando como una forma de secuestrar carbono para reducir las emisiones de dióxido de carbono. El Biochar es un material estable, rico en carbono, y puede perdurar en el suelo durante miles de años (Geoffrey, 2008).

Es importante señalar que los efectos del biocarbón pueden variar en función de la fuente y la calidad del biocarbón, la dosis aplicada y las condiciones específicas del suelo y los cultivos. Por lo tanto, es de suma importancia contar con antecedentes y datos sobre el uso de sustratos e identificar limitaciones del proceso de DA, tipos de digestatos y sus efectos en la aplicación en suelo, u otros usos potenciales, de modo que se facilite el manejo de los subproductos generados y también es fundamental realizar estudios detallados y ensayos de campo para evaluar adecuadamente los beneficios potenciales del biocarbón en un contexto específico.

El biocarbón tiene un papel distintivo en el secuestro de carbono. Puede secuestrar carbono a largo plazo, reduciendo así el CO₂ atmosférico y mejorando las aplicaciones económicas y medioambientales centradas en la sostenibilidad (Novotný *et al.*, 2023). El biocarbón es un sólido poroso, que tiene un alto contenido de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, con excelentes propiedades para la retención de agua y la liberación gradual de nutrientes (Piccoli *et al.*, 2020). En cuanto a su aplicación agrícola, ha demostrado mejoras en las propiedades del suelo en comparación con la aplicación de digestato sin tratar (Ronga *et al.*, 2020; Abdo, 2021). La producción de biocarbón mediante pirólisis a temperatura moderada presenta características interesantes en términos de huella de carbono y un papel distintivo en el secuestro de carbono.

2.6.1. Utilización agronómica del digerido y biocarbón

El uso del digerido es parte fundamental del ciclo de reincorporación de la MO y nutrientes a los sistemas productivos. Se puede enmarcar al uso del digestato como fertilizante dentro del concepto de economía circular, contribuyendo así también al tratamiento de residuos orgánicos y a la sostenibilidad agrícola (Ning *et al.*, 2017). La capacidad del digerido para ser utilizado como fertilizante

depende de la degradabilidad de la MO. Una medida indirecta de la degradabilidad es el grado de estabilidad biológica, la cual hace referencia a la medida en que la MO biodegradable se descompuso.

El uso de digestatos en la agricultura presenta desafíos que deben abordarse cuidadosamente. Entre las desventajas se encuentra la elevada proporción de agua en su composición, lo cual dificulta su transporte, especialmente a distancias considerables desde el lugar de producción hasta su destino final. Además, estos pueden contener metales pesados y organismos patógenos, representando así un riesgo potencial para la salud humana y el ambiente si no se gestionan adecuadamente. Otro inconveniente asociado es la posibilidad de pérdidas de N cuando el digestato se aplica directamente al suelo y cultivos sin un tratamiento previo. Esto puede resultar en la oxidación del amoníaco, con efectos negativos tanto en la eficiencia del fertilizante como en la salud de las plantas, ya que el amoníaco puede ser fitotóxico. La gestión inadecuada de los digestatos también puede tener consecuencias ambientales, como el aumento de las emisiones de GEI, contribuyendo así a problemas como el cambio climático. Por lo tanto, es crucial implementar prácticas de tratamiento y manejo adecuadas para minimizar estos riesgos y aprovechar de manera sostenible los beneficios potenciales de los digestatos, que incluyen su capacidad para ser una fuente de nutrientes para el suelo y las plantas, así como su contribución a la gestión eficiente de los residuos orgánicos (Samoraj *et al.*, 2022).

El digestato resultante de la DA tiene diversas aplicaciones beneficiosas, como mejorar las propiedades del suelo, servir como fertilizante orgánico, como sustrato vegetal y en rellenos sanitarios. También puede ser empleado en la recuperación de suelos degradados. Su versatilidad brinda oportunidades para promover la sostenibilidad agrícola y la gestión efectiva de residuos, siempre que se realice una gestión cuidadosa para maximizar los beneficios y minimizar posibles impactos negativos (FAO, 2011).

Además, permite mejorar el intercambio catiónico del suelo, pudiendo así ser utilizado como mejorador de suelos degradados, debido al incremento de la disponibilidad de nutrientes del mismo. También permite aumentar la humedad del suelo y crear un microclima adecuado para los cultivos. Siendo así una fuente orgánica de fitorreguladores en pequeñas cantidades, que promueve las actividades fisiológicas y estimula el desarrollo de las plantas, favoreciendo el enraizamiento (aumenta y fortalece la base radicular), amplía la fase foliar, mejora la floración y aumenta el poder germinativo de las semillas. Todo esto lleva a un incremento significativo de los cultivos (Cerrano, 2018). Informes de la FAO (2011) indican que el digestato confiere a los suelos arenosos una mayor cohesión, mejorando con ello la retención de los nutrientes, la estructura y la capacidad de retención de humedad del mismo. Además, permite controlar de forma efectiva los procesos de erosión y favorece su actividad biológica, reactivando los ciclos biogeoquímicos del suelo. Adicionalmente, mejora la porosidad, y por consiguiente la permeabilidad y aireación.

Cuando se aplica a los suelos, sirve como sumidero de carbono a largo plazo, ayudando a mitigar los gases de efecto invernadero y el cambio climático (Peng y Pivato, 2019). Esto lo convierte en una herramienta prometedora para la agricultura sostenible y las estrategias de gestión del carbono (Manikandan *et al.*, 2023).

En este sentido, se están montando líneas de investigación orientadas a solucionar y mejorar la capacidad tecnológica del sector. Esto puede ayudar a reducir la lixiviación de nutrientes, retenerlos

en el suelo y mejorar su disponibilidad para las plantas, lo que puede ser beneficioso para el crecimiento de los cultivos. El biocarbón, una forma muy estable de carbono orgánico, contribuye a la estabilidad de la materia orgánica en el suelo, evitando su rápida descomposición y proporcionando un suministro constante de nutrientes (Khan *et al.*, 2023).

En la Tabla 2 se observan los parámetros a determinar en el biocarbón para su uso con fines agronómicos.

Tabla 2. Materias primas para la DA (FAO, 2011).

Detalle	Unidades
Materia Seca	en porcentaje g/g o g/L
Sólidos Volátiles	en porcentaje g/g o g/L
Carbono orgánico total	COT g/g o g/L
Carbono orgánico disuelto	COD g/g/ o g/L
DQO total	DQOmg/g o mg/L
DQO disuelta	DQOd mg/g o mg/L
Nitrógeno total	Nt g/g o g/l
Fósforo total	Pt g/g o g/L
Potasio total	Kt g/g o g/l

2.6.2. Momento de aplicación del digestato y biocarbón en suelos

Es importante conocer la dosis y el momento en el cual es adecuado aplicar el digestato como biofertilizante. Una dosis muy alta puede llegar a generar efectos fitotóxicos en los cultivos. Y una aplicación en periodos del año, como otoño e invierno, donde existe una baja absorción de nutrientes por parte de las plantas puede llegar a generar una lixiviación y escorrentía de los nutrientes que el mismo aporta hacia las aguas subterráneas y superficiales, generando una eutrofización de estos cuerpos de agua y por consecuencia el deterioro de su calidad. También un exceso de nutrientes puede liberar desde el suelo a la atmósfera por volatilización de NH_3 o GEI. Por ello debe programarse el retiro del digerido para los meses de primavera/verano o bien mantenerlo almacenado hasta el momento de su aplicación, el almacenamiento debe ser en tanques cerrados, para evitar las emisiones de gases de NH_3 y CH_4 (FAO, 2011). La dosis de digerido a utilizar, suele calcularse en base a los kilogramos de N por hectárea (kg de N/ha), que sean necesarios aplicar para el tipo de cultivo y así poder sustituir el empleo de fertilizantes inorgánicos (FAO, 2019).

2.7. Biogás

La DA genera como producto principal biogás, el cual es un combustible gaseoso compuesto mayormente por gas metano (CH_4 55- 70%) y CO_2 (30-45%) entre otros compuestos en menores cantidades y puede utilizarse para producir electricidad, reemplazar al gas natural, etc. El biogás es una fuente de energía renovable y versátil (Kumar *et al.*, 2023). El biogás reemplaza al gas natural principalmente, se calcula que 1m^3 de biogás equivale a $0,6\text{ m}^3$ de gas natural. Los usos que se le puede dar al biogás son variados. Se puede utilizar para la obtención de energía térmica (calor), para ser empleada en las cocinas y calentar agua. También para la generación de electricidad y como combustibles para vehículos (FAO, 2011).

En los últimos años se le ha prestado cada vez más atención por su potencial para mitigar los problemas medioambientales, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a la generación de energía sostenible.

La mayor cantidad de biogás producido se reparte entre la Unión Europea, Estados Unidos y China, esto se debe a la legislación promulgada por cada país, los principales objetivos de generación del mismo es la producción de energía renovable y el tratamiento de los residuos orgánicos (Norouzi y Dutta, 2022).

Las plantas de biogás ubicadas en Argentina se encuentran en su mayoría en la provincia de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, principalmente establecidas en zonas rurales, esto se debe a que en las mismas se desarrollan actividades agrícolas-ganaderas, que generan una gran cantidad de sustratos utilizados para la producción de este biocombustible, como lo son el purín de cerdo, estiércol de vaca, residuos de faena, lácteos, ensilados de diversos cultivos, entre otros, y utilizan el biogás producido para la generación de electricidad, el tratamiento de los residuos generados o como autoconsumo (Bres *et al.*, 2021).

2.8. Biorrefinería

Es un tipo de refinería que convierte biomasa (residuos orgánicos de origen animal y vegetal) en otros subproductos beneficiosos, como biocombustibles y productos químicos. La Agencia Internacional de la Energía ha definido la biorrefinación como el procesamiento sostenible de biomasa para convertirla en una variedad de biocompuestos (comida, sustancias químicas, materia prima) y bioenergía (biocombustibles, electricidad o calor).

En la Figura 5 se muestra el ciclo de vida de las biorrefinerías, una biorrefinería aprovecha los varios componentes de la biomasa y sus intermediarios para maximizar el valor de esa biomasa, por medio de la producción de múltiples productos. Una biorrefinería podría, por ejemplo, producir bajos volúmenes de productos químicos de alto valor o altos volúmenes de combustibles líquidos de bajo valor, como biodiésel o bioetanol. Al mismo tiempo puede generar electricidad y calor, a través de cogeneración, para su uso propio y quizás lo suficiente para vender localmente la electricidad. Los productos de alto valor incrementan la rentabilidad, mientras los combustibles de alto volumen ayudan a cubrir las necesidades energéticas, y la electricidad producida ayuda a disminuir los costos energéticos y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales energéticas tradicionales. Una biorrefinería es una estructura que integra procesos de conversión de biomasa y equipamiento para producir combustibles, energía y productos químicos a partir de la biomasa. El

concepto de biorrefinería es análogo al de refinerías de petróleo, los cuales producen productos y combustibles múltiples derivados del petróleo (García, 2013).

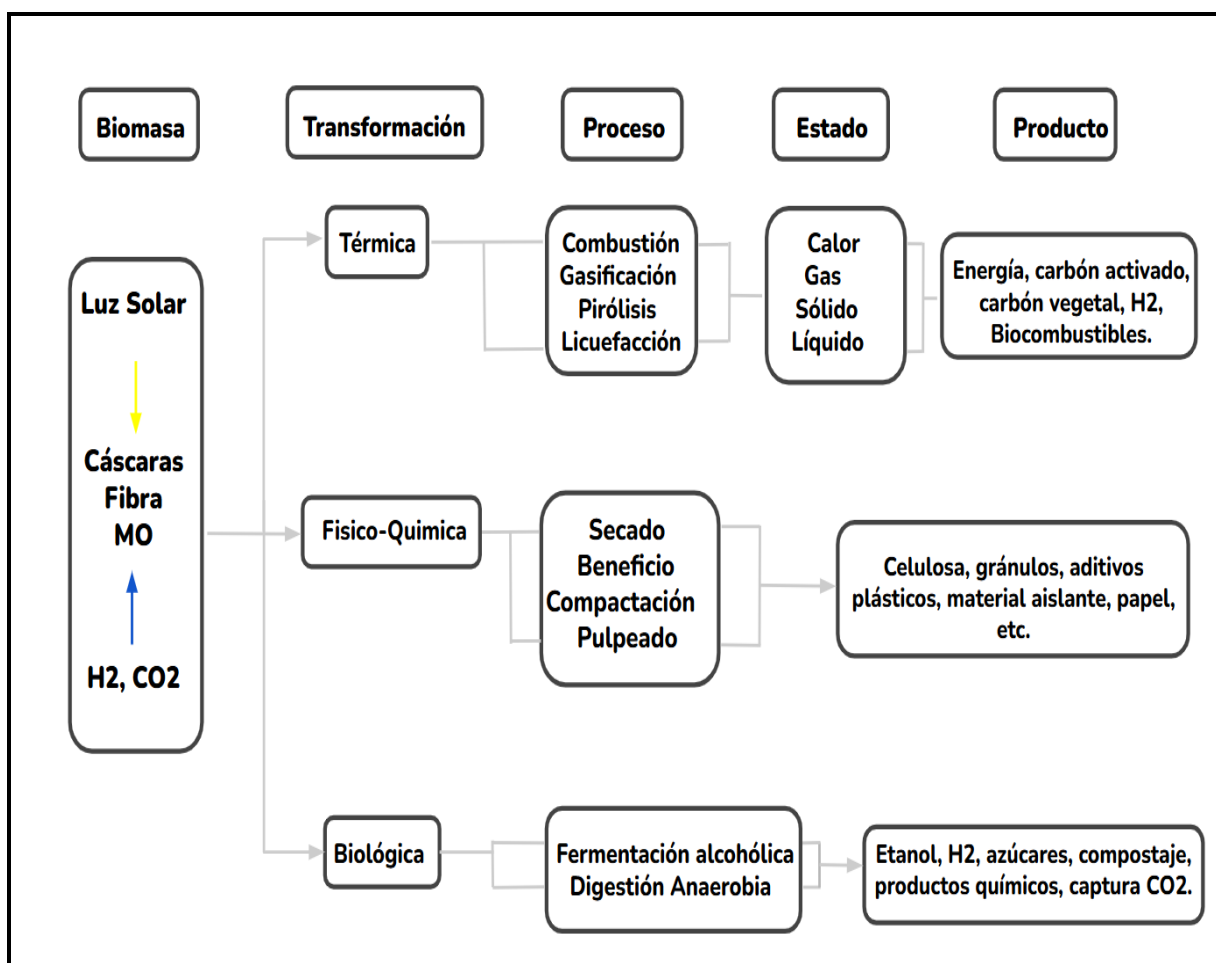


Figura 5. Modelo de ciclo de vida de Biorrefinerías (Jesús A. Torres Ortega *et al.*, 2017).

2.9. Codigestión

El proceso de codigestión consiste en la DA de dos o más sustratos orgánicos que tienen entre sí características complementarias, es decir, que su combinación puede volver más eficiente el proceso. Al realizar el proceso de codigestión se puede lograr un mayor equilibrio de los nutrientes presentes en los sustratos utilizados y alcanzando un incremento de la carga orgánica biodegradable. Al lograr el efecto de sinergia de los microorganismos, se alcanzan mejores niveles de relación C/N y de humedad y se reduce la inhibición que producen las altas concentraciones de amoníaco, AGV y otros intermediarios de la DA. Además, al tratar varias corrientes de efluentes y residuos en una misma instalación, se generan beneficios principalmente económicos en los procesos de tratamiento de los mismos (Guerrero *et al.*, 2016 y Zhang *et al.*, 2013).

2. 10. Pirólisis

La producción de biocarbón mediante pirólisis a temperatura moderada presenta características interesantes en términos de huella de carbono. La pirólisis a temperatura moderada

procede de una combinación de reacciones endotérmicas y exotérmicas (Brown, R., J. Lehmann, y S. Joseph, 2009). Mientras que las fases iniciales de la descomposición de la biomasa requieren un aporte de calor (endotérmicas), la posterior conversión de volátiles y alquitranes en biocarbón y otros productos puede liberar calor (exotérmicas) (Huang *et al.*, 2020). Esta doble naturaleza del proceso influye en el balance energético global y en la huella de carbono. La pirólisis a temperatura moderada requiere un aporte energético externo, ya que parte del calor necesario para el proceso puede ser suministrado por las reacciones exotérmicas. En consecuencia, esto puede dar lugar a una menor huella de carbono asociada al consumo de energía (Gupta *et al.*, 2022). Además, el biocarbón tiene un papel distintivo en el secuestro de carbono. Cuando se aplica a los suelos, sirve como sumidero de carbono a largo plazo, ayudando a mitigar los gases de efecto invernadero (Peng y Pivato, 2019). Lo que lo convierte en una herramienta prometedora para la agricultura sostenible y las estrategias de gestión del carbono (Panigatti, 2010).

2.11. Suelo

El suelo es una formación de origen natural que se halla en la intersección de la litosfera, hidrosfera, biosfera y atmósfera. Resulta del accionar de los factores formadores como clima, biota, material originario (roca-sedimento), relieve, tiempo y actividades humanas. Posee constituyentes minerales y orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso, los que están interrelacionados conformando distintos niveles de organización con variaciones espaciales (verticales y laterales) así como temporales (desde horarias, estacionales, hasta centenarias y aún milenarias). Se presenta en la superficie terrestre como un continuo (pedosfera) interrumpido por otras formaciones naturales: hielo, roca, agua, o bien por áreas urbanas. Como manto posee heterogeneidades laterales conforme varían geográficamente los factores del medio, por lo que está integrado por distintas clases de suelos las que gradan entre sí sin solución de continuidad. A esa heterogeneidad horizontal (paisaje) le acompaña una anisotropía vertical (perfil) que registra la prueba irrefutable de la participación de la energía y la materia en procesos tales como alteraciones, transferencias, pérdidas y ganancias. Estas acciones se manifiestan en forma de propiedades (físicas, químicas, fisicoquímicas, y biológicas) que cuando son propicias favorecen el enraizado de las plantas terrestres y el desarrollo de otras formas biológicas. Así el suelo contiene vida en su superficie y en su seno, y en tal sentido es un sistema viviente, y a pesar de que no se reproduce ni se multiplica y que carece de genes, suele evolucionar y registrar herencias (Panigatti, 2010).

2.12. Materia orgánica de los suelos

La MO es materia conformada por compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural. El elemento fundamental de la MO es el carbono, y está compuesta principalmente de C, H₂, O₂, N y S. La materia orgánica es importante para los suelos, ya que aporta nutrientes a los organismos autótrofos y descomponedores, modifica las propiedades físico-químicas del suelo, permitiéndole retener más agua y evitar su degradación, ayuda a regular la fertilidad química, así como el mantenimiento de la biodiversidad y la estructura física de los suelos.

La MO se puede clasificar en tres tipos en función de su estado de descomposición: materia orgánica fresca, materia orgánica parcialmente descompuesta, materia orgánica descompuesta. Para mejorar el contenido de materia orgánica del suelo se pueden realizar acciones como: Adición de residuos vegetales, abono verde, incorporación de rastrojos, rotaciones de cultivo, fabricación y aplicación de compost o fertilizantes orgánicos como el biocarbón. Las funciones del suelo se ven directamente afectadas por la cantidad y la calidad de la MO que contiene. Por ello, la MO, es un constituyente y un indicador de calidad del suelo (Gregorich y Canter, 1997; Franzluebbers, 2002; Baldock y Nelson, 2000). La atención que ha merecido la MO se debe a que influye en múltiples propiedades de los suelos, a pesar de que en la mayoría de ellos suponga una cantidad porcentualmente menor, dependiendo de la categoría del suelo de que se trate. La MO tiene incidencia sobre las propiedades físicas, químicas, biológicas y da lugar a múltiples interrelaciones como: su formación y estabilización, sellado de su superficie, porosidad y aireación, movimiento del agua, capacidad de retención de agua disponible para las plantas, laboreo, oscurecimiento ayuda a mantener la temperatura y que sea menor la radiación reflejada, prevención a la erosión, pH, estabilización de los nutrientes (N, P, S), poder depurador frente a vertidos, constituye una reserva de energía por las grandes cantidades de C y nutrientes, crecimiento de plantas secuestro de carbono. Por todo ello, la MO constituye un indicador importante de la calidad del suelo y de su productividad (Larson y Pierce, 1994).

2.12.1. Ciclos biogeoquímicos

Los elementos químicos van pasando sucesivamente por los distintos compartimentos que integran el ecosistema en el que se hallan. Este comportamiento da lugar a un ciclo y es el resultado de la acción de la biomasa microbiana que afecta a los elementos biológicos, es decir, al C, N, F y S. El concepto de flujo lleva aparejada la idea de flujo y tasa de renovación (*turnover*). La intervención de los seres vivos en los ciclos de los distintos elementos se denominan Ciclos biogeoquímicos.

El proceso por el cual la MO es descompuesta y renovada de forma continuada se conoce como ciclo, reciclado o turnover. El tiempo de reciclado expresa el tiempo requerido para que tenga lugar el 90% de la descomposición de un sustrato (Cresse *et al.*, 1993). La tasa de renovación puede variar en función de las características biodegradables de la MO. En función a la rapidez de turnover, se define la velocidad de la tasa de mineralización, si la tasa de renovación es rápida, la mineralización también lo será y por lo tanto el almacenamiento de la MO en el suelo será bajo. Por el contrario, si un reciclado o turnover es lento expresa una mineralización débil, con lo que la MO se acumulara en el suelo.

En un sistema suelo-planta-atmósfera, la mayoría de los elementos liberados en la mineralización son absorbidos por los microorganismos y las raíces. Entran de formar parte de los tejidos celulares como componentes orgánicos, quedando almacenados e inmovilizados (secuestrados) durante un cierto tiempo en la biomasa.

El C es incorporado a la biomasa de las plantas a partir del CO₂ atmosférico, por medio de la fotosíntesis, mientras que el N, puede ser absorbido del suelo o bien, en algunas plantas, ser fijado biológicamente a partir del N₂ atmosférico. En los suelos, solo habla ciclos semicerrados, debido a las

pérdidas más o menos importantes como la lixiviación, erosión y volatilización o bien ciclos abiertos, como en el caso de un agroecosistema, en el que las cosechas exportan elementos fuera del sistema en forma de alimentos, fibras, madera, etc.

Las plantas extraen del suelo mayor cantidad de N que de cualquier otro nutriente, se encuentra en los horizontes superficiales, más de 90% del N se halla en formas orgánicas (Kelley y Stevenson, 1996), ya sea en la MO fresca o en el humus. el N desempeña un papel clave en la nutrición de las plantas y en cómo lo absorben radica una de las controversias entre la agricultura convencional y la agricultura orgánica, Por lo general, en química agrícola se considera que las formas orgánicas no pueden ser directamente absorbidas por las plantas, requiriendo su mineralización previa. En los suelos el P puede encontrarse en forma de apatito y en las formas orgánicas. Ni una ni las otras son formas asimilables por las plantas, por lo que se requerirá un proceso de mineralización para que pase a ser disponible para las plantas.

Cuando se añade N-Fertilizante, la eficiencia de la fertilización nitrogenada y las disponibilidades de N para las plantas vendrán afectadas por la importancia de la relación mineralización- inmovilización del N por los microorganismos.

2.12.2. Fertilidad de suelos

La producción de alimentos de calidad constituye el punto central de la agricultura. En un agroecosistema el ciclo de nutrientes se caracteriza por ser un ciclo abierto. Para que un suelo produzca útilmente y poder asegurar así la alimentación a una población mundial creciente, hay que restituir aquellos nutrientes que sean exportados por las cosechas. Según Thaer (1828) como el humus es una producción de la vida, igualmente es la circunstancia de la que esta depende, por lo tanto, el humus sería la única fuente de alimento para las plantas y lo que habría que aportar para asegurar la restitución de los nutrientes. La práctica de fertilización de suelos consiste en restituir al suelo los nutrientes que extraen los cultivos a través de la agricultura basada en el uso de agroquímicos. No debe verse el suelo como un vertedero que todo lo admite, un exceso de purines aplicados al suelo puede producir desequilibrios nutricionales, por el exceso de N aportado, este puede llegar alcanzar y contaminar la capa freática (Labrador *et al.*, 2002).

2.12.3. Agricultura orgánica/sustentable

La agricultura orgánica (AO) se desarrolla en tiempos de Liebig, como un movimiento de resistencia al uso de fertilizantes químicos, a la mecanización y a la industrialización de la agricultura. Con el descubrimiento del DDT y la aplicación masiva e incontrolada de fitosanitarios, ha pasado a representar la oposición al empleo de agroquímicos en agricultura (De Roose y van Parijs, 1991). A partir de finales de la década de 1960, se empezó a generalizar el interés por este tipo de agricultura. Este estilo de producción tiene como objetivo buscar soluciones que tengan en cuenta la sostenibilidad y sustentabilidad del sistema, para producir productos sanos y exentos de cualquier tipo de residuo (Cook y Lee, 2000). La AO, confía en un adecuado manejo de la MO, para mejorar propiedades químicas, biológicas y físicas de los suelos, para optimizar la producción, favorecer e intensificar los ciclos biológicos en el agroecosistema, mantener e incrementar la fertilidad del suelo a largo plazo,

controlar la erosión, trabaja con los sistemas naturales más que buscar dominarlos, le permite a los productores agrícolas un beneficio adecuado y satisfacciones en su trabajo, la producción de alimentos de alta calidad nutricional y en cantidad, evitar cualquier forma de contaminación que se pueda derivar de técnicas agrícolas y mantener la biodiversidad.

La misma siempre busca soluciones a largo plazo, preventivas más que correctoras, como el control de la erosión, el diseño de rotación de cultivos para incidir sobre el ciclo de nutrientes, el control integral de plagas, para conseguir la sostenibilidad y sustentabilidad del agroecosistema (Stockdale *et al.*, 2001). Se destaca por la exclusión del uso de fertilizantes de síntesis y pesticidas en cultivos y la de reguladores del crecimiento y aditivos en la alimentación animal.

2.12.4. Papel de los suelos en el secuestro de carbono y cambio climático

Los suelos constituyen un compartimento terrestre que actúa como reservorio de carbono orgánico, por lo general, muchos suelos tienen gran capacidad de secuestro de C. La potencialidad de los suelos para almacenar MO y la extensión de la cubierta edáfica en su conjunto explican su importancia en el balance global de C. La gestión de la MO del suelo permite incidir a corto y medio plazo en el secuestro de C. El papel de los océanos en el secuestro de C en forma de carbonatos precipitados es de mucha mayor importancia, no obstante, su efecto es a muy largo plazo y, además, no resulta posible actuar sobre él.

Las actividades humanas relacionadas con la agricultura inciden en la dinámica, la química y el balance de C orgánico en los suelos. Los sistemas de cultivos pueden hacer aumentar o disminuir el contenido de MO del suelo o bien generar CO₂ aerobio y CH₄ anaerobio.

El secuestro de carbono hace referencia al almacenamiento de C en una forma estable en una cierta escala temporal. Puede tener lugar de forma directa por paso a formas inorgánicas, tales como CaCO₃ y MgCO₃ o por formación de biomasa (fotosíntesis) y de forma indirecta, como la MO del suelo. Entre los aspectos a tener en cuenta en los estudios de secuestro de C en los suelos se puede destacar, la capacidad de un suelo para actuar de sumidero de C, mecanismos de fijación de C, efectos del tipo de uso del suelo sobre el contenido de MO, balance de C en un determinado ecosistema, capacidad de retención del agua disponible para las plantas, fertilidad, rehabilitación de suelos degradados, reforestación y planificación del uso de los suelos (Macías *et al.*, 2002). Este conocimiento permitirá llegar a establecer protocolos de monitorización que resulten aceptables y hagan posible verificar el secuestro de C en el sistema suelo-planta, así como poner a disposición de los que toman decisiones mejores criterios para realizar mejores análisis cuantitativos económicos y políticos (SSSA, 2002). De este modo se podrá dar mejor cumplimiento a acuerdos internacionales sobre el cambio climático, tales como el Protocolo de Kioto, para la reducción de emisiones a la atmósfera.

2.13. Nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas

Los elementos que los cultivos necesitan para su crecimiento provienen tanto del aire (CO₂) y del suelo como N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl. A dichos elementos se los puede dividir en dos grupos, los macronutrientes y los micronutrientes. Los macronutrientes son aquellos nutrientes que se necesitan en grandes cantidades en los suelos. El suelo puede llegar a ser deficiente en estos

si el mismo no los posee desde un principio por sus características o si es un suelo cultivado por muchos años y las mismas plantas durante su crecimiento los han extraído. Dentro de los macronutrientes se encuentran el N, P y el K, que como se mencionó anteriormente son los principales componentes de los digestatos, los cuales le confieren un alto valor fertilizante. El N es el nutriente más importante para el crecimiento de las plantas y el suelo lo absorbe en forma de nitrato (NO_3^-) o de NH_4^+ , en su forma inorgánica (FAO, 2002).

2.14. Normativa nacional vigente

En 2012 se promulgó el proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA), el cual, tiene como objetivo el aumento de la producción de energía térmica y eléctrica, generada a partir de la biomasa. Para así asegurar a la población suministro de energía renovable, limpia y confiable, y a su vez generar nuevas oportunidades para el desarrollo del sector agropecuario, forestal y agroindustrial del país (Probiomasa, 2021). En el año 2015 en Argentina se promulgó la ley N° 27.191 “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica”, modificación que amplió la Ley 26.190. La cual tiene el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables de energía eléctrica, como solar, eólica, biomasa, hidráulica, entre otras, hasta alcanzar un 20% del consumo en 2025. Luego de la promulgación de esta ley la generación de energía a partir de biomasa aumentó considerablemente (FAO, 2019). Adicionalmente, en el año 2016 se creó el programa RenovAr que adjudicó 244 proyectos renovables en todo el territorio argentino. Con respecto a la gestión de los digeridos de biorefinerías anaerobias. En el 2019 se promulgó en Argentina la resolución 19/2019 “Norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica”, la cual a través de sus anexos indica los mecanismos de control y fiscalización en cuanto al transporte, uso, plan de aplicación y registro del digerido contemplado.

En Argentina en el año 2019 se aprobó la “Norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica”, a pesar de que la producción de biogás sea una práctica que se desarrolla con anterioridad y por ende la generación de digerido. Esta normativa establece en sus anexos los parámetros fisicoquímicos y las características que deben cumplir, tanto el suelo como el digerido, para aplicar este último como biofertilizante en cultivos y como mejorador de la calidad del suelo (SGAyDS, 2019). Sin embargo, a pesar de esta regulación, la mayoría de las plantas de biogás instaladas en el país se centran únicamente en la producción de energía, y no en el uso agronómico del digerido, esto se debe a que se desconocen las propiedades y usos de los mismos, así como también las tecnologías existentes para su aprovechamiento (Bres *et al.*, 2021).

En la provincia de Córdoba en el año 2017 se aprobó la resolución 29/2017 la cual establece los “Estándares ambientales, de emisión o de efluentes y estándares tecnológicos para la gestión y aplicación agronómica de residuos pecuarios de la provincia de Córdoba” (MAAySP, 2017). Esta resolución brinda herramientas de buenas prácticas agropecuarias (BPA) para la gestión de los mencionados residuos, y establece en su artículo N°8 que los mismos pueden ser entregados a plantas de biogás para ser utilizados como sustrato en la generación de energía.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las características de los digestatos y biocarbones de biorefinerías anaerobias y su aplicación en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa.

3.2 OBJETIVO/S ESPECÍFICOS

- Realizar carbonización de la fracción sólida a partir de diferentes digestatos proveniente de biorefinerías anaerobias y caracterización de los productos obtenidos.
- Determinar y describir el diseño experimental usado para la aplicación directa de digestato/biocarbón en el suelo.
- Analizar su aplicación directa en suelo, sus efectos fisicoquímicos y su actividad microbiológica después del tratamiento.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este proyecto se estudió la aplicación de digestatos y biocarbones provenientes de procesos de DA en suelo y la revalorización de productos y subproductos de procesos anaerobios con integración a sistemas de biorrefinería. Esta se logró trabajando puntualmente sobre el digestato que se obtuvo del proceso de DA y con los biocarbones que derivan del proceso de pirólisis. De este modo se pudo determinar si el tratamiento y generación de estos productos se la puede considerar una estrategia integral para mejorar la calidad del suelo, la sostenibilidad agrícola y la mitigación del cambio climático.

En este trabajo se caracterizaron tres tipos diferentes de biocarbón derivados de digestatos de procesos de DA con una mezcla de diferentes tipos de materias primas y se aplicaron en diversas concentraciones y combinaciones a un suelo típico de la región. Posteriormente, se evaluaron sus efectos sobre propiedades del suelo como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, grado de humificación, cationes y respiración microbiana postratamiento

Para realizar la toma de muestras de suelo, se estudió el área de muestreo utilizando como referencia y antecedentes geopedogeológico el trabajo de Rodríguez (2022) a partir de estos datos quedó definido el tipo y características del suelo estudiado.

4.1 Características del área de estudio

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el Instituto Multidisciplinario de Investigación y Transferencia Agroalimentaria y Biotecnológica (IMITAB)-Universidad Nacional de Villa María (UNVM). Dicha ciudad es cabecera del departamento General San Martín y se encuentra ubicada en una de las regiones agroindustriales más significativas del país, donde actualmente existe una demanda de desarrollo científico-tecnológico regional debido a la creciente instalación de plantas de biogás. La región se caracteriza por presentar un clima templado pampeano subhúmedo ideal para el desarrollo de la vida vegetal, animal y humana. Las precipitaciones anuales van en el orden de los 780 mm distribuidos en un ciclo de tipo monzónico. Pertenece a la Provincia Biogeográfica Pampeana, Distrito del Espinal donde predomina el bosque xerófilo (Arana *et al.*, 2021).

El estudio y los ensayos se realizaron en un suelo representativo de la planicie fluvioeólica central cordobesa, la Figura 6 identifica la zona de muestreo de suelo, localizado en el Campo experimental de la Universidad Nacional de Villa María Córdoba, Argentina (32°22 '50.2 "S 63°15' 38.9 "O). Rodríguez (2022) expresa que el suelo representativo de la Figura 7, se asocia a las zonas altas del paisaje caracterizado como Manto loésico y que presenta un bajo desarrollo pedogenético (solum 54 cm), de color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2), limoso y clasificado taxonómicamente como un Haplustol típico.

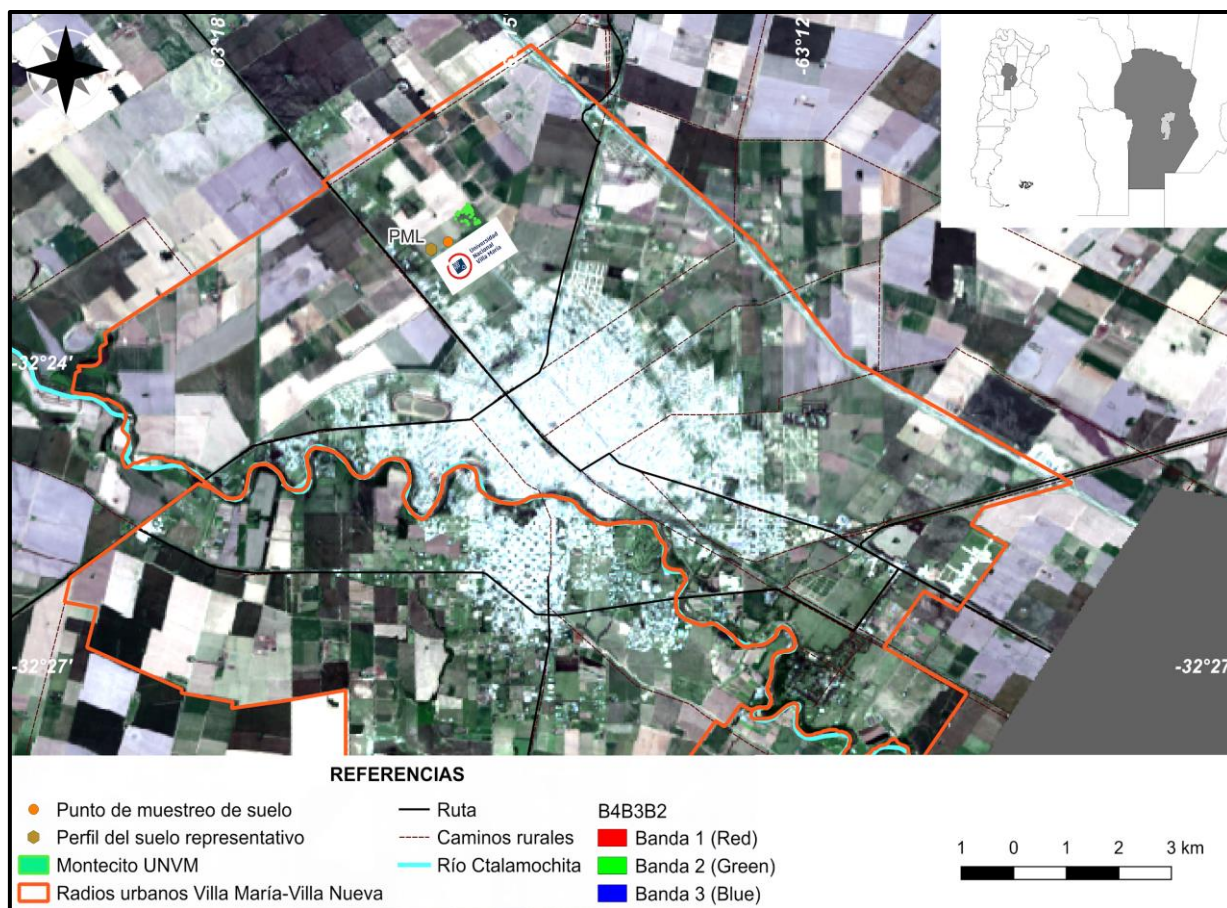


Figura 6. Mapa de identificación de zona de muestreo de suelo. Fuente: QGIS, 2025.

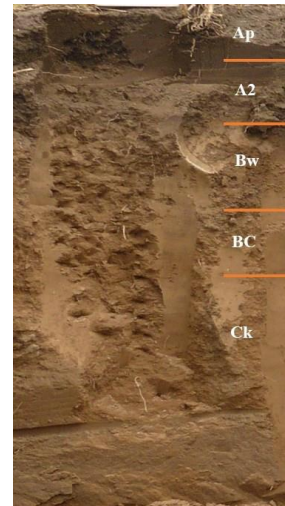
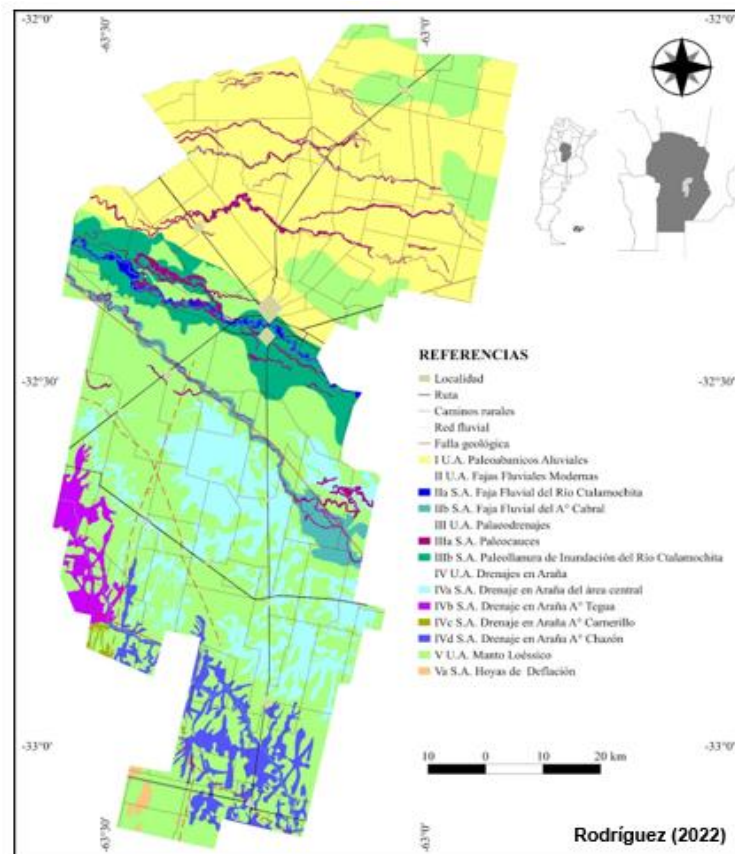


Figura 7. Ubicación del área de estudio y suelo representativo. Fuente: Rodríguez, 2022.

4.2 Origen de los digestatos

Los digestatos con los que se trabajó, provienen de la región Centro y Cuyo de Argentina, es decir, de la región pampeana que se destaca por la producción agrícola-ganadera, por ende, los sustratos son de origen animal. Para este trabajo final de grado se llevó a cabo la evaluación física, química y biológica de las muestras de los digestatos de tres plantas de biogás de la región Centro y Cuyo de Argentina. Una de ellas es Enreco (EN) ubicada en la Estancia el Triunvirato, zona rural de

Guatimozin, provincia de Córdoba, en las coordenadas 33° 22' 05.3" S y 62° 32' 29.1" W, Beisa Yanquetruz (BE) se encuentra en la zona rural de Juan Llerena, provincia de San Luis, en las coordenadas 33° 22' 38.9" S y 65° 34' 06.5" W y 3C biogás (3C) se localiza en la zona rural de Alcira Gigena, provincia de Córdoba, en las coordenadas 32° 47' 09.1" S y 64° 11' 43.6" W, en la Figura 8 se hallan en el mapa la ubicación de tres plantas de biogás de la región Centro y Cuyo de Argentina.

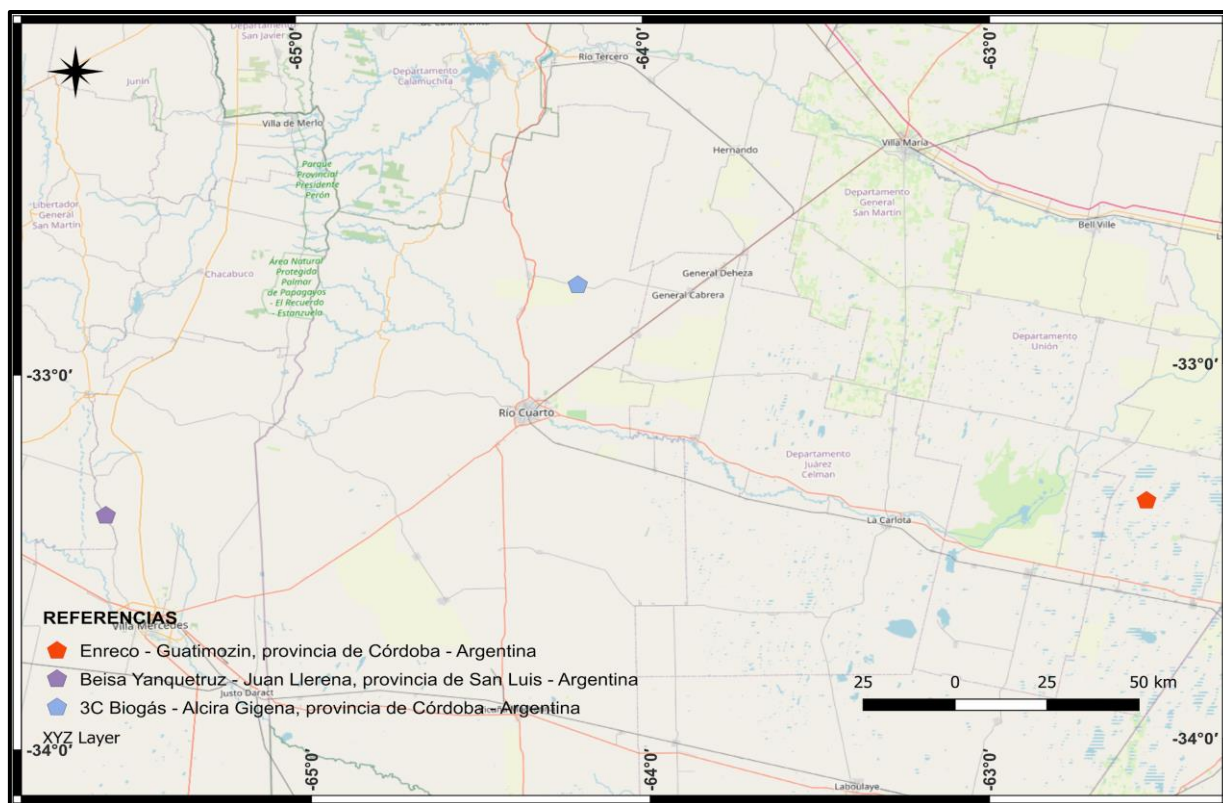


Figura 8. Mapa de identificación de las tres plantas de biogás en estudio. Fuente: Elaboración propia. QGIS, 2025

4.3 Carbonización de la fracción sólida y caracterización de los productos obtenidos

Las muestras de los tres digestatos, se mantuvieron en condiciones óptimas de refrigeración y oscuridad para prevenir posibles cambios. Este procedimiento se llevó a cabo en los establecimientos respectivos donde se generaron los digestatos.

Las fracciones sólidas (FS) utilizadas en este estudio procedían de tres plantas de biogás diferentes, todas las cuales empleaban estiércol de cerdo en el proceso de codigestión. Aun así, cada una utilizó un co-sustrato diferente: La FS1 proviene de un proceso de codigestión anaerobia entre ensilados de cultivos energéticos (maíz y sorgo) y purín de cerdo, la FS2 con ensilados de cultivos de cobertura (vicia y centeno) y purín de cerdo, la FS3 con residuos agroindustriales (efluentes de matadero, productos lácteos y subproductos del procesado del maní).

En adelante, el término "carbonización" se utilizará para referirse al proceso térmico, centrándose en la producción de biocarbón (sólido). Para desarrollar biocarbones se llevó a cabo la carbonización de la FS y su caracterización fisicoquímica de los productos obtenidos a través del proceso térmico denominado pirólisis (Galván *et al.*, 2024). A diferentes temperaturas finales de carbonización se caracterizaron los tres tipos diferentes de biocarbones con una mezcla de distintos tipos de materias primas. Luego se aplicaron en diversas concentraciones y combinaciones a un suelo típico de la región. La caracterización de los mismos se realizó según los parámetros propuestos por Piccoli *et al.* (2020) y US. EPA (2011).

4.3.1 Sólidos Totales

Los ST comprenden los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales. La medición de ST se realizó por triplicado para cada fracción del digerido. Los FS procesados a partir de los digestatos se molieron hasta alcanzar un tamaño de partícula de 2 mm y se secaron en una estufa a 105 °C durante 12 horas.

Las fracciones sólidas se analizaron para determinar el contenido de humedad, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) de acuerdo con los Métodos Oficiales de Análisis de la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC) normas 950.46, 950.46, y 923.153, respectivamente (AOAC International, 2019). El contenido de SV de una muestra da una estimación de la cantidad de MO que contiene. Para calcularlos se utiliza el material sobrante de la muestra luego de la estufa a 105 ± 2 °C, para incinerarla en la mufla a 550 ± 50 °C durante cuatro horas.

4.3.2 Pirólisis

La carbonización se llevó a cabo en una atmósfera con deficiencia de oxígeno (OD) en una estufa tubular (T- 150, INDEF). La temperatura se elevó de 20 °C a 350 °C con una velocidad de calentamiento de 20 C-m⁻¹. La temperatura del horno se mantuvo a 350 °C durante 2 h y después se enfrió a temperatura ambiente, esta técnica se realizó en los laboratorios de la Facultad de La Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Durante el mes de septiembre del año 2022 se realizó la pirólisis de la FS del digestato y en el año 2023 se realizaron los ensayos para obtener los parámetros químicos de cada fracción sólida y del biocarbón los cuales se determinaron por separado y por triplicado.

4.3.3 pH

El pH es uno de los parámetros más importante a determinar, ya que su valor es de utilidad para desarrollar un plan de manejo del digestato. Se refiere a la actividad del ion hidrógeno (H⁺). El pH se midió en una suspensión 1:5 digestato: agua ultrapura con un pH-metro electrónico HANNA HI 8424.

4.3.4 Carbono Orgánico

El contenido de carbono orgánico se determinó mediante el procedimiento de calcinación. El método de calcinación para determinar el carbono orgánico (frecuentemente denominado "pérdida por ignición"), es una técnica utilizada para medir el contenido de carbono orgánico total (COT) en suelos,

sedimentos o materiales geológicos. Consiste en calentar la muestra a altas temperaturas para oxidar y eliminar la materia orgánica en forma de dióxido de carbono (CO₂). (Nelson y Sommers, 1996).

4.3.5 Nitrógeno total

El nitrógeno total se determinó por medio del método Kjeldahl APHA 4500 B, (Asociación Americana de Salud Pública, 2017). Este método se utiliza para la determinación del contenido de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas. El N total Kjeldahl total (TKN) es la suma de nitrógeno orgánico, NH₃ y NH₄⁺. Para calcular el nitrógeno total se determinan las concentraciones de nitrato y nitrito y se añaden al TKN.

4.3.6 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica hace referencia al contenido de sales en solución, es decir su capacidad para transportar la corriente eléctrica. Es un parámetro importante, ya que un valor alto del mismo limita la capacidad del digerido como fertilizante y además durante la DA puede generar toxicidad en las bacterias. La conductividad eléctrica se determinó en agua ultrapura utilizando una suspensión 1:5 de fracción sólida: agua con un APERA EC910.

4.3.7 Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal total (TAN) y el nitrógeno amoniacal libre (FAN) se midieron utilizando un espectrofotómetro HANNA HI 83099 adaptación Métodos de Análisis de la Agencia de Protección Ambiental USEPA método Nessler para TAN y FAN.

4.3.8 Sodio, calcio, potasio y magnesio

Los niveles de sodio, calcio, potasio y magnesio se midieron utilizando la metodología SM 3125:2017 (EPA, 2011). Este método se aplica para determinar trazas de metales y metaloides en aguas residuales, suelos, sedimentos, lodos y muestras biológicas digeridas. Estas mediciones se realizaron en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de Buenos Aires.

4.3.9 Grupos funcionales y características morfológicas de los biocarbones

Los grupos funcionales de los biocarbones se caracterizaron mediante espectroscopia de RMN. Se utilizó un espectrómetro multinuclear de 300 MHz (Bruker Avance), donde la RMN de 1H se midió a 25 °C en CDCl₃.

Las características morfológicas y estructurales del biocarbón se analizaron mediante estereomicroscopía y microscopía electrónica de barrido (SEM). Para el análisis SEM, las muestras se depositaron sobre soportes de aluminio cubiertos con cinta de carbono y se recubrieron con oro utilizando un recubridor sputter al vacío.

4.4 Diseño experimental para la aplicación directa de digestato/biocarbón en el suelo

El diseño experimental para la aplicación directa de digestato/biocarbón en el suelo se adaptó a la metodología utilizada por (Musciolo *et al.*, 2017; Cardelli *et al.*, 2018; Manasa *et al.*, 2020). Las

muestras del suelo caracterizado por Rodríguez (2022) se extrajeron de las zonas altas del paisaje en la Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina (32°22 '50.2 "S 63°15' 38.9 "O) a una profundidad de 15 cm, del horizonte A, se secaron al aire durante 24 horas a temperatura ambiente y se tamizaron para eliminar partículas gruesas y malezas (tamiz de 2 mm). Finalmente, a partir de estas muestras se colocaron 350 g de suelo en macetas de 21 cc como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Muestra de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Como muestra control se preparó suelo sin enmendar y todos los experimentos se realizaron por triplicado. Los ensayos se realizaron durante 100 días en un invernadero, las macetas fueron cubiertas con papel parafilm para reducir la evapotranspiración, con un rango de temperatura variable de 16-25 °C y humedad al 60 %.

La Figura 10 muestra los diferentes materiales utilizados para las mezclas (digestatos, biocarbones, suelo control y combinación de digestatos/biocarbones) y las diferentes concentraciones de las mezclas.









MATERIALES	MEZCLAS DE ENSAYO
<p>Suelo (S)</p>  <p>Digestato FS (D)</p>  <p>Biocarbón (B)</p> 	<p>Controlar</p>  <p>Suelo + fracción sólida del digestato = SD</p>  <p>1% p/p digestato/suelo 5% p/p digestato/suelo 10% p/p digestato/suelo</p> <p>Suelo + biocarbón = SB</p>  <p>1% p/p biocarbón/suelo 5% p/p biocarbón/suelo</p> <p>Suelo + Fracción sólida del digestato + Biocarbón = SDB</p>  <p>1% p/p digestato/ 1% p/p biocarbón/suelo</p>  <p>5% p/p digestato/ 1% p/p biocarbón/suelo</p>

Figura 10. Descripción de los materiales utilizados para las mezclas (digestatos, biocarbón y combinación de digestato y biocarbón) y las diferentes proporciones de las mezclas. Fuente: Muscuolo *et al.*, 2017; Cardelli *et al.*, 2018; Manasa *et al.*, 2020.

El diseño experimental de los ensayos realizados consistió en evaluar los efectos de las mezclas digestato/biocarbones, en distintas concentraciones, sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo, cuando combinamos estas mezclas sobre muestras de suelo control utilizando macetas como unidades experimentales. El ensayo experimental consistió en distintas mezclas de ensayo y todas las comparaciones son para suelo control versus suelo a controlar posterior a los tratamientos.

- **Tratamiento 1 (Control):** Maceta con suelo control (S) sin ningún tipo de enmienda, utilizada como testigo para la comparación de los restantes tratamientos.
- **Tratamiento 2 (Digestato):** Suelo control en combinación con digestato (SD) en diferentes concentraciones (1%, 5%, 10%), con el propósito de evaluar su impacto individual sobre el comportamiento del suelo.
- **Tratamiento 3 (Biocarbón):** Suelo control con la adición de biocarbón (SB) en distintas concentraciones (1%, 5%), con el objetivo de analizar el comportamiento del suelo posterior a esta aplicación de biocarbón.
- **Tratamiento 4 (Digestato + Biocarbón):** Suelo control mixtura simultáneamente con digestato y biocarbón (SDB), en distintas concentraciones (1%, 5%).

4.5 Análisis del suelo después del tratamiento

Tras 100 días de tratamiento, las macetas se separaron en dos porciones. Una porción se refrigeró a 4°C para los siguientes análisis correspondientes, y la otra fracción se dejó en las macetas para su posterior evaluación a lo largo del tiempo.

4.5.1 pH

El pH es uno de los parámetros más importante a determinar, se refiere a la actividad del ion hidrógeno (H⁺). El pH del suelo se midió en agua destilada utilizando una suspensión 1:5 (muestra/agua) con un medidor electrónico de pH HANNA HI842 (Cardelli *et al.*, 2018).

4.5.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica hace referencia al contenido de sales en solución, es decir su capacidad para transportar la corriente eléctrica. Es un parámetro importante, ya que un valor alto del mismo limita la capacidad del digerido como fertilizante y además durante la DA puede generar toxicidad en las bacterias. La conductividad eléctrica se determinó en agua ultrapura utilizando una suspensión 1:5 de fracción sólida: agua con un APERA EC910.

4.5.3 Carbono Orgánico Total

El contenido de carbono orgánico total se determinó mediante el procedimiento de calcinación Black. El método de calcinación para determinar el carbono orgánico (frecuentemente denominado "pérdida por ignición", es una técnica utilizada para medir el contenido de carbono orgánico total (COT) en suelos, sedimentos o materiales geológicos. Consiste en calentar la muestra a altas temperaturas para oxidar y eliminar la materia orgánica en forma de dióxido de carbono (CO₂) (Nelson y Sommers, 1996). Se seca a 105°C por al menos 12 horas para eliminar la humedad, se pesa la muestra seca para obtener la masa inicial. La muestra se calienta en un horno mufla a una temperatura entre 400°C y 550°C durante 2 a 6 horas. A esta temperatura, la materia orgánica se oxida y se libera como CO₂. La muestra calcinada se deja enfriar en un desecador y se vuelve a pesar, finalmente el cálculo del Carbono Orgánico Total (COT) se determina con la diferencia de peso antes y después de la calcinación corresponde a la pérdida de materia orgánica.

4.5.4 Grado de Humificación del suelo

El grado de humificación (GH) se refiere a la proporción de (MO) que ha sido transformada en humus. Es un indicador de la estabilidad y calidad de la (MO) en el suelo, y su medición permite evaluar la eficiencia del proceso de humificación, que es esencial para la fertilidad del suelo. El (GH) indica cuánto de la (MO) inicial se ha convertido en humus, que es la fracción más estable que mejora la calidad del suelo. La (MO) se descompone por la acción de microorganismos del suelo. Durante este proceso, se producen compuestos orgánicos complejos, llamados sustancias húmicas, que constituyen el humus. Es importante la medición del (GH) porque el humus proporciona nutrientes a las plantas, mejora la estructura del suelo, aumenta la capacidad de retención de agua y favorece la actividad biológica del suelo. Un alto (GH) indica que la MO es más estable, menos susceptible a la

degradación rápida (degradación lenta) y por tanto más prolongada es su persistencia en el suelo. La humificación puede ayudar a secuestrar carbono y reducir la contaminación del suelo, ya que los compuestos húmicos son recalcitrantes, resistentes a la degradación. En resumen, el (GH) es un parámetro importante para evaluar la calidad y estabilidad de la MO en el suelo, y su medición ayuda a comprender cómo la MO se transforma en humus y cómo este proceso beneficia al suelo (Acosta *et al.*, 2004)

El grado de humificación se evaluó utilizando la metodología propuesta por Kumuda *et al.* (1968). Para ello, se realizó una extracción alcalina utilizando NaOH 0,1 M con el fin de solubilizar las sustancias húmicas presentes en la muestra. Posteriormente, el extracto fue acidificado con HCl hasta pH 1 para separar los ácidos húmicos (AH), que precipitan, de los ácidos fúlvicos (AF), que permanecen en solución. Una vez separados, se determinó el contenido de (CO) de cada fracción, y se calculó el (GH).

4.5.5 Respiración Microbiana

La respiración microbiana del suelo es el proceso mediante el cual los microorganismos del suelo (bacterias, hongos, actinomicetos, etc.) descomponen la materia orgánica y liberan (CO_2) como producto de su actividad metabólica. Los microorganismos consumen materia orgánica (como restos de plantas, raíces, exudados, etc.) como fuente de energía y carbono. Durante la descomposición, los microbios respiran, es decir, oxidan el carbono orgánico y producen CO_2 , agua y otros compuestos. La tasa de respiración microbiana es un indicador clave de la actividad biológica del suelo y de su salud. Sirve para evaluar la fertilidad del suelo, medir la descomposición de residuos orgánicos, estimar el impacto de prácticas agrícolas o enmiendas (como compost, digestato o biochar, analizar ciclos de carbono y emisiones de gases efecto invernadero. La respiración microbiana del suelo es una medida de la actividad metabólica de los microorganismos, que refleja cuánta materia orgánica se está transformando en CO_2 .

La respiración microbiana del suelo se determinó según lo descrito previamente por Nielsen *et al.* (2020). Se suele colocar una muestra de suelo en condiciones controladas (temperatura y humedad), y se mide la cantidad de CO_2 liberado en un tiempo determinado.

Este análisis del suelo después del tratamiento es esencial para evaluar el impacto de los tratamientos aplicados en el suelo y entender cómo estos tratamientos afectan a sus propiedades químicas y biológicas. Para el análisis de datos se utilizó el software ORIGIN® PRO18.

Es importante hacer la siguiente aclaración con respecto a la existencia de los ácidos húmicos y fúlvicos en los modelos clásicos de humificación y un enfoque tradicional del estudio de la materia orgánica del suelo. Como se mencionó anteriormente para evaluar el grado de humificación se utilizó la metodología propuesta por Kumuda *et al.* (1968) el cual es un procedimiento clásico que sirve para caracterizar el estado de humificación de las sustancias húmicas a partir de propiedades ópticas, especialmente el color y la absorbancia, pero como se indicó en las revisiones de este trabajo se consultó la bibliografía actual sobre la nueva estructura de la materia orgánica del suelo que cuestiona la existencia de los ácidos fúlvicos y húmicos.

Las bibliografías actuales de Paul (2016), Lehmann & Kleber (2015) y Schmidt *et al.* (2011) cuestionan la existencia de los ácidos húmicos y fúlvicos porque la ciencia del suelo moderna ha demostrado que esas fracciones no representan moléculas naturales presentes en el suelo tal como se las describió históricamente, sino artefactos de laboratorio generados por los métodos de extracción alcalina. Los ácidos húmicos y fúlvicos no existen como moléculas definidas en el suelo natural.

Investigaciones recientes muestran que la materia orgánica del suelo no está formada por grandes polímeros húmicos estables, sino por compuestos pequeños, derivados de plantas y microorganismo, asociados físicamente a minerales, cuya persistencia depende de mecanismos de protección física y química dentro de agregados del suelo y no de una “humificación” polimérica clásica. Es decir, la materia orgánica es un continuo, no un conjunto de fracciones químicamente separadas. Además, estos autores sostienen que el método clásico utilizado durante décadas altera la estructura original de la materia orgánica y produce una formación de sustancias oscuras que NO existen así en el suelo. Por eso, lo que llamamos “ácidos húmicos y fúlvicos” solo existen después de la extracción, no en el ambiente natural.

Además, sostienen que, con los nuevos métodos de análisis de grado de humificación, como son las imágenes por espectrofotometría de rayos X por barrido, se logró analizar las estructuras orgánicas en su condición natural, es decir, conocer la estructura y abundancia de sustancias orgánicas sin ser alteradas químicamente. Como resultado, surgieron nuevas conclusiones sobre la estructura de la materia orgánica del suelo. El principal aporte de estos avances es que las sustancias húmicas NO existen en los suelos, sino que la materia orgánica del suelo está constituida por restos vegetales y microbianos en diferente grado de descomposición con estructura moleculares simples en interacción con la fase mineral del suelo y formando agregados. El principal cambio en la visión tradicional de la materia orgánica del suelo es el siguiente: en el suelo prácticamente no existen estructuras moleculares complejas y de alto peso molecular (ácidos fúlvicos, húmicos y huminas) sino sustancias orgánicas simples y bajo peso molecular.

Estos nuevos conocimientos implican una revisión en los modelos tradicionales que simulan el balance de C ya que no hay proceso de resíntesis para la formación de humus.

Lehmann & Kleber. (2015) proponen abandonar el “modelo húmico-polimérico”, Paul. (2016) sostiene que la estabilización se explica por interacciones físicas y químicas, no por la humificación clásica y Schmidt *et al.* (2011) enfatizan que la persistencia depende de protección física y no de moléculas húmicas recalcitrantes. Esta es la crítica central hacia los modelos clásicos de humificación.

La teoría antigua afirmaba que los ácidos húmicos se formaban por la formación de macromoléculas muy estables y resistentes. Los estudios modernos muestran que esas macromoléculas no existen en suelos naturales, la humificación como proceso polimérico estable ya no se considera válida.

Esto no significa que haya que dejar de usar esas fracciones, ya que los autores no niegan su utilidad práctica en análisis de calidad de materia orgánica como se evaluó en este trabajo. Lo que cuestionan es que se las considere entidades naturales del suelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Biocarbones obtenidos a partir de la fracción sólida y caracterización de los productos obtenidos

Los parámetros físicos y químicos de las fracciones sólidas de digestatos y biocarbones obtenidos a 350 °C se presentan en la Tabla 3. En la Figura 11 se visualizan muestras de la fracción sólida del digestato y muestras de biocarbones.

Las FS de los digestatos, mostraron un rango de pH entre 7,2 y 8,6, característico de los digestatos con un pH alcalino debido a la presencia de amonio y otros compuestos básicos (Van Poucke *et al.*, 2020). Por el contrario, los B350 mostraron un pH aún más elevado, especialmente en el caso de B350-2. Este aumento del pH fue acompañado de una disminución de la conductividad, que podría atribuirse a la precipitación de sales solubles y por la pérdida de grupos funcionales ácidos durante el proceso de carbonización (Xiao *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2013). Estos resultados sugieren la posible presencia de un mayor contenido de sales alcalinas y minerales solubles en los biocarbones. Esto podría estar relacionado con las mayores concentraciones de óxidos e hidróxidos metálicos. Este mayor contenido en sales y minerales podría haber contribuido al elevado pH observado en los biocarbones resultantes. Este fenómeno podría tener implicaciones significativas para su interacción con el medio ambiente y su aplicabilidad en contextos agrícolas y de remediación. Estas propiedades sugirieron que los biocarbones podrían ser particularmente útiles como enmiendas en suelos ácidos que requieren neutralización (Huang *et al.*, 2023).

La reducción de los SV tras el proceso de carbonización fue del 12,6% para el FS-1 y del 11% para el FS-2 (ambas fracciones tenían materias primas similares). Sin embargo, la fracción FS-3, derivada de la codigestión de diferentes residuos agroindustriales, mostró la mayor pérdida de SV con un 20%, ya que esta fracción contenía menos compuestos recalcitrantes (como lignina o compuestos aromáticos complejos), lo que se tradujo en una mayor pérdida de SV. Los estudios han demostrado que la lignina y otros compuestos recalcitrantes eran más difíciles de descomponer térmicamente y tendían a formar estructuras más estables en el biocarbón, reduciendo la cantidad de material volatilizado (Datta *et al.*, 2017; Antonopoulou *et al.*, 2019).

El contenido de carbono en los tres biocarbones alcanzó aproximadamente el 51%, lo que representa un aumento del 20% del material de partida debido a la carbonización. Este proceso redujo la masa original y enriqueció la concentración de carbono en el biocarbón resultante (Rathnayake *et al.*, 2023). Además, este enriquecimiento se asoció a la pérdida de grupos hidroxilo por deshidratación (Pituello *et al.*, 2015; Calamai *et al.*, 2019).

Los valores de CT determinados en los tres biocarbones estaban dentro de los límites establecidos para uso agronómico según el Certificado Europeo de Biocarbón (Schmidt *et al.*, 2016).

Se observó una disminución de los niveles de Nitrógeno Total de aproximadamente un 10-15% en el B350 en comparación con el FS, debido principalmente a la volatilización del nitrógeno durante el proceso térmico (Tian *et al.*, 2018). Calamai *et al.* (2019) encontraron valores de NT similares a los de

B350 -1 y B350 -2 en biocarbones obtenidos a partir de digestatos de ensilado de maíz. Sin embargo, los biocarbones derivados de residuos de matadero mostraron valores de NT más elevados, como se observó en B350-3, esta discrepancia se atribuye al mayor contenido de compuestos nitrogenados en la materia prima de alimentación (Casini *et al.*, 2021; Gusiatin *et al.*, 2016). A pesar de la reducción en los valores de NT, los biocarbones generalmente carecían de suficiente nitrógeno para servir como fuente primaria en los fertilizantes, requiriendo suplementos adicionales para mejorar el crecimiento microbiano y vegetal (Zhao *et al.*, 2022). Además, se observó una ligera disminución de los compuestos fenólicos tras la carbonización, lo que indica una degradación parcial de estos compuestos durante el proceso térmico.

B350 -3 mostró un aumento significativo en el contenido de fósforo en comparación con las fracciones FS y otras fracciones B350. Esto sugiere que la fracción FS-3 contenía una mayor proporción de compuestos de fósforo que se concentraron durante la carbonización, o que las formas de fósforo en esta fracción se estabilizaron más eficazmente durante el proceso. Otros autores informaron de resultados similares con materias primas comparables (Liao *et al.*, 2020; Luo *et al.*, 2023). Durante la carbonización, el fitato se convierte en fósforo inorgánico, que tiende a concentrarse en el biocarbón (Uchimiya, M; Hiradate, S, 2014). Además, la cantidad de P depende del tipo de materia prima, con la siguiente distribución: biosólidos > residuos animales > residuos orgánicos > residuos de cultivos (Novotný *et al.*, 2023).

No se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de Na y Ca entre las fracciones FS y B350. Sin embargo, el Mg y el K mostraron una disminución significativa en su concentración después de la carbonización, indicando que estos elementos son más susceptibles a la volatilización o a cambios en su forma química durante el proceso. Estos resultados demuestran cómo la carbonización puede influir diferencialmente en la retención de varios elementos en las fracciones de biocarbón (Vijayaraghavan, 2021; Wei *et al.*, 2024).

Los elementos trazan también estaban presentes en el Biochar, aunque constituían sólo una pequeña fracción (Zhao *et al.*, 2013). Los resultados no mostraron diferencias significativas en los niveles de Zn, Ni, Fe, Al y Cu entre las fracciones FS y B350. Del mismo modo, no se observaron diferencias significativas en los niveles de As, B, Mo, Cd, Pb y Cr entre estas fracciones. Las concentraciones de metales en el B350 se mantuvieron dentro de los límites establecidos para uso agronómico según el Certificado Europeo de Biocarbón (Schmidt *et al.*, 2016).



Figura 11. Digestatos y Biocarbones Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Parámetros físicos y químicos del suelo, de la fracción sólida de los digestatos y del biocarbón obtenido a 350°C. Fuente: Galván, 2023.

Parámetro	Suelo (control)	SF-1	SF-2	SF-3	B350 -1	B350 -2	B350 -3	Prueba estadística
pH	6.9±0.2	7.78±0.05	8.56±0.02	7.22±0.01	10.89±0.03	11.21±0.08	10.83±0.01	T*
Conductividad uS/cm	1129±75	1673±4	1949±7	2190±5	815±1	1317±3	1330±3	T*
Sólidos totales % p/p	76.9±0.3	22.3±0.8	25.06±0.03	20.6±0.7	98.5±0.1	98.7±0.2	99.2±0.2	T*
Sólidos volátiles (ST)%	7.8±0.2	89.4±0.6	87.6±0.6	88.5±0.8	76.8±0.9	76.5±0.5	68.4±0.7	T*
Carbono total % p/p	3.94±0.1	44.7±0.7	44.5±0.9	39.8±0.6	51.9±0.3	50.9±0.4	51.4±0.6	T*
Nitrógeno total % p/p	0.33±0.01	1.61±0.03	1.29±0.01	2.04±0.01	1.36±0.02	1.05±0.05	1.87±0.04	M*
C. Fenólicos mg GAE	13.22	14.67	13.71	13.95	13.35	13.10	13.21	T
Fósforo P mg/kg	14±1	110±11	109±11	134±13	40±4	47±5	142±14	M*
Potasio K mg/kg	34±3	397±40	282±28	259±26	140±14	181±18	153±15	T
Calcio Ca mg/kg	21±2	45±5	33±3	63±6	43±4	33±3	73±7	T*
Magnesio Mg mg/kg	26±3	49±5	43±4	37±4	24±4	19±2	30±3	M
Sodio Na mg/kg	7±0.7	93±9	14±1	93±9	32±3	14±1	48±5	T
Aluminio Al mg/kg	82±8	4.8±0.5	6.9±0.7	9±0.9	3±0.3	7.1±0.7	8.3±0.8	T
Zinc Zn mg/kg	0.35±0.03	5.6±0.6	0.93±0.01	1.9±0.2	2.7±0.3	0.88±0.09	2±0.2	M
Níquel Ni mg/kg	100±100	75±7	110±10	380±40	79±8	82±8	270±30	M
Hierro Fe mg/kg	60±6	6.4±0.6	5.6±0.6	34±3	5.9±0.6	6.5±0.7	24±2	T

Arsénico As µg/kg	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	n/a
Boro Bo µg/kg	750±80	1200±100	620±60	570±70	930±90	720±70	620±60	T
Cobre Cu µg/kg	57±6	3700±400	260	350±40	1500±200	110±10	290±30	M
Molibdeno Mo µg/kg	16±2	70±7	37±4	44±4	33±3	21±2	35±3	T
Cadmio Cd µg/kg	3.2±0.3	2.9±0.3	4.8±0.5	3±0.3	4.2±0.4	1.9±0.2	1.7±0.2	T
Plomo Pb µg/kg	57±6	64±6	10±1	20±2	62±6	5.4±0.5	37±0.4	M
Cromo Cr µg/kg	95±9	120±10	150±20	83±8	52±5	60±6	74±7	M
<p>(*) indica diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las fracciones FS y B350 para el parámetro en cuestión. (T) para la prueba t de Student. (M) para la prueba U de Mann-Whitney. (n/a) no aplicable.</p>								

En las siguientes Figuras 12, 13, 14, 15 y 16 se muestran las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C.

Los biocarbones tienen una estructura porosa bien desarrollada, con un alto grado de aromatización y una superficie específica considerable. Las características estructurales del biocarbón están estrechamente relacionadas con la naturaleza de las materias primas y el proceso de carbonización. Como esta biomasa se convierte en una estructura porosa, puede incorporarse al suelo para mejorar su capacidad y superficie, mejorando así sus características espaciales. Cuando el biocarbón se mezcla con el suelo, puede cambiar las propiedades físicas del suelo (cambios en el área superficial de las partículas, distribución del tamaño de los poros, distribución del tamaño de las partículas, densidad, espesor, estructura de la textura, porosidad y resistencia).

B350 -1 presenta una superficie con poros bien desarrollados, fisuras y una textura rugosa, lo que indica una elevada superficie y una red porosa bien conectada.

Estas características estructurales son favorables para la retención de agua y nutrientes. La textura rugosa y los poros abiertos facilitan la colonización microbiana, potenciando la actividad biológica del suelo (Chintala *et al.*, 2014). Esta estructura porosa es consistente con otros estudios que muestran que los biocarbones derivados de cultivos energéticos tienen una mayor capacidad de retención de agua debido a sus estructuras abiertas y porosas (Chintala *et al.*, 2014).

B350 -2 muestra una estructura más heterogénea con poros irregulares y algunas zonas colapsadas. La superficie es menos uniforme que la de B350 -1, con una mezcla de zonas compactas y áreas porosas. Esta morfología permite la adsorción de nutrientes y agua, mejorando la capacidad de intercambio catiónico y la actividad microbiana del suelo (Marousek *et al.*, 2023; Husain *et al.*, 2022). La presencia de cavidades y poros irregulares sugiere una buena capacidad de adsorción, aunque no tan alta como B350 -1 debido a su estructura menos uniforme.

B350 -3 es notablemente más denso y muestra menos poros visibles en comparación con B350 -1 y B350 -2. Su superficie es relativamente lisa con pocas fracturas, lo que indica una mayor proporción de estructuras aromáticas.

Esta densidad y estabilidad estructural hacen que el B350 -3 sea especialmente eficaz para la adsorción de contaminantes, ya que sus estructuras aromáticas proporcionan fuertes sitios de adsorción para compuestos orgánicos complejos y metales pesados. Los biocarbones con estas características son reconocidos en la literatura por su eficacia en la remediación de suelos y el tratamiento de aguas residuales (Cheng *et al.*, 2022; Fernández *et al.*, 2021).

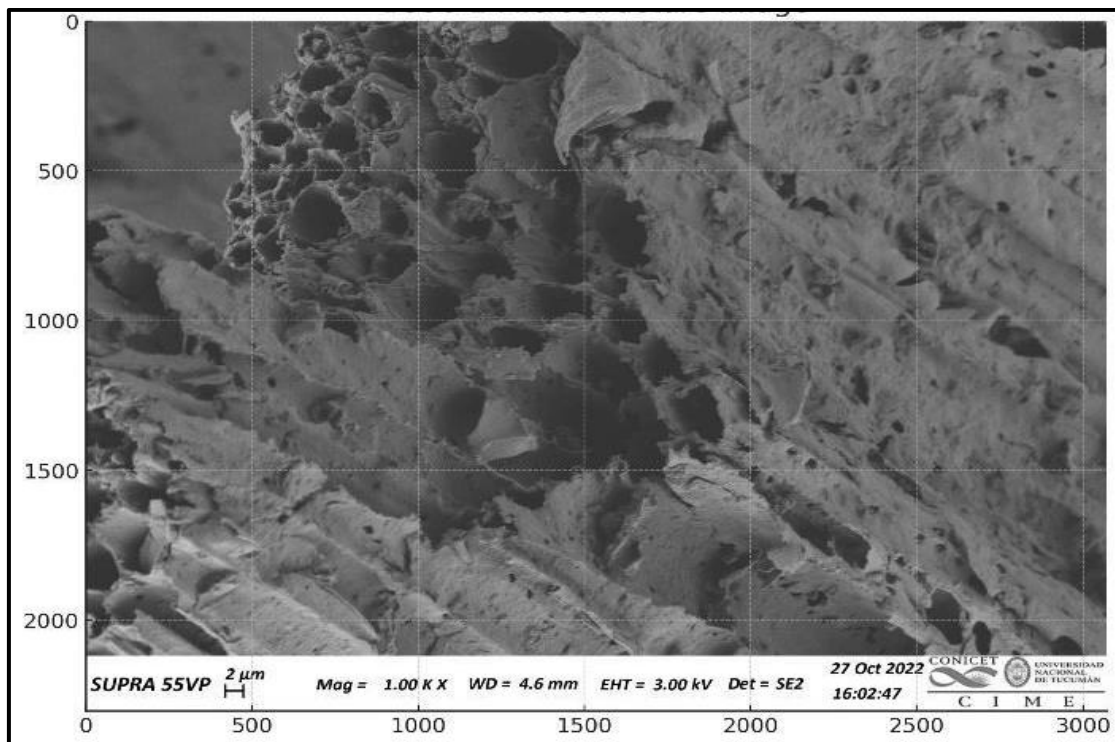


Figura 12. B350-1: Microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C. Fuente: Galván *et al.* 2024.

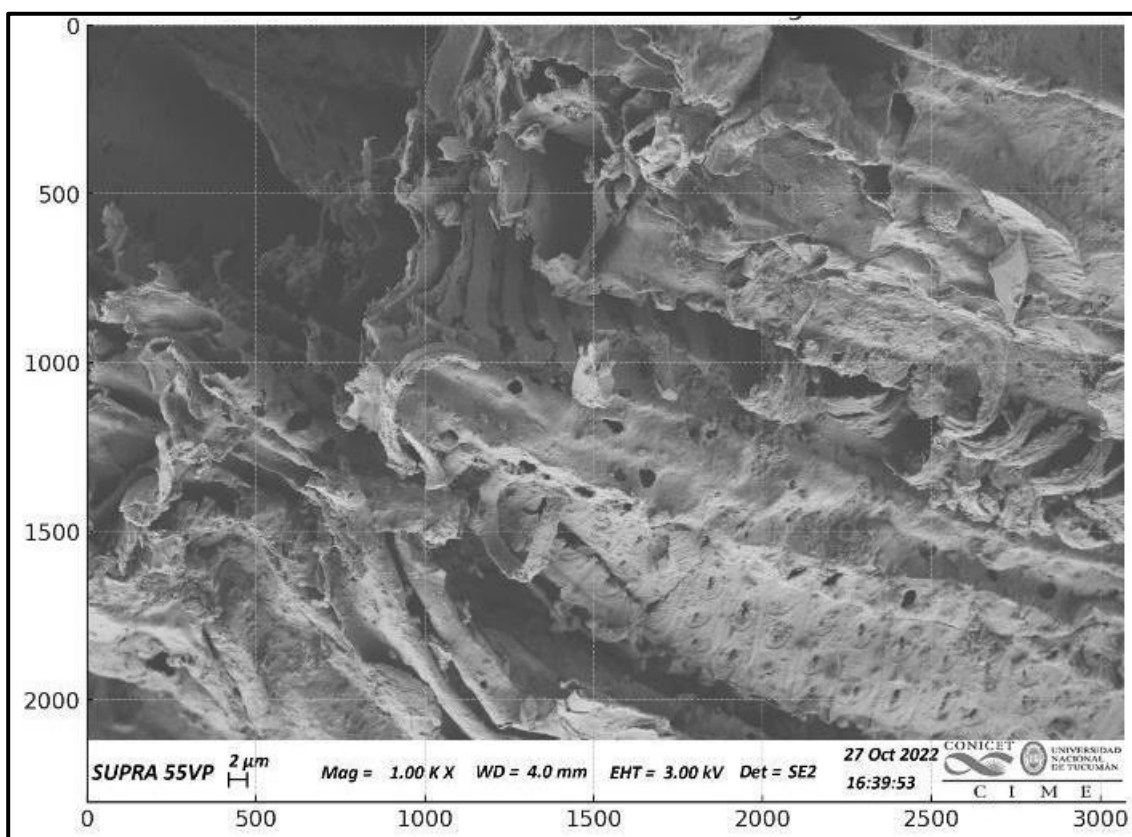


Figura 13. B350 -2: Microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C.

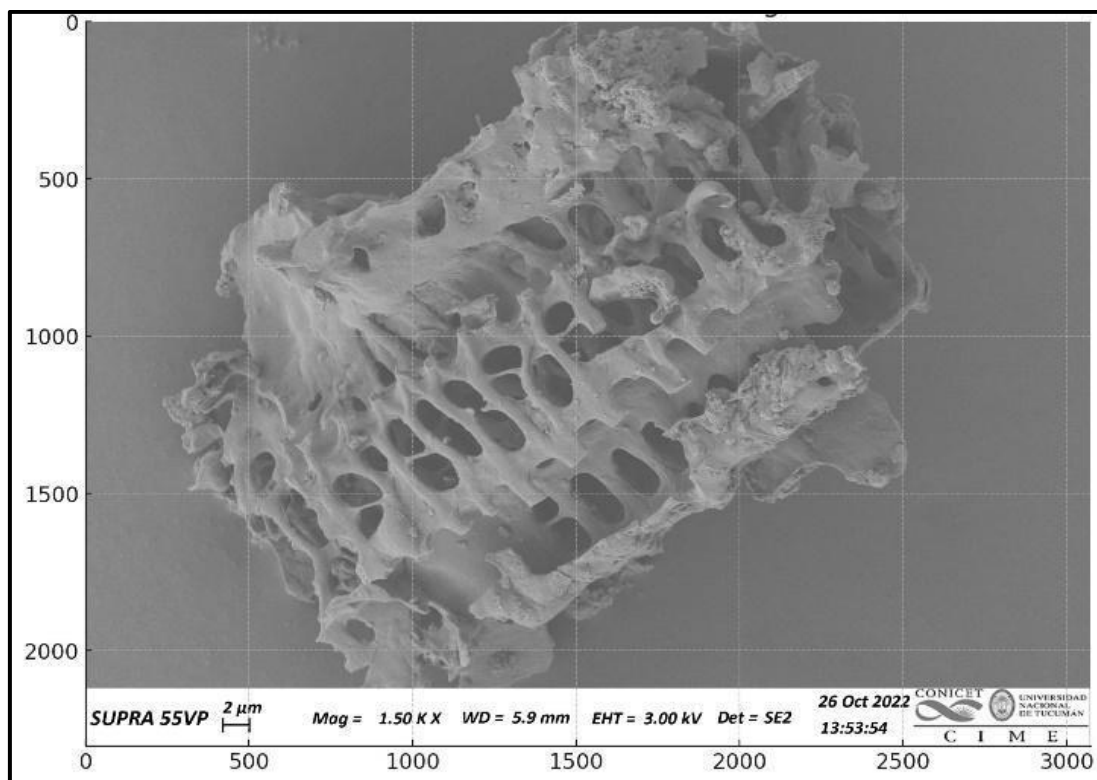


Figura 14. B350 -3: Microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C.

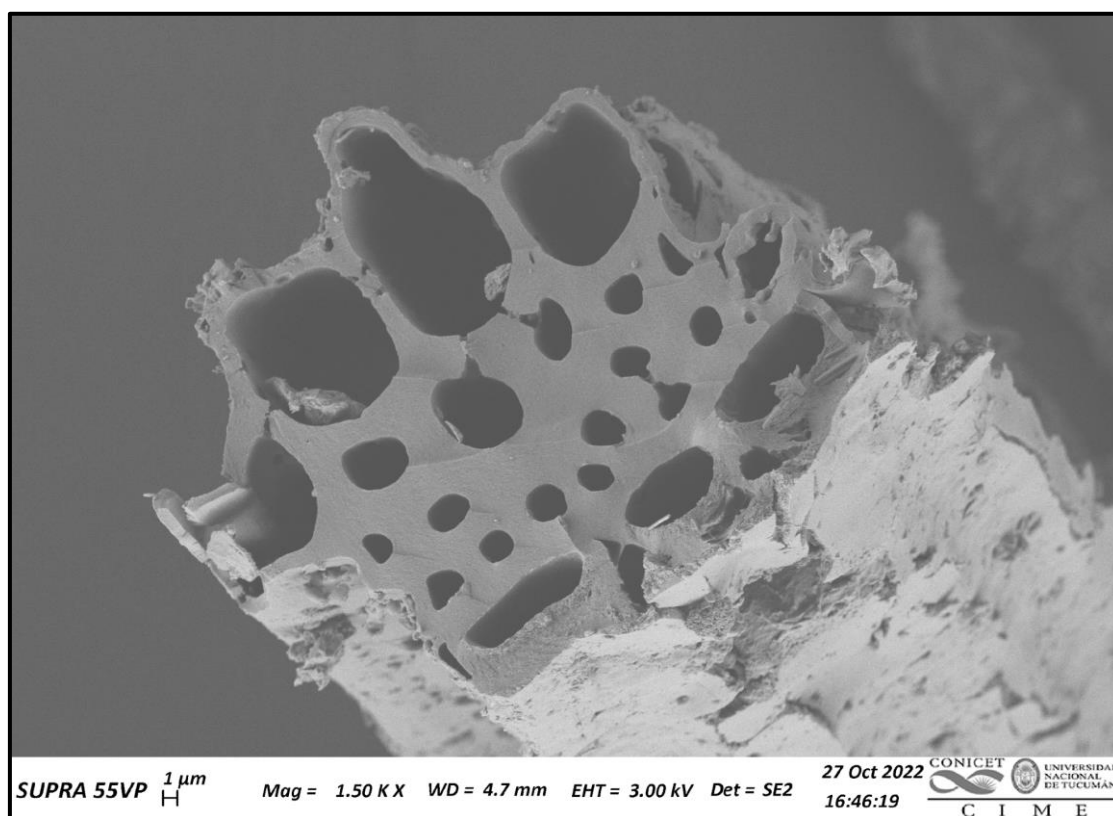


Figura 15. Microestructuras de Biochar 350°C 2 μm, 1 μm.

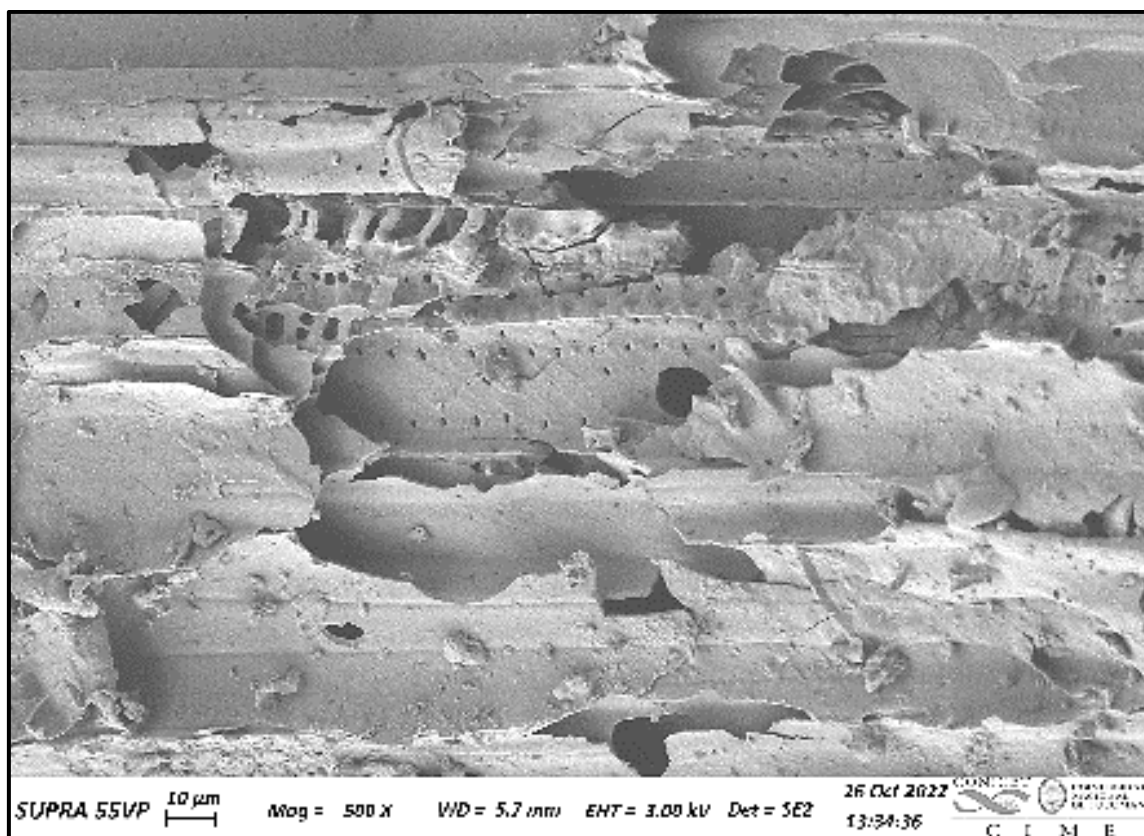


Figura 16. Microestructuras de Biochar 350°C 2 μ m, 1 μ m.

En la Tabla 4 se muestran las estructuras de las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C.

Tabla 4. diámetro de las muestras de Biochar (μ m).

Muestra	Diámetro medio (μ m)
B350-1	2.74
B350-2	1.43
B350-3	0.57

5.2. Comportamiento del suelo post tratamiento

La figura 17 muestra el pH (17a), la conductividad eléctrica (CE) (17b), el carbono orgánico total (COT) (17c), el grado de humificación (17d) y la respiración microbiana (RM) (17e), de los diferentes tratamientos tras 100 días de incubación.

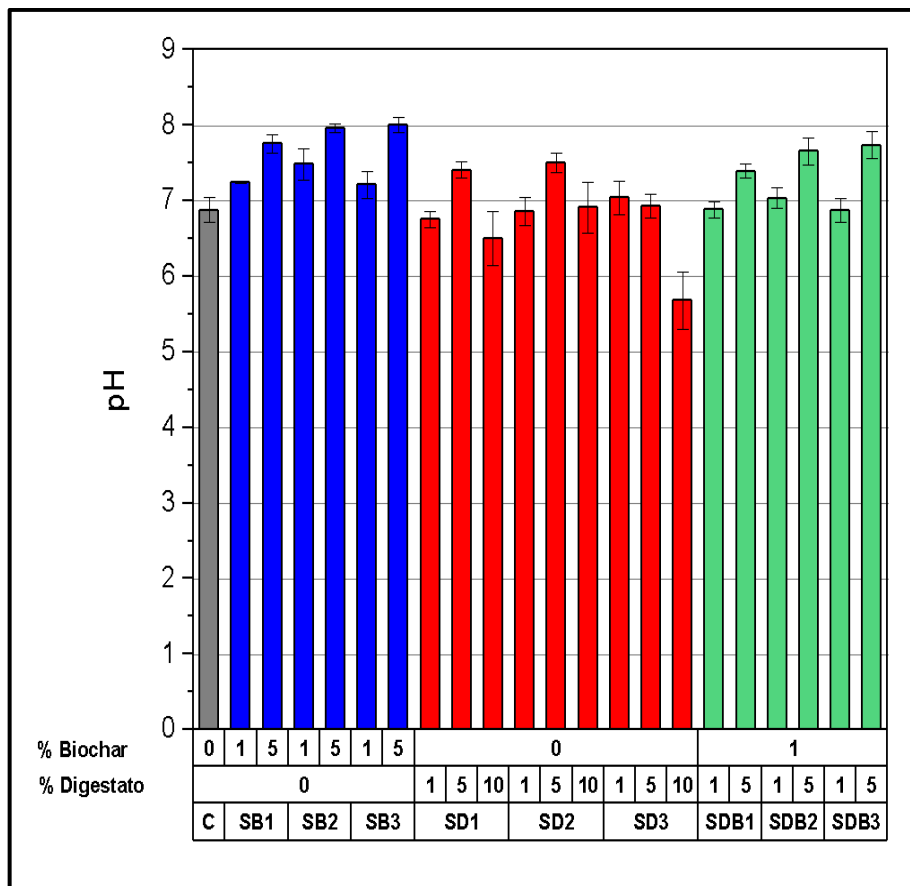


Figura 17a: pH del suelo. Fuente: ORIGIN® PRO18.

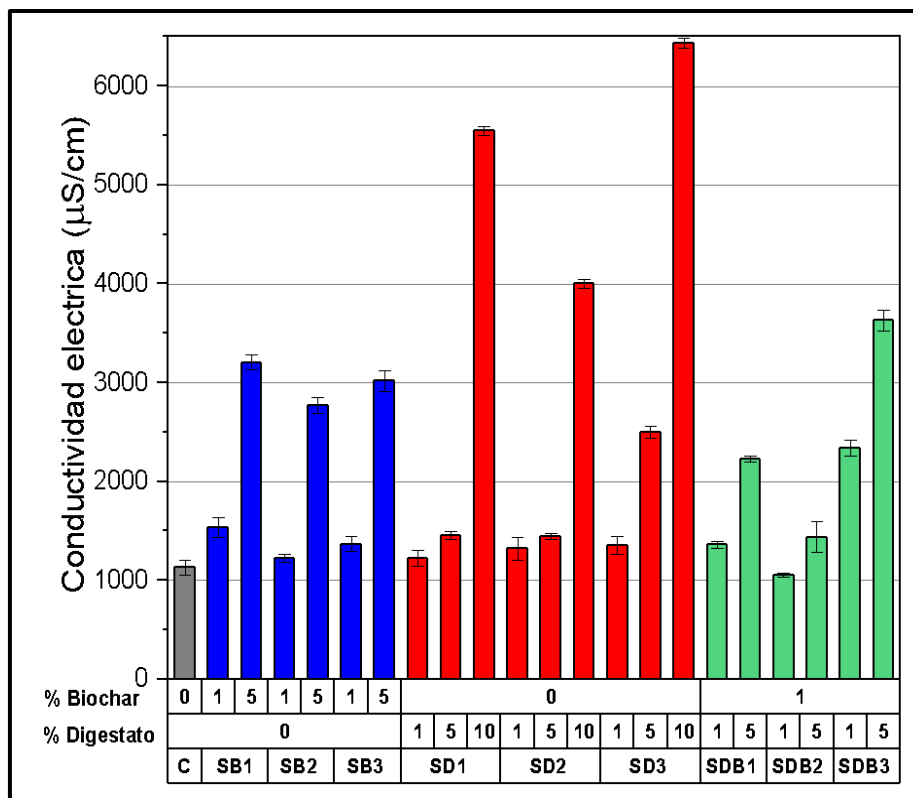


Figura 17b: Conductividad Eléctrica del suelo. Fuente: ORIGIN® PRO18.

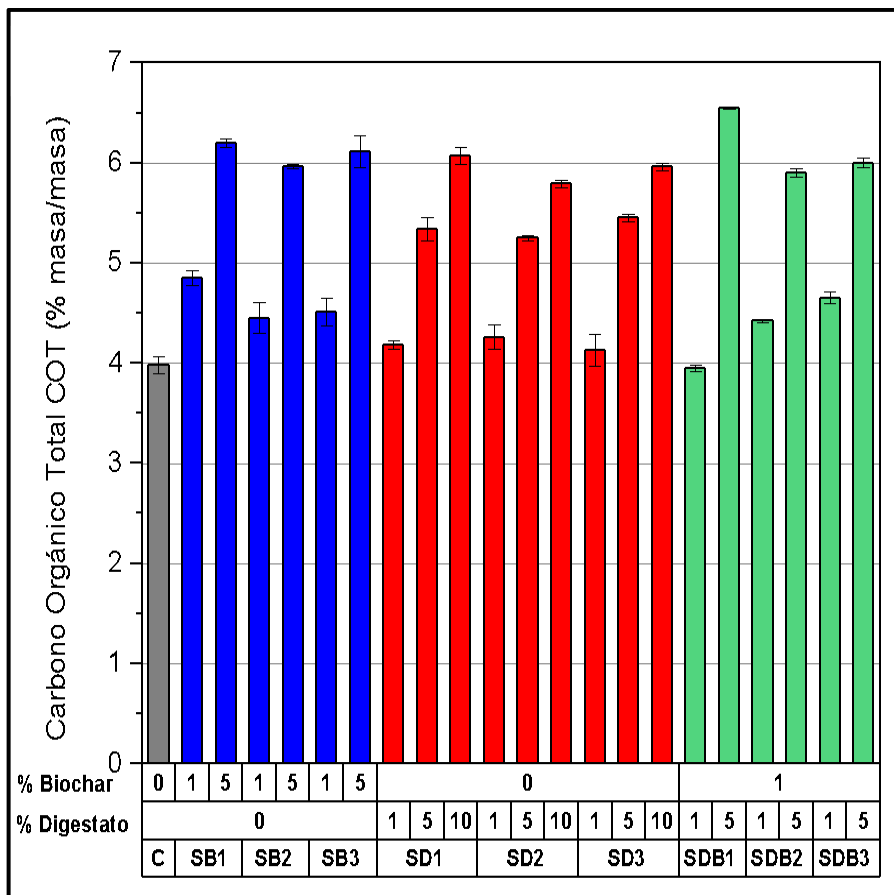


Figura 17c: Carbono Orgánico Total del suelo. Fuente: ORIGIN® PRO18.

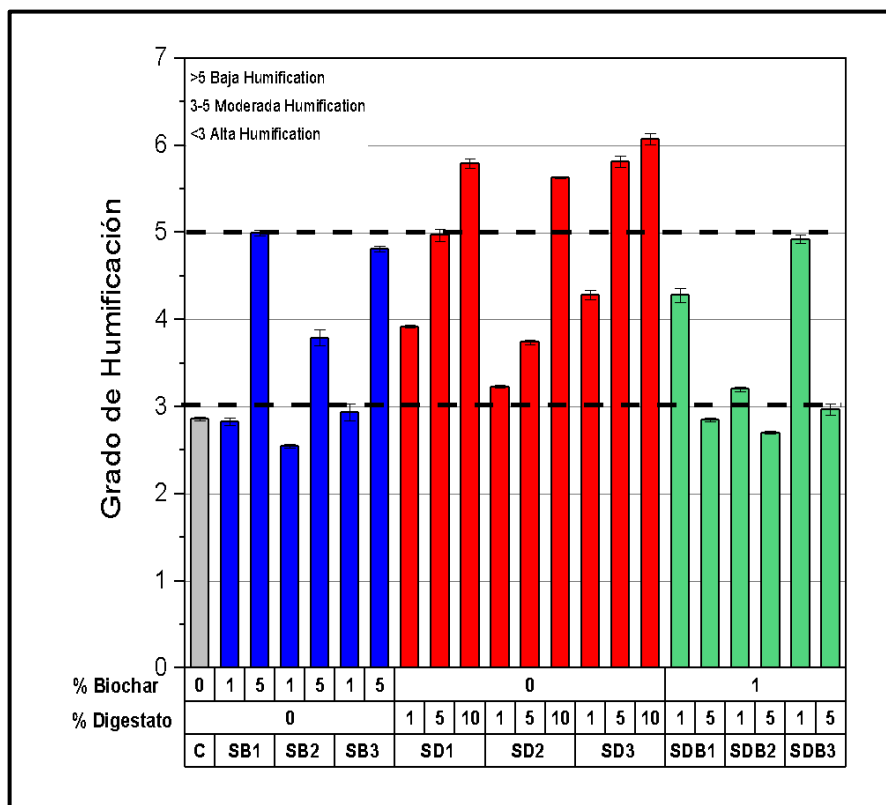


Figura 17d: Grado de Humificación del suelo. Fuente: ORIGIN® PRO18.

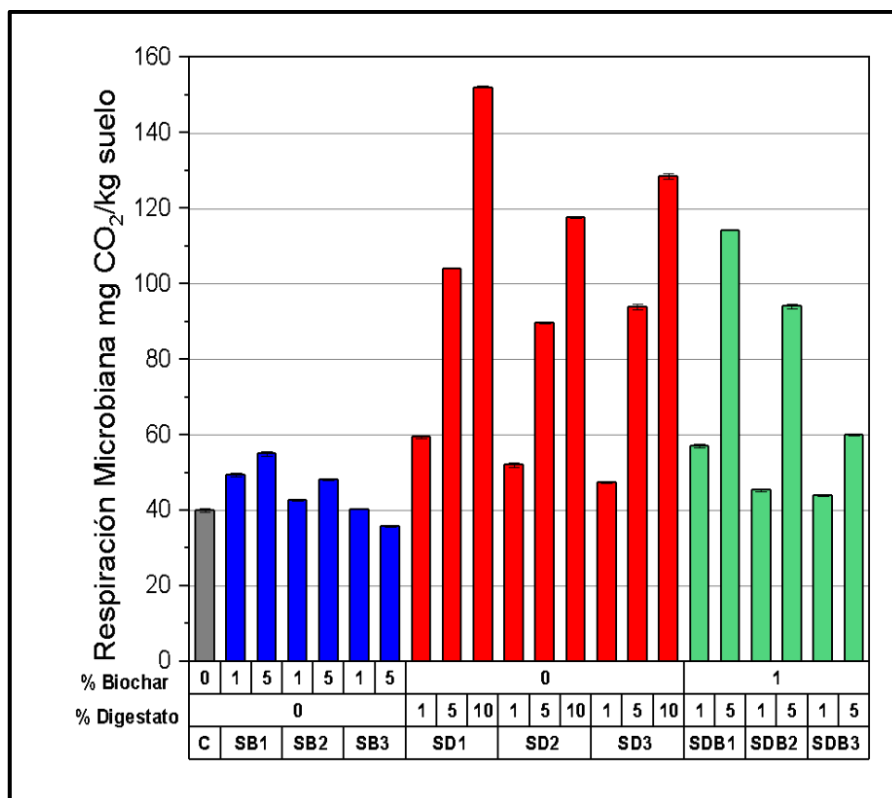


Figura 17e: Respiración Microbiana del suelo. Fuente: ORIGIN® PRO18.

En la Figura 17a se muestra la variación del pH del suelo en función de los tratamientos aplicados. Los tratamientos con los tres tipos de biocarbón (SB1, SB2 y SB3) al 1% no alteraron significativamente el pH en comparación con el suelo control. Los valores oscilaron principalmente entre 5,68 y 8,01. Algunos tratamientos, como SD3 10% (5,68), SD2 10% (6,91) y SB2 5% (8,01), presentaron valores extremos. Sin embargo, al aumentar la concentración al 5%, se observó un ligero aumento del pH, atribuido a los componentes alcalinos presentes en los biocarbones, lo que es coherente con los altos valores de pH observados en estos materiales (Tabla 3). Por otro lado, en las muestras tratadas con digestatos a diferentes concentraciones, el pH se mantuvo dentro de un rango más neutro, 6,5-7,5. Sólo SD3 a una concentración del 10 % mostró una disminución significativa del pH (5,7).

Esta reducción podría deberse a la acumulación de ácidos grasos volátiles y a la oxidación de la materia orgánica causada por el aumento de la actividad microbiana (Atav *et al.*, 2024). Los tratamientos combinados de biocarbón y digestato también mantuvieron un pH cercano a la neutralidad. Los suelos tratados con las mezclas digesto/Biochar mantuvieron un pH cercano al neutro, similar al suelo control. Otros autores que analizaron muestras similares indicaron que la reducción del pH se atribuye a la secreción de ácidos orgánicos e inorgánicos por el aumento de la actividad microbiana.

En la Figura 17b, podemos observar cómo varían los valores de conductividad eléctrica del suelo en función de los diferentes tratamientos aplicados. La conductividad eléctrica (CE) y la salinidad aumentaron en determinados tratamientos, como SD3 5 % (CE:2497 μ S/cm, salinidad:1,31 ppt) y SD3 10 % (CE:6437 μ S/cm, salinidad:3,61 ppt). Estos valores indican un aumento de la concentración de

sales en el suelo debido a las enmiendas, principalmente digestatos por encima del 5 %, y, en particular, materias primas más complejas.

Los tratamientos con biocarbón al 1% mostraron un ligero aumento de la conductividad, atribuible a la liberación de pequeñas cantidades de sales solubles contenidas en el biocarbón (Gulyás *et al.*, 2022; Hailegnaw *et al.*, 2019). Gulyás *et al.* (2022) observaron un aumento de la salinidad cuando el biocarbón (B350) y los digestatos se aplicaron individualmente y en combinación.

Al aumentar la concentración al 5%, se observó un aumento en los tres tipos de biocarbón. Sin embargo, en los tratamientos con digestatos, hay un aumento significativo de la conductividad, particularmente en SD3 (procedente de la codigestión de varios residuos agroindustriales) al 10%, donde se alcanza el valor más alto (~6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esto se atribuye a la combinación de la acidificación por ácidos grasos volátiles y la liberación de sales solubles del digestato, que también es responsable de la disminución del pH en este tratamiento (Cooke *et al.*, 2023).

Los tratamientos combinados de biocarbón y digestato también aumentan la conductividad, aunque de forma menos pronunciada que los tratamientos con digestato solo, lo que sugiere que el biocarbón puede tener un efecto moderador al absorber o neutralizar algunos de los iones liberados por el digestato.

La Figura 17c muestra el contenido total de carbono orgánico (COT). En general, los tratamientos con digestato mostraron una tendencia a aumentar el contenido de COT en comparación con el suelo control (S). SD2 (7,04 % COT) y SD3 (3,77 % COT) tuvieron valores más altos que el suelo inalterado (S). La aplicación de tratamientos con biocarbón (B350) condujo a un aumento del contenido de COT, especialmente en SB2 (31,16 % COT) y SB3 (49,75 % COT), que contenían un 5 % de biocarbón.

Esto implica que el biocarbón influye positivamente en la retención de materia orgánica del suelo. Además, la combinación de biocarbón y digestatos también mostró un aumento en el contenido total de carbono orgánico en comparación con el suelo de control. El aumento del carbono orgánico total (COT % p/p), fue similar entre los tratamientos con los diferentes tipos de biocarbón y digestatos en comparación con el suelo control. Además, el aumento del COT fue proporcional a las mayores concentraciones aplicadas.

En las combinaciones de digestatos con biocarbones, el incremento de COT fue mayor en los tratamientos con SDB al 1% y 5% comparado con el uso de biocarbón y digestato por separado. Este efecto podría deberse a la mayor porosidad de este tipo de biocarbón comparado con los otros testados, a la capacidad del biocarbón para estabilizar los compuestos orgánicos del digestato, reduciendo la pérdida de carbono y mejorando su retención en el suelo (Pastorelli *et al.*, 2024). La combinación de SDB2 (20,35 % COT) y SDB3 (50,75 % COT), con 1 % de digestato y biocarbón, produjo los valores más altos de COT. La aplicación tanto de biocarbón como de digestato mejoró el contenido global de carbono orgánico del suelo, lo que indica un efecto sinérgico sobre estas propiedades.

En la Figura 17d, se observa que los tratamientos con los tres tipos de biocarbón, aplicados a concentraciones del 1%, no modificaron significativamente el grado de humificación inicial del suelo

(grado alto), lo que indica que el carbono orgánico permaneció estable. Sin embargo, cuando las concentraciones de biocarbón se incrementaron hasta el 5%, el grado de humificación pasó a ser moderado. Aunque el biocarbón es beneficioso para la estabilidad del carbono en el suelo, su naturaleza recalcitrante y su capacidad para inmovilizar compuestos clave pueden reducir el proceso de humificación a concentraciones más altas (Mukherjee *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2023). En el caso de los tratamientos con los tres tipos de digestato en diferentes porcentajes, se observó un aumento gradual del grado de humificación a medida que aumentaba el porcentaje de digestato aplicado. La combinación de biocarbón y digestato dio lugar a un aumento moderado del grado de humificación, especialmente cuando se aplicó una concentración del 1 % de cada uno.

Los tratamientos con digestatos SD1, SD2, y SD3, aplicados a concentraciones crecientes (1%, 5%, 10%), muestran una reducción en el grado de humificación, particularmente con el digestato SD3 al 10%, mostrando un menor grado de humificación comparado con SD1 y SD2. Este menor grado de humificación podría deberse a la alta salinidad y conductividad, inhibiendo la actividad microbiana y limitando la transformación de la materia orgánica en humus.

Los tratamientos combinados (SDB1, SDB2, SDB3) muestran un grado de humificación moderado (3-5), con incrementos notables a concentraciones del 5% de digestato, especialmente en SDB2.

La combinación de biocarbón y digestato parece tener un efecto sinérgico moderado. Su porosidad y contenido en grupos funcionales reactivos puede haber favorecido una mayor actividad microbiana y un mayor grado de humificación en las mezclas SDB2. Además, se ha observado que la menor disponibilidad de carbono lábil en presencia de biocarbón se debe a un mecanismo de relleno de poros, en el que se absorben selectivamente porciones de carbono alifático de la materia orgánica natural (Smebye *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2017).

Como se muestra en la Figura 17e, se observó un aumento significativo de la respiración microbiana en varios tratamientos en comparación con la del suelo de control. En particular, los tratamientos que incluían SD1, SD2 y SD3 con concentraciones de digestato del 5 % y 10 % mostraron un aumento de esta actividad. Este aumento estaba probablemente relacionado con la concentración de digestato y el grado de humificación. El aporte adicional de nutrientes y materia orgánica proporcionado por el digestato estimuló la actividad microbiana en el suelo, lo que se traduce en un aumento de la liberación de CO₂.

En los tratamientos SDB1, SDB2 y SDB3, en los que se combinó un 5% de digestato con un 1% de biocarbón, se observó una tendencia general de aumento de la liberación de CO₂ (respiración microbiana) a medida que aumentaba el porcentaje de digestato. La presencia tanto de biocarbón como de digestato estabilizó la respiración microbiana. La liberación gradual de CO₂ en estos tratamientos sugirió que la actividad microbiana se mantuvo estable en el tiempo y que la degradación de la materia orgánica fue progresiva. La adición de pequeñas cantidades de biocarbón puede haber estimulado la acumulación de carbono en el suelo (cebado de carbono) (Tang *et al.*, 2023). Por el contrario, se observó una reducción de la respiración microbiana con la combinación de SF-3 y su correspondiente

B350 -3. Esta disminución podría estar relacionada con el aumento de la conductividad eléctrica y del contenido en sales del suelo.

Investigaciones anteriores han demostrado que la menor disponibilidad de carbono fácilmente degradable en presencia de biocarbón se debe a un mecanismo de llenado de poros, en el que se produce una adsorción selectiva de componentes de carbono alifático de la materia orgánica natural, lo que resulta en la adición de carbono resistente a la descomposición a las reservas residuales del suelo (Chen *et al.*, 2023).

Otros estudios han demostrado que, tras la aplicación de biocarbón, las emisiones de CO₂ y N₂O en el suelo se reducen a través de varios mecanismos, incluyendo cambios en el pH, la promoción de la relación NO/N₂ durante la desnitrificación, el aumento de la actividad microbiana y la adsorción de NH₄⁺ o NO₃⁻, así como la mejora de la aireación del suelo (Ameloot *et al.*, 2016; Khan *et al.*, 2023).

El uso de biocarbón con digestato podría retrasar la liberación de nitrógeno y actuar como un inhibidor de la nitrificación respetuoso con el medio ambiente para fertilizantes de liberación lenta (Cui *et al.*, 2017).

Estos resultados son consistentes con estudios previos que muestran que el biocarbón puede aumentar la retención de nutrientes en el suelo y mejorar la actividad microbiana (Xiang *et al.*, 2021; Khadem *et al.*, 2021).

Los tratamientos con biocarbón al 1% (**SB1, SB2, SB3**) se encontraron cerca del control, sugiriendo cambios mínimos.

SB1 (1%) retuvo más COT, mientras que SB2 (1%) aumentó ligeramente la CE. A concentraciones del 5%, los tratamientos se alejaron más del control, mostrando mayores modificaciones en las propiedades del suelo.

SB1 (5%) y SB2 (5%) mejoraron la retención de COT, mostrando SB2 (5%) un mayor impacto sobre la CE. El SB3 (5%) se correlacionó positivamente con el grado de humificación y la respiración microbiana. Estos resultados son consistentes con estudios previos que muestran que el biocarbón puede aumentar la retención de nutrientes en el suelo y mejorar la actividad microbiana.

El ensayo con digestatos SD1, SD2 y SD3 a diferentes concentraciones (1%, 5% y 10%) mostró un notable impacto en las propiedades del suelo, en comparación al suelo control ya que el aporte adicional de nutrientes y materia orgánica proporcionado por el digestato estimuló la actividad microbiana en el suelo, aumentando la liberación de CO₂.

Los ensayos con digestato al 10% mostraron una mayor variación en la composición inicial del suelo, mayoritariamente SD3 debido a las características de su material de partida.

Se observó que la eficacia del biocarbón puede variar en función de factores como el tipo de biocarbón (material de partida), la concentración aplicada y las condiciones específicas del suelo y los cultivos.

Estos resultados proporcionaron una comprensión más completa de las características de los subproductos obtenidos mediante carbonización y su viabilidad en la incorporación de prácticas agronómicas.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio, demostraron que la aplicación de biocarbón derivado de procesos de digestión anaerobia influye positivamente en la calidad, en la química y en varias propiedades del suelo. Estos efectos incluyen poca variabilidad del pH del suelo, aumento de la retención de nutrientes y mejora su biodisponibilidad, la estabilidad de la materia orgánica y la promoción de la actividad microbiana.

El biocarbón incorporado en el suelo, puede secuestrar carbono a largo plazo, reduciendo así el (CO₂) atmosférico y mejorando las aplicaciones económicas y medioambientales centradas en la sostenibilidad.

La adición de biocarbón, especialmente en combinación con digestatos, tuvo un efecto mejorador sobre la calidad del suelo, lo que sugiere un potencial beneficioso para las prácticas agrícolas sostenibles.

El suelo control mantuvo interacciones mínimas, indicando que sus características no cambiaron durante los 100 días de ensayo.

Los resultados permitieron proponer diferentes mezclas de ensayos sobre suelo control, donde se pudo identificar como las diferentes mezclas influyen en las propiedades del suelo, facilitando la comprensión de las complejas relaciones entre los tratamientos de biocarbón y digestatos en el suelo y las variables analizadas. Este enfoque permitió identificar las mejores mezclas para mejorar la fertilidad del suelo y minimizar el impacto ambiental.

Las mejores combinaciones son SB3 1% -5% y SDB3 1% - 5% correspondientes a las FS3 compuestas por residuos agroindustriales (efluentes de matadero, productos lácteos, subproductos del procesamiento del maní y purín de cerdo). Estas mezclas se consideran las mejores combinaciones ya que en el suelo presentan un comportamiento donde representan valores de pH inicialmente neutro hacia alcalinos dentro del rango entre 7,02 y 8,01, conductividad moderada dentro del rango (3000 µS/cm), aportan un alto contenido de nutrientes entre 49,75 % y 50,75 % COT, ya que FS3 y B3 poseen un pH de neutro a alcalino, niveles de conductividad moderados, de los más altos valores de MO y SV, el valor más alto de COT, NT y contenido de fósforo, lo que nos indica que estas combinaciones se correlacionan positivamente con un alto grado de humificación y respiración microbiana, evidente debido al aporte adicional de nutrientes y materia orgánica proporcionado por el digestato que estimuló la actividad microbiana en el suelo.

Los beneficios que presenta la aplicación de biocarbones al suelo como un fertilizante orgánico genera que en los últimos años haya ganado atención como una potencial herramienta en la mitigación del cambio climático porque forma parte de soluciones con perspectiva climática, salud geoambiental y sustentabilidad en las prácticas agrícolas.

El pH del suelo control es de 6,9 este indica que el suelo es ligeramente ácido a prácticamente neutro, el pH de los tres tipos de biocarbones que se analizaron varían entre 10, 8 - 11, 33, en este trabajo partimos de un suelo que posee un pH neutro, cuando se combina con los biocarbones con pH altos, el pH del suelo se torna más alcalino, este mejoramiento del pH, es beneficioso para los suelos ácidos, donde la

aplicación de biocarbones alcalinos actúa como un remediador o mejorador químico del suelo, incrementando el pH, reduciendo la acidez intercambiable y mejorando la disponibilidad de nutrientes, con un efecto correctivo para suelos ácidos. De todas formas, para comprobar este aumento del pH se sugiere hacer análisis del porcentaje de sodio de intercambio, ya que dosis elevadas o biocarbones muy alcalinos pueden provocar sobre-alcalinización del suelo y este efecto es el que se quiere evitar debido a que es un limitante para el crecimiento vegetal de los cultivos.

Las características estructurales y morfológicas son favorables para la retención de agua y absorción de nutrientes porque facilitan la colonización microbiana, potenciando la actividad del consorcio microbiano del suelo, permiten la adsorción de contaminantes y metales pesados. Son aplicables para remediación de suelos inundados o contaminados y para el tratamiento de aguas residuales.

A partir del análisis de los datos cuantitativos detallados en la introducción, sobre la producción de biogás, disponibilidad de digestato y la generación de energía eléctrica dentro de la matriz energética nacional, y en relación con los valores de producción de biogás a nivel mundial, se evidencia que una fracción significativa del material tratado en los procesos de digestión anaeróbica no se convierte en biogás. Este remanente, constituido por el digestato excedente, representa un subproducto con alto potencial de valorización, permitiéndonos realizar estimaciones sobre el porcentaje de digestato que puede ser destinado a su transformación en biocarbones, contribuyendo a mejorar la eficiencia global del sistema de producción de biogás y fortalecer estrategias de economía circular y sostenibilidad ambiental.

7. CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Todos los análisis realizados en este estudio se compartirán con las plantas de biogás que proporcionaron el digestato como objeto de estudio. Esta colaboración es esencial para promover un uso responsable y efectivo de los recursos agronómicos, contribuyendo así a la sostenibilidad y la optimización de los procesos de producción de biogás en la región.

Se debe tener un particular cuidado en la aplicación de digestatos y biocarbones sobre el suelo, un adecuado monitoreo del comportamiento del suelo control y del suelo posterior al tratamiento con digestatos y biocarbones, también un minucioso control de material de partida del digestato, de la pirólisis y carbonización de los carbonos.

Este trabajo, en su totalidad se llevó a cabo en pequeña escala, este detalle, se presenta como una limitación, por lo que se sugiere continuar con este estudio de digestato y biocarbones a largo plazo, poder regular más en detalle las mezclas y concentraciones de digestatos/biocarbonos sobre el suelo para de esa forma seguir reconociendo los efectos y comportamientos del suelo y su aplicación en invernaderos como fertilizantes para especies nativas y en huertas.

Sin embargo, es importante señalar que la eficacia del biocarbón puede variar en función de factores como el tipo de biocarbón, la concentración aplicada y las condiciones específicas del suelo y los cultivos. Por lo tanto, se requieren estudios detallados y ensayos de campo para evaluar adecuadamente los beneficios del biocarbón en contextos específicos.

El punto de partida de esta investigación comienza en las biorefinerías anaerobias precisamente en la digestión anaerobia (DA) que es una tecnología de revalorización energética y ambiental de residuos orgánicos de origen agroindustrial, más precisamente la reutilización de los residuos que descartan las plantas de biogás, el ya mencionado digestato. Como estrategia de revalorización del digestato se propone la producción de biocarbones, que consiste en la pirólisis o sea la carbonización de la FS del digestato. Los ensayos nos permitieron evaluar la aplicación de estos biocarbones como fertilizante orgánico, sobre un suelo de uso agronómico típico de la región y conocer el comportamiento del suelo desde el punto de vista geológico. Las observaciones y resultados comentados anteriormente, permitieron enfatizar en el potencial que tiene el biocarbón como herramienta para la mitigación del cambio climático, como captador geológico de carbono y fertilizante orgánico, ya que podría contribuir a reducir el uso y lograr un progresivo reemplazo de los fertilizantes sintéticos, además de posicionarlo como un insumo que al aplicarlo al suelo en su correcta dosis y teniendo en cuenta el tipo de suelo y cultivo, brinda beneficios positivos que mejoran la sustentabilidad de las prácticas agrícolas.

- Como perspectiva a futuro se propone medir la descarbonización de las emisiones de gases efecto invernadero en un suelo con uso del biocarbón como fertilizante orgánico y en un suelo con uso de fertilizantes químicos y de esta forma poder registrar la disminución en el uso de fertilizantes químicos. Se pretende lograr conocer la disponibilidad y el potencial energético para producir biocarbones de diferentes residuos biomásicos en la región.

- Generar y transferir conocimientos y desarrollos tecnológicos a los productores de pequeña, mediana y gran escala, en manejo de instalaciones y tratamiento de pasivos ambientales, a fin de mejorar sus sistemas productivos.
- Desarrollar actividades de extensión y de divulgación en la comunidad.
- Este trabajo final de grado aporta continuar trabajando en función a los lineamientos nacionales en el área estratégica de ambiente y desarrollo sustentable y responder a la demanda de desarrollo científico-tecnológico regional debido a la creciente instalación de plantas de biogás.
- Seguir en articulación Universidad - Industrias bioenergéticas, ya que el mismo vincula ambas áreas de la carrera Licenciatura en ambiente y energías renovables.
- Es importante destacar la importancia de la conjunción de la actividad académica con unidades productivas como parte esencial del estudio para desarrollar la tecnología de biodigestión anaeróbica más adecuada considerando todas las variables y continuar haciéndolo al incorporar los resultados de la investigación académica.
- La tecnología evaluada a escala real, y con datos a escala piloto, permitirá la transferencia a mediano y corto plazo. Por otro lado, permitirá a la Universidad Nacional de Villa María continuar brindando servicios y asesoramientos para fomentar la innovación y promover la industrialización sostenible en el área de biorrefinerías anaerobias. Además, la formación de recursos humanos con formación profesional especializada en la temática.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdo, A.I. (2021) Cambios en las propiedades hidrofísicas del suelo arenoso en función de las enmiendas de lodos de biocarbón y biogás. *Gestión del uso del suelo*. 37(4): Pp. 762-771. Consulta 26/04/2024.
- Acosta, Y., Paolini, J., y Benítez, E. (2004) Índice de humificación y ensayo de fitotoxicidad en residuos orgánicos con potencial uso agrícola. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 21 (4), Pp: 185-194. Consulta 25/06/25 http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182004000400008&lng=es&tlng=es
- AIE (Agencia Internacional de Energía). Consulta 12/12/2025
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M. P. (2012) Evaluación del potencial fertilizante de los digestatos procedentes de residuos agrícolas y agroindustriales. *Biomasa y bioenergía*: Pp. 40, 181-189. Consulta 04/10/2024.
- Alcobendas, A. I. (2020) Cultivos energéticos y residuos agro-ganaderos como sustratos para optimizar el potencial de generación de biogás en procesos de digestión anaerobia: Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, España. Consulta 04/10/2024.
- Ameloot, N., Maenhout, P., De Neve, S., y Sleutel, S. (2016) Emisión de N₂O inducida por biocarbón inducida por el biocarbón en un suelo franco: *Geoderma*. Pp. 267, 10-16. Consulta 11/03/2025.
- Ampese, L., et al. (2022) Avances, tendencias y actualizaciones de la investigación sobre tecnología de digestión anaerobia: Un análisis bibliométrico. *Revista de producción más limpia*: Pp. 331, 130004. Consulta 04/10/2024.
- Antonopoulou, G., Kampranis, A., Ntaikou, I., y Lyberatos, G. (2019) Mejora de la producción de biocombustibles líquidos y gaseosos a partir de residuos agroindustriales tras pre tratamiento termoquímico y enzimático: *Fronteras de los sistemas alimentarios sostenibles*. Pp. 3, 92. Consulta 05/11/2024.
- AOAC International (2019) Asociación de químicos analíticos oficiales. *Métodos oficiales de análisis (22ª ed.)*. Consulta 05/11/2024.
- Arana et al. (2021) Consulta 02/11/2024.
- Aso, S. (2020) Digestato: El Coproducto de la Producción de Biocombustibles en una Economía Circular, y Nuevos Resultados para el Digestato de Residuos de Pelado de Yuca. Consulta 07/06/2024.
- Asociación Americana de Salud Pública. (2017) *Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (23ª ed.)*. APHA Prensa. Consulta 05/11/2024.
- Atav, V., Yüksel, O., Namli, A., y Gürbüz, M. A. (2024) Aplicación de digestato líquido de biogás: influencia sobre la biomasa microbiana del suelo y la respiración de CO₂: *Revista de gestión de residuos de ciclos de materiales*. Pp. 1-10. Consulta 11/03/2025.
- Atelge, M., et al. (2020) Producción de biogás a partir de residuos orgánicos: avances recientes y perspectivas. *Valorización de residuos y biomasa*: Pp. 11,1019-1040. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>. Consulta 04/10/2024.
- *Biología Bioquímica*. Pp. 104, 49-58. Consulta 11/03/2025
- Bres, P., Beily, M., y Hilbert, J. (2021) Relevamiento de la Producción de Digestatos de Plantas de Biogás en Argentina. *Plantas de Biogás en Argentina. Estudio del impacto ambiental, gestión y tratamiento de residuos y efluentes en sistemas agropecuarios y agroindustriales. Sistemas agrícolas y agroindustriales para su valorización agronómica: Tecnología de biorrecursos*. Consulta 04/10/2024.
- Brown, R., J. Lehmann, y S. Joseph. (2009) *Biocarbón para la gestión medioambiental: Ciencia y tecnología*. J Ed. Earthscan, Londres, Reino Unido, Cap. 8: Pp. 127-146.

- Calamai, A., Palchetti, E., Masoni, A., Marini, L., Chiaramonti, D., Dibari, C., y Brilli, L. (2019) Influencia del biocarbón y el digestato sólido en la productividad y la calidad del aceite esencial de geranio perfumado con rosas: *Agronomía*. Pp. 9(5), 260. Consulta 05/11/2024.
- CAMMESA (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico). Consulta 12/12/2025
- Cardelli, R., Giussani, G., Marchini, F., y Saviozzi, A. (2018) Efectos a corto plazo en el suelo de digestato de biogás, biocarbón y sus combinaciones. *Investigación del suelo*: Pp. 56(6), 623-631. Consulta 05/11/2024.
- Casanellas J, P., López Acevedo, M. y Roquero de Laburu, C. (2003) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Casini, D., Barsali, T., Rizzo, A. y Chiaramonti, D. (2021) Producción y caracterización de Biochar co-compostaje y digestato de biomasa por digestión anaerobia: Conversión de la biomasa Biorrefinería. Pp. 11(6), 2271-2279. Consulta 11/03/2025.
- Cerrano, E. (2018) Uso de productos derivados del proceso de digestión anaeróbica: beneficios y Moportunidades para la agricultura y el ambiente. Consulta 04/10/2024.
- Chen, L., Chen, Y., Li, Y., Liu, Y., Jiang, H., Li, H., y Zou, B. (2023) Mejora de la humificación mediante aditivos durante el compostaje: *Gestión de Residuos*. Pp. 158, 93-106. Consulta 11/03/2025.
- Cheng, Y., Wang, B., Shen, J., Yan, P., Kang, J., Wang, W., y Wang, S. (2022) Preparación de Nuevo biocarbón dopado con N y su alta capacidad de adsorción de atrazina basada en la interacción donante-aceptor de electrones π - π . interacción donante-aceptor: *Revista de materiales peligrosos*. Pp. 432, 128757. Consulta 11/03/2025.
- Chintala, R., Schumacher, T., Kumar, S., Malo, D., Rice, J., Bleakley, B., Papiernik, S. (2014) Caracterización molecular de biocarbones y su influencia en las propiedades microbiológicas del suelo: *Revista de materiales peligrosos*. Pp. 279, 244-256. Consulta 11/03/2025.
- Chong., et al. (2022) El digestato anaerobio como fuente de nutrientes de bajo coste para el cultivo sostenible de micro algas: *Ciencia del medio ambiente*. Consulta 04/10/2024.
<https://www.hrsheatexchangers.com/es/recursos/entendiendo-el-digestato/>.
- Cook y Lee. (2000) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Cooke, J., Girault, R., Busnot, S., Morvan, T., y Menasseri-Aubry, S. (2023) Caracterización del efecto de los digestatos crudos y postratados sobre la estabilidad de los agregados del suelo: Valorización de la biomasa residual. Pp. 14(9), 2977-2995. Consulta 11/03/2025.
- Cresser et al. (1993) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Cui, J., Ge, T., Kuzyakov, Y., Nie, M., Fang, C., Tang, B. y Zhou, C. (2017) Interacciones entre el biocarbón y el cebado de hojarasca: Un estudio de partición de ^{14}C y ^{13}C de tres fuentes: *Suelo*
- Dar, R., et al. (2021) Biometanización de residuos agrícolas: Potencial, limitaciones y posibles soluciones. *Revisiones de energías renovables y sostenibles*. 135: Pp. 110, 217. Consulta 28/04/2024.
- Datta, R., Kelkar, A., Baraniya, D., Molaei, A., Moulick, A., Meena, R. S., y Formanek, P. (2017) Degradación enzimática de la lignina en el suelo: *Sostenibilidad*. Pp. 9(7), 1163. Consulta 05/11/2024.
- De Roose y Van Parijs. (1991) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Drogg, B., et al. (2015) Recuperación de nutrientes mediante el procesamiento de digestato de biogás (Vol. 2015, Pp. 711). Dublín: AIE Bioenergía. Consulta 04/10/2024.
- EPA, (2011) Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU. *Manual de factores de exposición* (Final ed.). Consulta 05/11/2024.
- FAO, I. (2002) *Los fertilizantes y su uso: una guía de bolsillo para los oficiales de extensión*. Consulta 04/10/2024.
- FAO. (2019) *Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico*. Colección Documentos Técnicos N° 6. Buenos Aires. Consulta 06/06/2024.

- Fassbender. (1975) Química de Suelos: Pp. 89; Thompson, L., Troeh, F. (1988) Los suelos y su fertilidad. Barcelona, España. Pp. 135: Ciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento: Pp. 11 (25). Consulta 18/11/2024.
- Fernández, J., Bernardino, C., Mahler, C., Santelli, R., Braz, B., Borges, R., y Cincotto, F. (2021) Biocarbón generado a partir de residuos de caña de azúcar de la agroindustria por baja temperatura como agente de adsorción para la eliminación del pesticida tiаметoxam en aguas residuales: Contaminación del agua, el aire y el suelo. Pp. 232, 1-13. Consulta - 11/03/2025.
- Figura 1. Burboa, et al. (2023) Materiales conductores de electrones y su impacto durante la producción anaerobia de metano. Consulta 04/10/2024
- Figura 2. Ortiz, et al. (2019) Recursos de biomasa. Consulta 04/10/2024.
- Figura 3. FAO. (2019) Estudio de cuencas de biogás. Colección Informes Técnicos N° 4. Buenos Aires. Consulta 04/10/2024.
- Figura 4. FAO. (2019). Estudio de cuencas de biogás. Colección Informes Técnicos N° 4. Buenos Aires. Consulta 04/10/2024.
- (FAO, 2019). Distribución de biomasa húmeda en la Argentina, según potencial de generación de biogás.
- Galván et al. (2024). Biocarbones y digestatos: Una estrategia global para mejorar la calidad del suelo, la sostenibilidad agrícola y la mitigación del cambio climático. Pp. 4. Consulta 02/11/2024.
- Galván, M.J., et al. (2023) Biocarbones y digestatos: Una estrategia integral para mejorar la calidad del suelo, la sostenibilidad agrícola y la mitigación del cambio climático. Pp. 1. Consulta 04/10/2024.
- García, M. (2013) Nuevos conceptos para biorrefinerías de aceite de palma. Palmas, 34, Tomo II. Pp, 66-84. Consulta 6/12/2024
- Gaunt y Lehmann. (2008) Pp. 4152, 4155. Consulta 04/10/2024
- Geoffrey. (2008) Consulta 04/10/2024
- Gregorich y Cante. (1997); Franzluebbers. (2002); Baldock y Nelson. (2000) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Guerrero, I., Peláez Jaramillo, C., y Molina Pérez, F. (2016) Evaluación de la codigestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos: Revista Ion. Pp. 29(1), 63- 70. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>. Consulta 04/10/2024.
- Gulyás, M., Someus, E., Klátyik, S., Fuchs, M., Varga, Z., Dér, S., y Gyuricza, C. (2022) Efectos de la aplicación combinada de productos sólidos de pirólisis y digestato sobre propiedades seleccionadas del suelo de arenoso y el crecimiento y composición de las plantas en experimentos de laboratorio: Agronomía. Pp. 12(6), 1440. Consulta 11/03/2025.
- Gupta, M., et al. (2022) Uso de biocarbón derivado de biomasa en el tratamiento de aguas residuales y la producción de energía: Una solución prometedora para un medio ambiente sostenible: Ciencia del Medio Ambiente Total, 825, 153892.
- Gusiatin, Z., Kurkowski, R., Brym, S., y Wiśniewski, D. (2016) Propiedades de los biocarbones materias primas convencionales y alternativas y su idoneidad para la inmovilización de metales en suelos industriales: Investigación sobre la contaminación en ciencias ambientales. Pp. 23, 21249-21261. Consulta 11/03/2025.
- Hailegnaw, N., Mercl, F., Pracke, K., Szakova, J., Tlustos, P., y Sedimentos. (2019) Relaciones mutuas de Biochar y pH del suelo, CEC, y cationes base intercambiables en un experimento de laboratorio modelo: Revista de Suelos. Pp. 19, 2405-2416. Consulta 11/03/2025.
- Huang, K., Li, M., Li, R., Rasul, F., Shahzad, S., Wu, C., Almari, S. (2023) Acidificación del suelo y salinidad: la importancia de la aplicación de biocarbón a los suelos agrícolas. Fronteras de la ciencia. Pp. 14, 1206820. Consulta 05/11/2024.

- Huang, Y., et al. (2020) Avances fundamentales en la pirólisis autotérmico/oxidativa de biomasa: Ingeniería Química Sostenible. 8(32). Pp. 11888-11905.
- Husain, Z., et al., (2022) Biocarbón mesoporoso nanométrico derivado de la pirólisis de biomasa como supercapacitor de almacenamiento electroquímico de energía: Ciencia de los Materiales para Tecnologías Energéticas. Pp. 5: p. 99-109. Consulta 11/03/2025.
- Ioannou-Ttofa, L., et al. (2021) Evaluación del ciclo de vida de la producción doméstica de biogás en Egipto: Influencia del volumen del digestor, fugas de biogás y valorización del digestato como biofertilizante. Revista de Producción Más Limpia. 286: Pp. 125468. Consulta 22/04/2024.
- Jesús A. Torres Ortega., et al. (2017) Análisis de ciclo de vida para una biorrefinería derivada de residuos agrícolas de palma aceitera. Consulta 06/12/2024.
- NTI. (2019). Relevamiento Nacional de Biodigestores: Diagnóstico integral sobre la biodigestión anaeróbica en Argentina. Proyecto PROBIOMASA.
- Kelley y Stevenson. (1996) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Khadem, A., Raiesi, F., Besharati, H., y Khalaj, M. (2021) Efectos del biocarbón en los nutrientes del suelo, la actividad microbiana y el potencial de secuestro de carbono en dos suelos calcáreos: Biochar. Pp. 3(1), 105-116. Consulta 11/03/2025.
- Khan, Z., et al. (2023) El biocarbón de ingeniería mejora la eficiencia del uso del nitrógeno mediante la estabilización de los macro agregados estables en el agua del suelo y la mejora de la transformación del nitrógeno. 5(1): Pp. 52. Consulta 07/06/2024
- Khan, Z., Yang, X., Fu, Y., Joseph, S., Khan, M., Khan, M., y Shen, H. (2023) Diseñada mejora la eficiencia del uso del nitrógeno mediante la estabilización de los macroagregados estables en el agua del suelo y la transformación del nitrógeno la transformación del nitrógeno: Biochar. Pp. 5(1), 52. Consulta 11/03/2025.
- Kumada, K., Kawamura, Y., & Nutrition, P. (1968) Sobre el fraccionamiento de ácidos húmicos por una técnica de precipitación fraccionada: Ciencia del suelo, 14(5), 198-200. Consulta 05/11/2024.
- Kumar, A., et al. (2023) Aplicaciones multifacéticas del biocarbón en la gestión medioambiental: un perfil bibliométrico. Biochar. 5(1): Pp. 11. Consulta 04/10/2024.
- Labrador et al. (2002) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Lamolinara, B., et al. (2022) Manejo del digestato anaeróbico, impactos ambientales y desafíos tecno-económicos. Gestión de Residuos. 140: Pp. 14-30. Consulta 29/04/2024.
- Larson y Pierce. (1994) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Lehmann, J. (2007) Un puñado de carbono. Consulta 28/05/2024.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). La naturaleza controvertida de la materia orgánica del suelo. Nature, 528(7580), 60. Consulta 13/10/2025
- Liao, J., Liu, X., Hu, A., Song, H., Chen, X. y Zhang, Z. (2020) Efectos del control a base de biocarbón en la eficiencia del uso del nitrógeno en colza oleaginosa: Informes Científicos. Pp. 10(1), 11063. Consulta 11/03/2025.
- Luo, D., Wang, L., Nan, H., Cao, Y., Wang, H., Kumar, T., y Wang, C. (2023) Adsorción de fósforo por biocarbón funcionalizado: Cartas de química ambiental. Pp. 21(1), 497-524. Consulta 11/03/2025.
- MAAySP. (2017) Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos; Resolución 2017-29. Estándares Ambientales, de Emisión o de Efluentes y Estándares Tecnológicos para la Gestión y Aplicación Agronómica de Residuos Pecuarios de la Provincia de Córdoba. Consulta 04/10/2024.
- Macias. (2002) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente: 3era edición. Consulta 18/11/2024.

- Manasa, M., Katukuri, N, Xu, X., Guo, R., y Análisis, P. (2020) Rehabilitación de suelos salinos con digestato de biogás, ácido húmico, humato cálcico y sus amalgamas. *Comunicaciones sobre la ciencia del suelo*. Pp. 51(13), 1707-1724. Consulta 05/11/2024.
- Manikandan et al. (2023) Revisión completa de las recientes tendencias de producción y aplicaciones del biocarbón para un medio ambiente más ecológico. *Tecnología de biorrecursos*: Pp. 129- 725. Consulta 18/11/2024.
- Marousek, J., Minofar, B., Marousková, A., Strunecký, O., y Gavurová, B. (2023) Medio ambiente y económicas de la producción y aplicación del biocarbón de digestato: *Innovación Tecnológica Ambiental*. Pp.30, 103109. Consulta 11/03/2025.
- Martínez, D. (2024). Estudio de la aplicación de digestatos y biocarbones provenientes de procesos de digestión anaerobia en suelo: Pp. 2. Consulta 09/05/2024.
- McCabe, B., et al. (2020) Integración de la digestión anaeróbica en los sistemas agrícolas en Australia, Canadá, Italia y el Reino Unido. *Tarea de bioenergía de la IEA*. Consulta 28/04/2024.
- Méndez, J., et al. (2011) Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización. M. P. B. Calderón (Ed.). Consulta 04/10/2024.
- Möller, K., y Müller, T. (2012) Efectos de la digestión anaerobia en la disponibilidad de nutrientes del digestato y en el crecimiento de los cultivos: *Ingeniería en ciencias de la vida*. Pp. 12(3), 242-257. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/elsc.201100085>. Consulta 04/10/2024.
- Mortola, N., et al. (2022) Uso de digeridos derivados de la producción de biogás como biofertilizante y enmienda del suelo. Consulta 04/10/2024.
- Mukherjee, A., Lal, R., y Zimmerman, A. (2014) Efectos del biocarbón y otras enmiendas en las propiedades físicas y las emisiones de gases de efecto invernadero de un suelo degradado artificialmente: Pp. *Ciencia del Medio Ambiente Total*. Pp. 487, 26-36. Consulta 11/03/2025.
- Muscolo, A., Settineri, G., Papalia, T., Attinà, E., Basile, C., y Panuccio, M. (2017) Codigestión anaerobia de residuos agrícolas recalcitrantes: Caracterización de los parámetros bioquímicos del digestato y sus impactos en el ecosistema edáfico. *Ciencia del Medio Ambiente Total*: Pp. 586, 746-752. Consulta 05/11/2024.
- Nelson, D., y Sommers, L. (1996) Carbono total, carbono orgánico y materia orgánica: *Métodos de análisis de suelos: parte 3 Métodos químicos*. Pp. 5, 961-1010. Consulta 11/03/2025.
- Nielsen, K., Ross, C., Hoffmann, M., Muskolus, A., Ellmer, F., y Kautz, T. (2020) La composición química de los digestatos de biogás determina su efecto sobre la actividad microbiana del suelo: *Agricultura*. Pp. 10(6), 244. Consulta 05/11/2024.
- Ning, C., et al. (2017) Impactos de la reducción de fertilizantes químicos y la suplementación con enmiendas orgánicas en los nutrientes del suelo, la actividad enzimática y el contenido de metales pesados. *Revista de Agricultura Integrativa* Pp: 16 (8), 1819- 1831. Consulta 04/10/2024.
- Nkoa, R. (2014) Beneficios agrícolas y riesgos medioambientales de la fertilización del suelo con digestatos anaerobios: *Agronomía y desarrollo sostenible*: Pp. 34: 473–492. Consulta 04/10/2024.
- Norouzi, O., y Dutta, A. (2022) Situación actual y potencial futuro de la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de Canadá. *Energías* Pp: 15(2), 475. Consulta 04/10/2024.
- Novotný, M., et al. (2023) El uso de biocarbón elaborado a partir de biomasa y biosólidos como sustrato para infraestructuras verdes: *Química sostenible*, 32: Pp. 100- 999. Consulta 04/10/2024
- Novotný, M., Marković, M., Racek, J., Sipka, M., Chorazy, T., Tosić, I., Farmacia. (2023) El uso de biocarbón hecho de biomasa y biosólidos como sustrato para la infraestructura verde: *Química sostenible*. Pp. 32, 100999. Consulta 11/03/2025.

- Panahi, H., et al. (2020) Una revisión exhaustiva del biocarbón diseñado: producción, características y aplicaciones ambientales. *Revista de producción más limpia*. 270: Pp. 122462. Consulta 30/04/2024.
- Panigatti, J. (2010) *Argentina 200 años, 200 suelos*. Ed. INTA Buenos Aires. Pp. 45: Ilustraciones y cuadros. Consulta 18/11/2024.
- Pastorelli, R., Casagli, A., Rocchi, F., Tampio, E., Laaksonen, I., Becagli, C., y Lagomarsino, A. (2024) Efectos de los digestatos anaerobios y las enmiendas de biocarbón en la salud del suelo, las emisiones de gases de efecto invernadero y las comunidades microbianas: Estudio de mesocosmos. *Ciencias Aplicadas*. Pp. 14(5), 1917. Consulta 11/03/2025.
- Paul, E. A. (2016). La naturaleza y la dinámica de la materia orgánica del suelo: aportes vegetales, transformaciones microbianas y estabilización de la materia orgánica. *Soil Biology and Biochemistry*, 98, Pp. 109-126. Consulta 13/10/2025
- Pedreño, et al. (1995) *Residuos orgánicos y agricultura*: Universidad de Alicante. Consulta 18/11/2024.
- Peng, W. y A. Pivato. (2019) Gestión sostenible del digestato de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y residuos alimentarios bajo los conceptos de alternativas de regreso a la tierra y economía circular. Valorización de la biomasa de residuos. 10(2): Pp. 465-481. Consulta 04/10/2024.
- Peng, W. y A. Pivato. (2019) Gestión sostenible del digestato de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y residuos alimentarios bajo los conceptos de alternativas de regreso a la tierra y economía circular. Valorización de la biomasa de residuos. 10(2): Pp. 465-481.
- Piccoli, I., et al. (2020) Análisis de imágenes automatizadas e imágenes hiperespectrales con microscopía de campo oscuro mejorada aplicada a biocarbón producido a diferentes temperaturas. *Gestión de Residuos*. 105: Pp. 457-466. Consulta 04/10/2024
- Piccoli, I., et al. (2020) Análisis de imágenes automatizadas e imágenes hiperespectrales con microscopía de campo oscuro mejorada aplicada a biocarbón producido a diferentes temperaturas. *Gestión de Residuos*. 105: Pp. 457-466. Consulta 02/11/2024.
- Pituello, C., Francioso, O., Simonetti, G., Pisi, A., Torreggiani, A., Berti, A., y Morari, F. (2015) Caracterización de las propiedades químico-físicas, estructurales y morfológicas de biocarbones procedentes de biorresiduos producidos a diferentes temperaturas: *Revista de suelos y sedimentos*. Pp. 15, 792-804. Consulta 05/11/2024.
- PROBIOMASA. (2021) Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa. Consulta 04/10/2024
- Rathnayake, D., Schmidt, H., Leifeld, J., Mayer, J., Epper, C., Bucheli, T., y Hagemann, N. (2023) Biocarbón a partir de estiércol animal: Una evaluación crítica de la viabilidad técnica, la viabilidad económica e impacto ecológico: *Bioenergía*. Pp. 15(9), 1078-1104. Consulta 05/11/2024.
- Read. (2009). Consulta 04/10/2024.
- Resolución 19/2019 Nación: Norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica. Consulta 04/10/2024
- Rodríguez, M. J. (2022) Evaluación de la calidad de suelos mediante indicadores e índices en la región de Villa María, Córdoba. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina. Consulta 10/12/2024.
- Rodríguez, M. J., Conci, E., Becker, A., Grumelli, M., Ledesma, M. M., Rangone, A., y Bouza, P. (2021) Riesgo Ambiental en la Planicie Fluvio-Eólica de la Región Centro del Departamento General San Martín, Córdoba, Argentina. En *Avances en Geomorfología y Estudios del Cuaternario en Argentina*. Pp. 244-284. Consulta 14/05/2024
- Ronga, D., et al. (2020) Uso de digestato y biocarbón como fertilizantes para mejorar la sostenibilidad de la producción de tomate procesado. *Agronomía*. 10(1): Pp. 138. Consulta 30/04/2024.
- Samoraj, M., et al. (2022) Retos y perspectivas de la digestión anaerobia de residuos animales y la aplicación de fertilizantes al digestato. *Quimiosfera*: Pp. 295, 133799. Consulta 04/10/2024.

- Schmidt, H., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., y Leifeld, J. (2016) Certificado europeo de biocarbón: Directrices para una producción sostenible de biocarbón. Consulta 05/11/2024.
- Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., ... & Nannipieri, P. (2011). Persistencia de la materia orgánica del suelo como una propiedad del ecosistema. *Nature*, 478(7367), 49. Consulta 13/10/2025
- SGAYDS. (2019) Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo Sustentable: Norma técnica para la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica. Consulta 04/10/2024.
- Singh, A., et al. (2020) Microbiología y biotecnología ambiental: Volumen 1: Biovalorización de residuos sólidos y tratamiento de aguas residuales. Consulta 06/06/2024
- Smebye, A., Alling, V., Vogt, R., Gadmar, T., Mulder, J., Cornelissen, G., y Hale, S. (2016) La enmienda del suelo con biocarbón modifica el contenido y la composición de la materia orgánica disuelta: *Quimiosfera*. Pp. 142, 100-105. Consulta 11/03/2025.
- SSSA. (2002) Sociedad Americana de Ciencias del Suelo. Consulta 04/10/2024.
- Stiles, W., et al. (2018) Uso de microalgas en la economía circular para valorizar el digestato anaeróbico: retos y oportunidades. *Tecnología de biorrecursos*: Pp. 267, 732-742. Consulta 04/10/2024.
- Stockdale et al. (2001) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Tabla 1. FAO. (2011) Manual de biogás. Consulta 04/10/2024.
- Tambone, F., et al. (2017) Fraccionamiento sólido y líquido de digestato: Balance de masa, caracterización química y valor agronómico y ambiental: *Tecnología de Biorrecursos*. Pp. 243, 1251-1256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech> Consulta 04/10/2024.
- Tambone, F., Genevini, P., D'imporzano, G., y Adani, F. (2009) Evaluación de las propiedades de enmienda del digestato mediante el estudio de la composición de la materia orgánica y el grado de estabilidad biológica durante la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los RSU: *Tecnología de biorrecursos*. Pp. 100(12), 3140-3142. Consulta 04/10/2024.
- Tang, C., Liu, B., Cheng, K., Antonietti, M., y Yang, F. (2023) Moderación de la dinámica del carbono en suelos mediante la aplicación combinada de biocarbón y una sustancia húmeda artificial: *Degradación del suelo Desarrollo*. Pp. 34(5), 1352-1362. Consulta 11/03/2025.
- Teglia, C., Tremier, A., y Martel, J. (2011) Caracterización de los digestatos sólidos: parte 1, revisión de los indicadores existentes para evaluar el uso agrícola de los digestatos sólidos: *Valorización de residuos y biomasa*. Pp. 2, 43- 58. Consulta 04/10/2024.
- Thaer. (1752-1828) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*: 3era edición. Consulta 18/11/2024.
- Tian, X., Li, C., Zhang, M., Wan, Y., Xie, Z., Chen, B., y Li, W. (2018) El biocarbón derivado de la paja de maíz afectó la disponibilidad y distribución de los nutrientes del suelo y el rendimiento del algodón. Pp. 13(1). Consulta 11/03/2025.
- Uchimiya, M., y Hiradate, S. (2014) Cambios en la especiación del fósforo disuelto en función de la temperatura de pirólisis. especiación de fósforo de biocarbones vegetales y de estiércol. *Especiación de fósforo de biocarbón vegetal y de estiércol: Revista de química alimentaria agrícola*. Pp. 62 (8), 1802-1809. Consulta 11/03/2025.
- US. EPA. (2011). Manual de factores de exposición. Edición (final). Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. CORRIENTE CONTINUA: Washington EPA/600/R-09/052F. Consulta 02/11/2024.
- Van Poucke, R., Meers, E., y Tack, F. (2020) Comportamiento de lixiviación de Cd, Zn y nutrientes (K, P, S) de un suelo contaminado afectado por la enmienda con biocarbón: *Quimiosfera*. Pp. 245, 125561. Consulta 05/11/2024.
- Velo. (2009) Consulta 04/10/2024.
- Vijayaraghavan, K. (2021) La importancia de los ingredientes minerales en la producción de biocarbón, propiedades y aplicaciones. *Revisiones críticas en tecnología de ciencias ambientales*. Pp. 51(2), 113-139. Consulta 11/03/2025.

- Wang, W. y D.J. LEE. (2021) Valorización del digestato de digestión anaeróbica: una revisión prospectiva. *Tecnología Bioambiental*. 323: Pp. 124626. Consulta 28/04/2024.
- Ward, A., et al. (2008) Optimización de la digestión anaeróbica de recursos agrícolas. *Tecnología de biorecursos*: Pp. 99 (17), 7928-7940. Consulta 04/10/2024.
- Wei, C., Liu, L., Yi, W., Yu, R., Xu, Y., y Zeng, S. (2024) Características de la liberación de nutrientes y liberación de metales pesados del biocarbón de lodos de depuradora producido por pirólisis a escala industrial en el medio acuático y su potencial como fertilizante de liberación lenta y adsorbente y su potencial como fertilizante de liberación lenta y adsorbente: *Revista de Gestión Medioambiental*. Pp. 366, 121871. Consulta 11/03/2025.
- Winsley, P. (2007) Producción de biocarbón y bioenergía para mitigar el cambio climático. *Revista científica neozelandesa* 64 (5): 5. Consulta 04/06/2024.
- Xiang, L., Liu, S., Ye, S., Yang, H., Song, B., Qin, F., y Tan, X. (2021) Peligros potenciales del biocarbón: Los impactos ambientales negativos de las aplicaciones del biocarbón: *Revista de materiales peligrosos*. Pp. 420, 126611. Consulta 11/03/2025.
- Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L., Schnoor, J., y Tecnología. (2018) Comprensión de estructuras múltiples y estructuras multinivel de biocarbones y sus potenciales aplicaciones ambientales: una revisión crítica: *Ciencia medioambiental*. Pp. 52(9), 5027-5047. Consulta 05/11/2024.
- Yousuf, S., N. Naqash, y R. Singh. (2022) Ciclo de nutrientes: un enfoque para la sostenibilidad ambiental. *Microbiología ambiental: aplicaciones multidisciplinarias de investigación avanzada*: Pp. 77. Consulta 29/04/2024
- Zhang, C., et al. (2013) Codigestión anaeróbica de residuos alimentarios y estiércol bovino: *Tecnología de los biorrecursos*. Pp. 129, 170-176. Consulta 04/10/2024.
- Zhao et al. (2013); Cao, X., Mašek, O., y Zimmerman, A. (2013) Heterogeneidad de las propiedades del biocarbón en función de las fuentes de materias primas y las temperaturas de producción: *Revista de materiales peligrosos*. Pp. 256, 1-9. Consulta 05/11/2024.
- Zhao, P., Wang, S., Liu, D., Li, H., Han, S., y Li, M. (2022) Estudio del mecanismo de influencia del Biocarbón en la conversión de nitrógeno del suelo. *Biodisponibilidad de contaminantes ambientales*. Pp. 34(1), 419-432. Consulta 11/03/2025.



Figura 18. Análisis de Sólidos Totales. Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. pH-metro electrónico HANNA HI 8424



Figura 20. Balanza analítica.



Figura 21. Espectrofotómetro APERA EC910.



Figura 22. Estufa tubular (T- 150, INDEF).

62 plantas registran un total 2.000.000 Tn de S/Año

SUSTRATO — **(2.000.000 Tn/Año)** — 100%
 BIOGAS — 15% — **(300.000 Tn/Año)**

DIGESTATO (FL; FS) — 70% — **(1.400.000 Tn/Año)**
 Total de DIGESTATO disponible (1.400.000 Tn/Año)

Fracción Solida (FS) representa el 15% de este total.

210.000 Tn/Año de Digestato (FS)

Trabajamos con la FS del DIGESTATO

Figura 23. Estimaciones sobre la producción de biogás y disponibilidad de digestato (INTI, 2019).

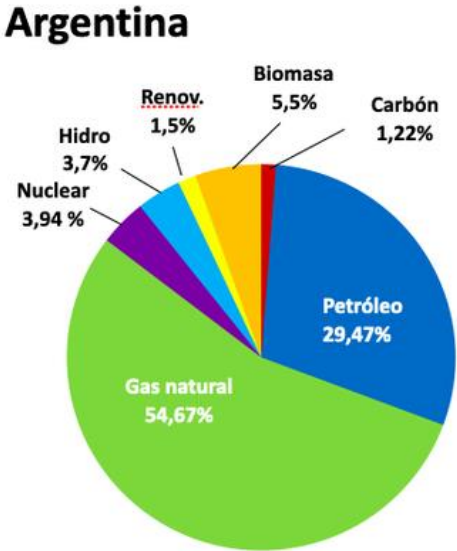


Figura 24. Composición de la matriz energética nacional, año 2024 (CAMMESA, 2025)

Energías Renovables Generada 2011 - 2025 (Hidro ≤ 50 MW)															
FUENTE DE ENERGÍA	AÑO 2011	AÑO 2012	AÑO 2013	AÑO 2014	AÑO 2015	AÑO 2016	AÑO 2017	AÑO 2018	AÑO 2019	AÑO 2020	AÑO 2021	AÑO 2022	AÑO 2023	AÑO 2024	AÑO 2025
BIODIESEL	32	170	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BIOMASA	98	127	134	114	155	193	243	241	299	421	750	769	732	747	759
EOLICO	16	348	447	613	593	547	616	1444	4996	9411	12938	14164	14475	16165	13532
HIDRO <= 50MW	1255	1453	1274	1457	1624	1820	1696	1431	1462	1257	1175	1060	1183	1512	984
SOLAR	2	8	15	16	15	14	16	109	800	1344	2196	2928	3259	3941	3375
BIOGAS	0	36	108	103	84	58	64	147	256	304	378	418	436	512	389
Total GWh	1403	2142	1981	2304	2470	2633	2635	3372	7812	12737	17437	19340	20086	22877	19040
Total MATER GWh							17	258	1536	3102	3870	3453	4452	7443	7464

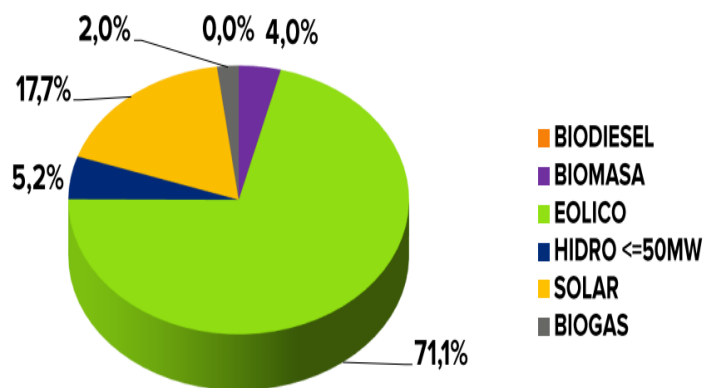


Figura 25. Generación de energía eléctrica a partir de la producción de biogás, año 2024

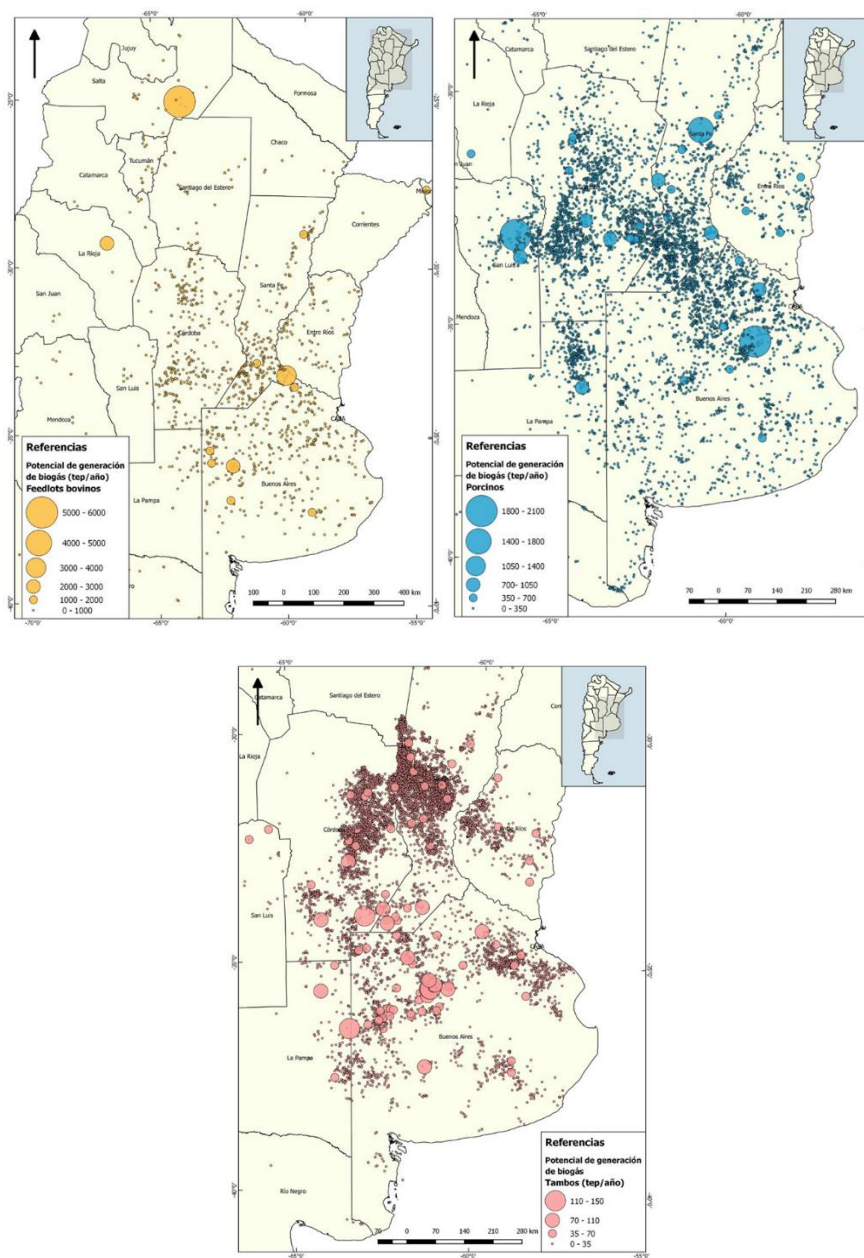


Figura 26. Distribución de biomasa húmeda en la Argentina, según potencial de generación de biogás (FAO, 2019).

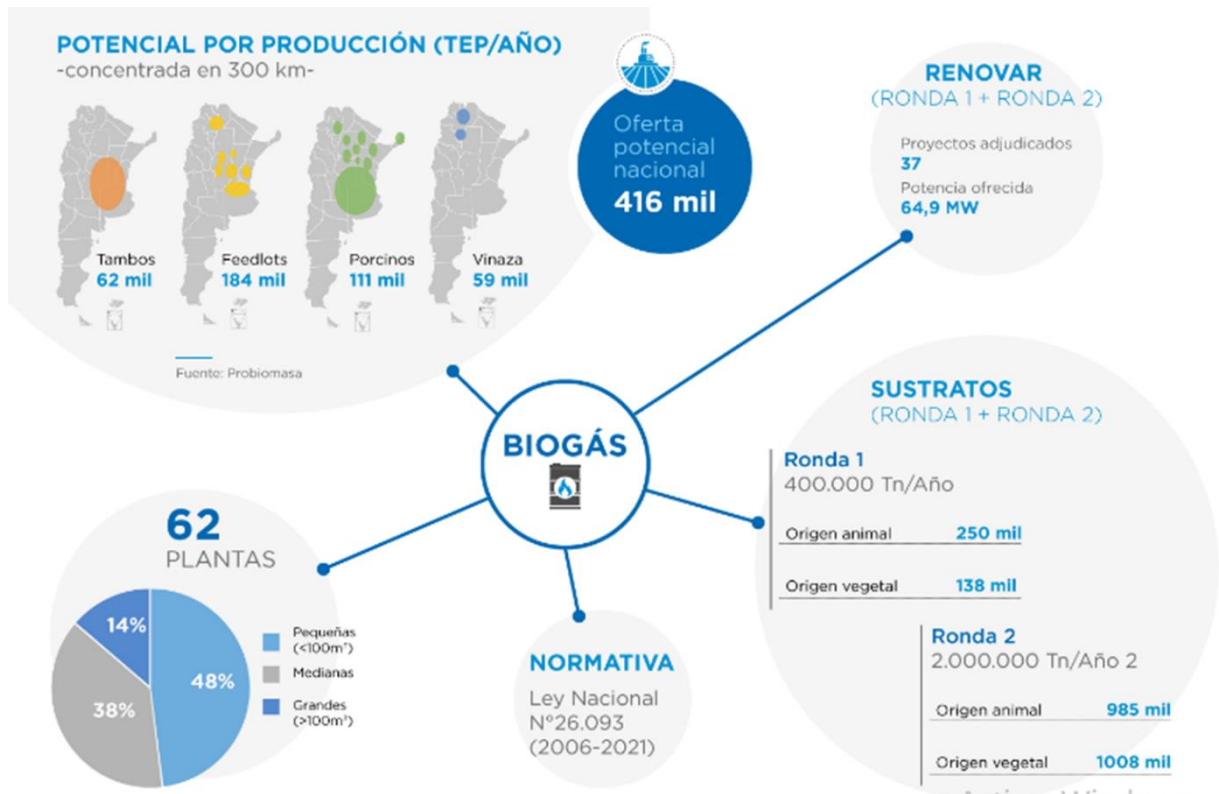


Figura 27. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico.