

***Estudio de digestatos y biocarbones:  
aplicación en un suelo  
Representativo de la planicie  
fluvioeólica central cordobesa,  
Año 2024-2025***

**Autores/as:** Martínez, Daiana Soledad; Galván, María José; Rodríguez, María Jimena

## 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 presentar una estrategia integral de revalorización de los productos y subproductos provenientes de procesos de biorrefinerías anaerobias, aplicando nuevas tecnologías alternativas como la pirólisis, donde se transforma el digestato en un residuo sólido poroso rico en carbono, conocido como biocarbón. El Biocarbon 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 manifiesta un papel distintivo en el secuestro de carbono, mejora la calidad del suelo, la sostenibilidad agrícola y a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por lo que contribuye a mitigar el 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 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 demostraron que la aplicación de biocarbón, tiene un impacto positivo en varias propiedades del suelo. 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, sustentabilidad, prácticas agrícolas.

## Abstract

The process of anaerobic digestion transforms organic materials into biogas and a nutrient-rich residue known as digestate that can be used as fertilizer. However, direct or excess application without regulation of the digestate dosage (treatment and quantity) on the soil can present microbiological problems, imbalances in soil chemistry due to the release of excess nutrients, delayed germination and reduced crop growth, presence of pathogens and high phytotoxicity, affecting the overall health of the soil.

Digestate is a residue obtained from the bioenergy industry in the production of biogas, it has a

high organic load and can be reused as organic fertilizer, for these benefits it is necessary to present a comprehensive strategy for the revaluation of products and by-products from anaerobic biorefinery processes, applying new alternative technologies such as pyrolysis, where the digestate is transformed into a porous solid residue rich in carbon, known as biochar. Biochar has excellent properties for water retention and gradual release of nutrients. It is used as a soil amendment, its use presents interesting characteristics in terms of carbon footprint, as it manifests a distinctive role in carbon sequestration, improves soil quality, agricultural sustainability and reduces CO<sub>2</sub> emissions, thus contributing to mitigate climate change.

The general objective is to evaluate the characteristics of digestates and biochars from anaerobic biorefineries and their application in a representative soil of the central fluvioeolic plain of Córdoba. The carbonization of the solid fraction and the characterization of three different types of biochar with a mixture of different types of raw materials were carried out. The experimental design used for direct application in different concentrations and combinations to a typical soil of the region was determined and described. Finally, its direct application in soil, its physical-chemical effects on soil properties such as pH, electrical conductivity, organic matter, degree of humification, microbial respiration and its microbiological activity after treatment were analyzed. The results obtained showed that the application of biochar has a positive impact on several soil properties. The addition of biochar, especially in combination with digestates, had an improving effect on soil quality, suggesting a beneficial potential for sustainable agricultural practices, its potential use as an organic fertilizer and climate change mitigation tool.

**Keywords:** Anaerobic, biorefineries, Pyrolysis, biochar, sustainability, agricultural practices.

## 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. 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). 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). 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.

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). En 2016, la producción mundial de biogás fue de aproximadamente 60 mil millones de m<sup>3</sup>/año. Esto representa una generación aproximada de 550 mil millones de toneladas/año de digestato (Aso, 2020).

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 (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 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).

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. 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 la 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.

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. 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-Ttota *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 aprovechar 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.

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.

El término Biocarbon 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 (quemado) (Geoffrey, 2008). El biochar es un residuo rico 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 (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). El biocarbón tiene un papel distintivo en el secuestro de carbono. Puede secuestrar carbono a largo plazo, reduciendo así el CO<sub>2</sub> 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.

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 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).

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. Este trabajo 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 suelo.

Finalmente, 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 CO<sub>2</sub> atmosférico y mejorando las aplicaciones económicas y medioambientales centradas en la sostenibilidad (Martínez, 2024).

## **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.

## **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 post-tratamiento. La toma de muestras para realizar el estudio de suelo se realizó con anterioridad por lo que se cuenta con una base de datos como antecedentes.

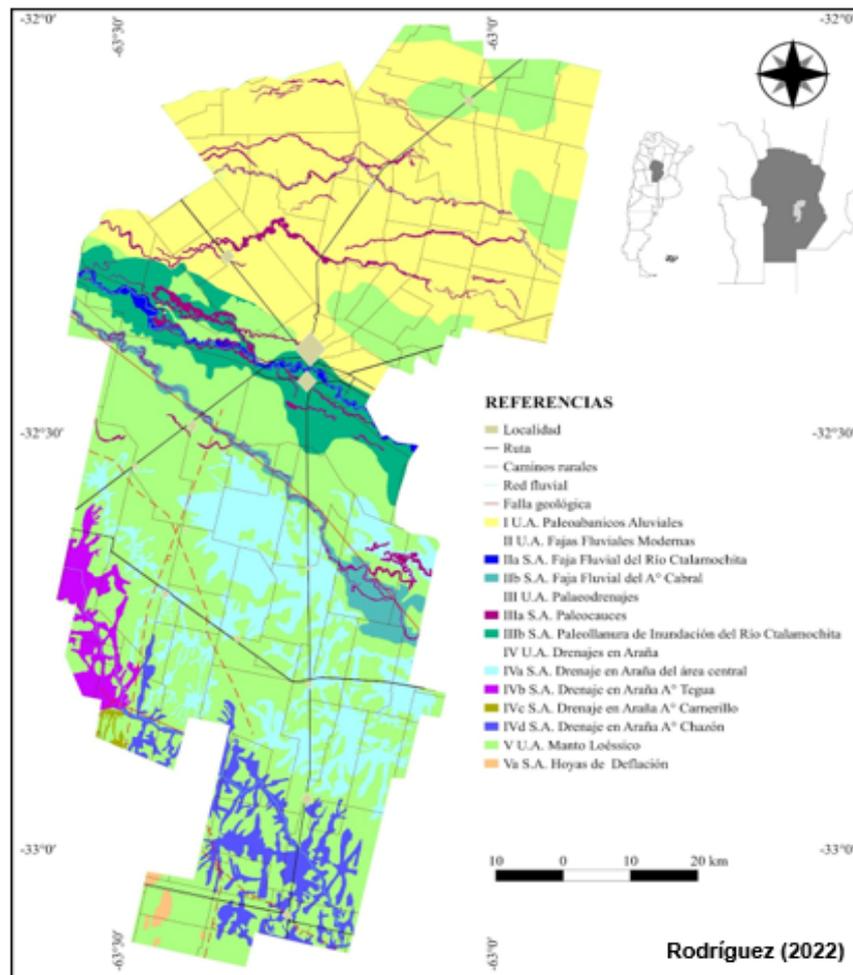
Estos resultados proporcionaron una comprensión más completa de las características de los subproductos obtenidos mediante carbonización y su viabilidad en la incorporación de prácticas agronómicas.

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, localizado en el Campo experimental de la Universidad Nacional de Villa María (Figura 1), Córdoba, Argentina (32°22 '50.2 "S 63°15' 38.9 "O). Rodríguez (2022) expresa que el suelo 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 2).



**Figura 1.** Mapa de identificación de zona de muestreo de suelo. Fuente: Elaboración propia. Google Earth, 2025.



**Figura 2.** Ubicación del área de estudio y suelo representativo. Fuente: Rodríguez., 2022.

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, específicamente, Enreco (EN) se ubica en la Estancia el Triunvirato, en la zona rural de Guatimozin, provincia de Córdoba, Beisa Yanquetruz (BE) se encuentra en la zona rural de

Juan Llerena, provincia de San Luis, y 3C biogás se localiza (3C) en la zona rural de Alcira Gigena, provincia de Córdoba.

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 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 y col. (Piccoli, I. *et al.*, 2020), (US. EPA, 2011).

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.

El diseño experimental para la aplicación directa de digestato/biocarbón en el suelo se adaptó a la metodología utilizada por (Muscuolo *et al.*, 2017; Cardelli *et al.*, 2018; Manasa *et al.*, 2020). Las muestras del suelo caracterizado por Rodriguez (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 3.



**Figura 3.** 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 4 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>Controlar</p> 
<p>Digestato FS (D)</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>Biocarbón (B)</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 5% p/p digestato/ 1% p/p biocarbón/suelo</p>

**Figura 4.** 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%).

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.

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.

## Resultados y aproximaciones finales

En la Figura 5 se puede observar la fracción sólida del digestato sin tratamiento y digestato post tratamiento de carbonización para obtener Biocarbones.

Las FS mostraron un rango de pH entre 7,2 y 8,6, característico de los digestatos con un pH alcalino. 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). Estas propiedades sugirieron que los biocarbones podrían ser particularmente útiles como enmiendas en suelos ácidos que requieren neutralización (Huang et al., 2023).

El contenido de carbono en los tres biocarbones alcanzó aproximadamente el 51%, lo que representa un aumento del 20% en comparación con el material de partida. Este proceso redujo la masa original y enriqueció la concentración de carbono en el biocarbón resultante (Rathnayake *et al.*, 2023). Los valores de carbono total 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 (NT) de aproximadamente un 10-15% en el B350 en comparación con la FS, debido principalmente a la volatilización del nitrógeno durante el proceso térmico (Tian *et al.*, 2018). Se encontraron valores de NT similares en B350 -1 y B350 -2 de 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, debido al mayor contenido de compuestos nitrogenados en el material de alimentación (Casini *et al.*, 2021; Gusiati *et al.*, 2016).

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.

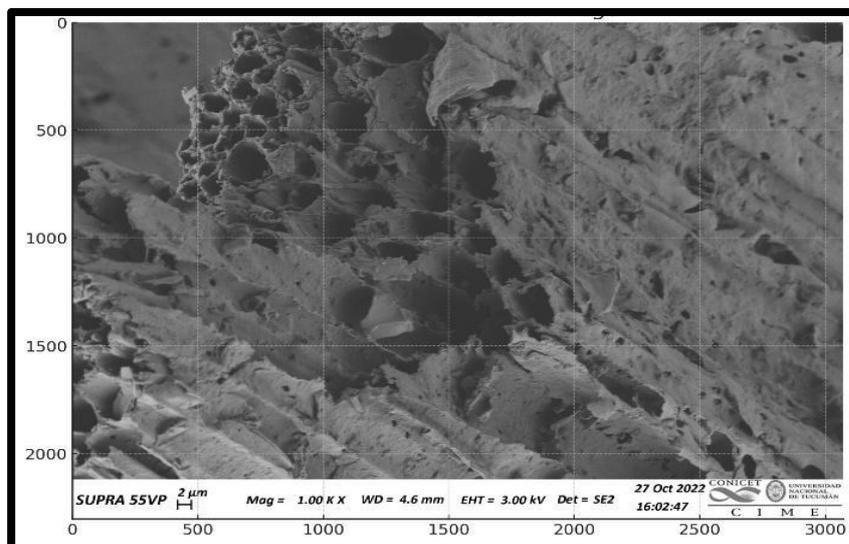


**Figura 5.** Digestatos y Biocarbones. Fuente: Elaboración propia.

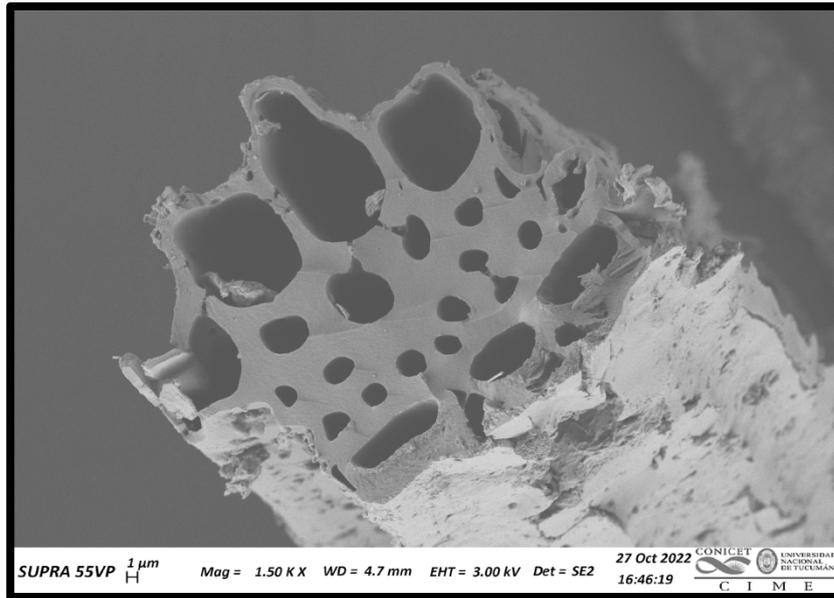
En la siguiente Figura 6 se muestran las estructuras de las fracciones sólidas y las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C.

B350 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). 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; Fernandes *et al.*, 2021).

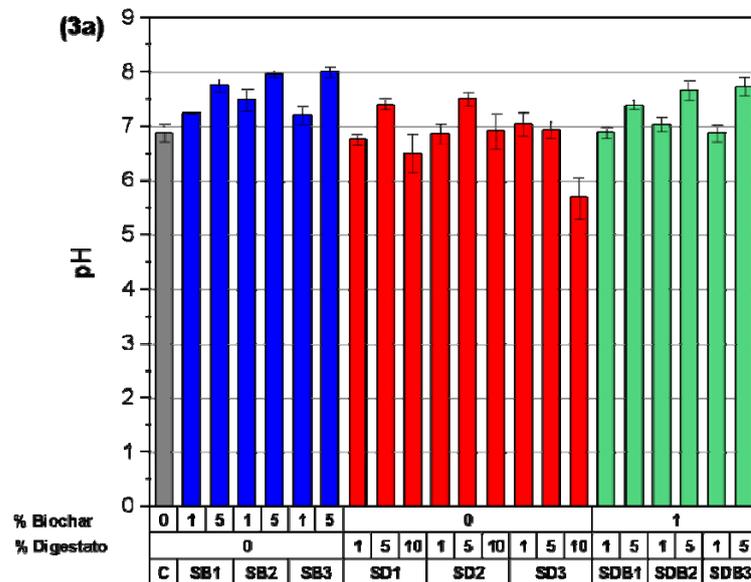


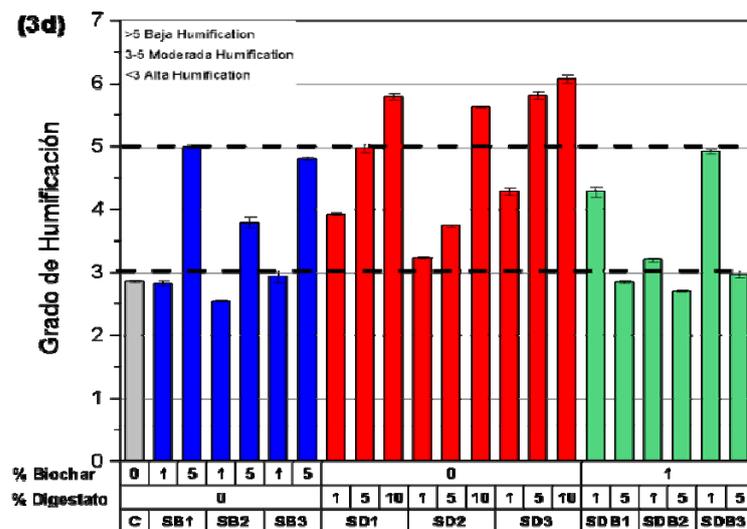
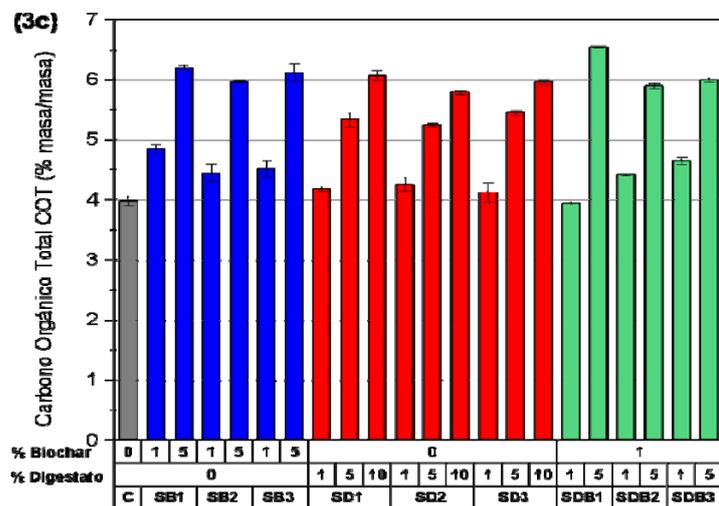
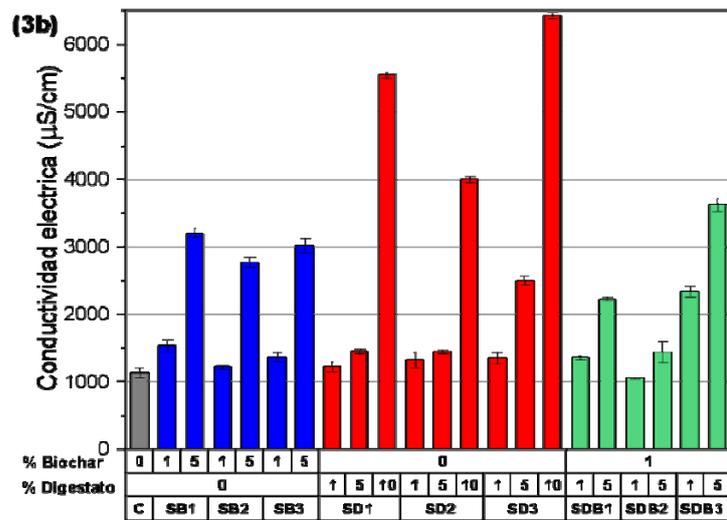
**Figura 6.** B350: Estructuras de las fracciones sólidas y las microestructuras de los tres biocarbones obtenidos a una temperatura de carbonización de 350°C. Fuente: Galván *et al.* 2024.

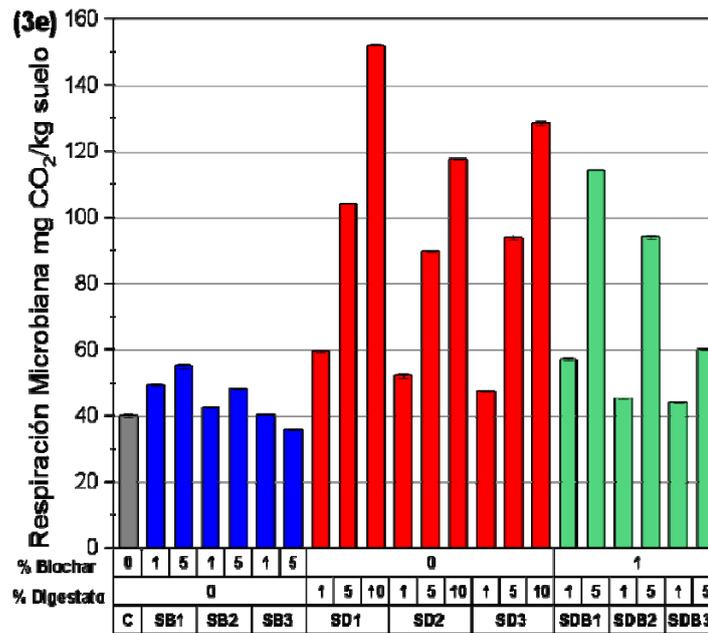


**Figura 7.** Microestructuras de Biochar 350°C 2 μm, 1 μm.

Las figuras 8 muestra el pH (3a), la conductividad eléctrica (CE) (3b), el carbono orgánico total (COT) (3c), el grado de humificación (3d) y la respiración microbiana (RM) (3e), de los diferentes tratamientos aplicados en suelo tras 100 días de incubación.







**Figuras 8.** Gráficos (3a) pH; (3b) conductividad eléctrica; (3c) carbono orgánico total; (3d) grado de humificación; (3e) respiración microbiana.

El gráfico 3a 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. Sin embargo, al aumentar la concentración al 5%, se observó un ligero aumento del pH. Por otro lado, los tratamientos con digestato mantuvieron el pH dentro de un rango más neutro, excepto SD3 al 10%, que mostró una disminución significativa del pH. Los tratamientos combinados de biocarbón y digestato también mantuvieron un pH cercano a la neutralidad.

En el gráfico 3b, podemos observar cómo varían los valores de conductividad eléctrica del suelo en función de los diferentes tratamientos aplicados. 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). 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  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

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.

El aumento del carbono orgánico total (COT % p/p), representado en el gráfico 3c 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 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).

En el gráfico 3d 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). 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, Lal, y Zimmerman, 2014; Tang *et al.*, 2023).

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.

Se observó un aumento significativo de la respiración microbiana, gráfico 3e, en los tratamientos que incluían SD1, SD2 y SD3 con concentraciones de digestato del 5% y 10%. Este aumento estuvo 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, aumentando la liberación de CO<sub>2</sub>.

En los tratamientos SDB1, SDB2 y SDB3, en los que se combinó un 5% de digestato con un 1% de biocarbón, se observó una 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 CO<sub>2</sub> en estos tratamientos sugirió que la actividad microbiana se mantuvo estable en el tiempo y que la degradación de la materia orgánica fue progresiva. El suelo control mantuvo interacciones mínimas, indicando que sus características no cambiaron durante los 100 días de ensayo.

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.

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 CO<sub>2</sub>.

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.

### **Primeras conclusiones**

Los resultados obtenidos en esta investigación, 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 positivo sobre la calidad del suelo, lo que sugiere un potencial beneficioso para las prácticas agrícolas sostenibles.

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.

Se requieren estudios detallados y ensayos de campo para evaluar adecuadamente los beneficios del biocarbón en contextos específicos. Se identificaron las mejores mezclas para mejorar la fertilidad del suelo y minimizar el impacto ambiental.

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 carbones.

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 por que forma parte de soluciones con perspectiva climática, salud geo ambiental y sustentabilidad en las prácticas agrícolas.

### **Consideraciones finales y perspectivas**

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.

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/biocarbones 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.

Como perspectiva a futuro se propone medir la des carbonización de las emisiones de gases efecto invernadero en un suelo con el 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 logró 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.

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. Como estrategia de revalorización se propone la producción de biocarbones, que consiste en la pirólisis, carbonización de la FS del digestato. La aplicación de estos productos obtenidos sobre un suelo de uso agronómico típico de la región, en los ensayos nos permitieron observar cómo era el comportamiento del suelo desde el punto de vista geológico, cuando recibía este producto como fertilizante orgánico. Estas observaciones y resultados ya comentados anteriormente, permitieron enfatizar en el potencial que tiene el biocarbón como herramienta para la mitigación del cambio climático, el papel 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.

Esta investigación 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 relevante 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.

## Bibliografía

- A 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- DAR, R., et al. 2021. Biometanización de residuos agrícolas: Potencial, limitaciones y posibles soluciones. *Revisión de energías renovables y sostenibles*. 135: Pp. 110, 217. Consulta 28/04/2024.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- MORTOLA, N., et al. 2022. Uso de digeridos derivados de la producción de biogás como biofertilizante y enmienda del suelo. Consulta 04/10/2024.
- MUSCOLO, A., SETTINERI, G., PAPALIA, T., ATTINÀ, E., BASILE, C., y PANUCCIO, M. R. 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.
- 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.
- 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.
- 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
- RODRIGUEZ, 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.
- RODRIGUEZ, 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.
- SINGH, A., et al. 2020. Microbiología y biotecnología ambiental: Volumen 1: Biovalorización de residuos sólidos y tratamiento de aguas residuales. Consulta 06/06/2024
- 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.
- 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.
- TEGLIA, C., TREMIER, A., y MARTEL, J. L. 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.
- 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.
- YOUSUF, S., N. NAQASH, y R. SINGH. 2022. Ciclo de nutrientes: un enfoque para la sostenibilidad ambiental. *Microbiología ambiental: aplicaciones multidisciplinares de investigación avanzada*: Pp. 77. Consulta 29/04/2024b