

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**IMPACTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS CON ADICIÓN DE BIOCARBÓN
SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO, LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO Y HUELLA DE CARBONO EN SUELOS CONTRASTANTES**

POR

FERNANDA ANAÍS REYES BAEZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2026**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**IMPACTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS CON ADICIÓN DE BIOCARBÓN
SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO, LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO Y HUELLA DE CARBONO EN SUELOS CONTRASTANTES**

POR

FERNANDA ANAÍS REYES BAEZA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2026**

Aprobada por:

Profesor Asociado Cristina Muñoz V.
Ing. Agrónoma, Dr.

Guía

Profesor Titular, Erick Zagal
Ing. Agrónomo, Mg. Sc., Dr.

Asesor

Profesor Externo, Patricio Neumann.
Ing. Ambiental, Dr. Cs. Ambientales
Universidad del Bío-Bío

Asesor

Profesor Asociado, Manuel Faúndez
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	2
Introducción	2
Hipótesis.....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Propuesta metodológica.....	5
Análisis crítico del proyecto de investigación.....	15
Cronograma.....	19
Referencias.....	20

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Diseño experimental.....	9
Figura 2 Límites del sistema a analizar.....	14
Tabla 1 Resumen descriptivo de los tratamientos.....	8
Tabla 2 Descripción de escenarios para ACV.....	13

IMPACTO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS CON ADICIÓN DE BIOCARBÓN SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO, LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y HUELLA DE CARBONO EN SUELOS CONTRASTANTES

IMPACT OF ORGANIC AMENDMENTS WITH BIOCHAR ADDITION ON SOIL QUALITY, GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CARBON FOOTPRINT IN CONTRASTING SOILS

Palabras índices adicionales: Lombrices de tierra, vermicompost, bokashi, secuestro de carbono, análisis de ciclo de vida.

RESUMEN

La agricultura intensiva ha convertido los suelos en una fuente de gases de efecto invernadero (GEI). En este contexto, la generación de biocarbón a partir de residuos agrícolas ha surgido como una estrategia sostenible para secuestrar carbono (C) y recuperar suelos degradados. Estudios recientes indican que, al combinarlo con enmiendas orgánicas, se potencian sus beneficios para la fertilidad y la productividad del suelo, ofreciendo una alternativa sostenible de reemplazo de los fertilizantes sintéticos, potenciando sistemas productivos basados en economía circular. Sin embargo, es necesario evaluar su impacto ambiental para considerar su implementación a gran escala.

Este proyecto de investigación propone evaluar el impacto del biocarbón sobre enmiendas orgánicas procedentes de diferentes procesos de estabilización biológica (vermicompost y bokashi) y lombrices anécicas en suelos contrastantes. Se evaluarán cambios en la nutrición de los suelos, actividad biológica y emisiones de GEI. La información generada permitirá determinar los niveles de almacenamiento de carbono (C) y realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) para determinar la huella de C asociada a cada enmienda. Este proyecto permitirá generar conocimiento para la implementación de estas prácticas a escala real y sentar bases para investigaciones en agricultura climáticamente inteligente.

SUMMARY

Intensive agriculture has turned soil into a source of greenhouse gases (GHG). In this context, the generation of biochar from agricultural waste has emerged as a sustainable strategy to sequester carbon (C) and recover degraded soils. Recent studies indicate that when combined with organic amendments, its benefits for soil fertility and productivity are enhanced, offering a sustainable alternative to replace synthetic fertilizers and promoting productive systems based on a circular economy. However, it is necessary to evaluate its environmental impact to consider its implementation on a large scale. This research project proposes to evaluate the impact of biochar on organic amendments from different stabilization biological processes (vermicompost and bokashi) and anecic earthworms in contrasting soils. Changes in soil nutrition, biological activity, and GHG emissions will be assessed. The information generated will allow for the determination of carbon (C) storage levels and a Life Cycle Assessment (LCA) to determine the C footprint associated with each amendment. This project will generate knowledge to enable the implementation of these practices at a real scale and lay the groundwork for research in climate-smart agriculture.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la consecuencia de más de un siglo de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), tales como dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄) (IPCC, 2023; Liu *et al.*, 2019). En Chile, el 39,8% de las emisiones de GEI, desde el sector agrícola, provienen de los suelos (MMA, 2023), los cuales se han convertido en una importante fuente de estos gases debido a la intensificación agrícola. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo regulan procesos clave como los ciclos de C y nitrógeno (N), que son fundamentales en la regulación del clima (Palm *et al.*, 2014), lo que posiciona al suelo como actor central en la mitigación del cambio climático.

La mitigación del calentamiento global no solo implica reducir las emisiones, sino también la eliminación del CO₂ de la atmósfera a través del secuestro de C (Lehmann *et al.*, 2021). En este contexto, la conversión de biomasa en biocarbón

mediante pirólisis, y su posterior aplicación a suelos agrícolas ha surgido como una estrategia efectiva para la mitigación (Lehmann y Joseph, 2009; Kurniawan *et al.*, 2023), debido a que aumenta la capacidad de los suelos para actuar como sumidero de GEI y reservorio de carbono orgánico del suelo (COS) (Pan *et al.*, 2021; Fungo *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2023a; Fu *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024). También se han reportado incrementos en la retención de humedad de los suelos y la disponibilidad de nutrientes, lo que contribuye a una mayor productividad agrícola (Thies y Rilling, 2015; Muñoz *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2022).

Esta práctica ofrece una alternativa sostenible a los fertilizantes sintéticos, siendo también un método sencillo y económicamente circular para agroecosistemas (Rajalakshmi, 2020; Lavagi *et al.*, 2024). En Chile, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) ha reconocido al biocarbón como una solución basada en la naturaleza (SBN), dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030. Aun así, dicho informe advierte que su categorización como SBN presenta incertidumbres, debido a la falta de información sobre su huella ambiental (Marquet *et al.*, 2021).

Metodologías como el ACV permite evaluar de forma integral el impacto ambiental del uso del biocarbón, cuantificando la huella de C en términos de emisiones de GEI expresadas en kgCO₂ equivalente (Wang *et al.*, 2014; Rodríguez-Machín *et al.*, 2021). En este sentido, Muñoz *et al.* (2017) y Matušík *et al.*, (2020) destacaron al biocarbón por su influencia en la categoría impacto de cambio climático, debido a sus efectos en la reducción de GEI y el secuestro de carbono como principal proceso beneficioso.

Actualmente, existe un creciente interés en potenciar el efecto nutricional del biocarbón sobre los suelos. Diversos estudios han demostrado que la integración de biocarbón durante el proceso de compostaje de enmiendas orgánicas, incluyendo compost (Mikajlo *et al.*, 2024), vermicompost (Antileo *et al.*, 2024) y bokashi (Muñoz *et al.*, 2023), así como su interacción con organismos edáficos como las lombrices de tierra, genera un efecto sinérgico que favorece el crecimiento vegetal y la fertilidad del suelo (Pagliaccia *et al.*, 2024). El mecanismo detrás de este efecto se asocia principalmente a los organismos del suelo, quienes desempeñan

un rol esencial, actuando como fuente de enzimas extracelulares que se retienen en la superficie del biocarbón, proceso denominado activación biológica del biocarbón (Sanchez-Hernandez *et al.*, 2019).

Entre los métodos para enriquecer los biocarbones, destacan las lombrices de tierra y los microorganismos, reportando diversos beneficios como la colonización microbiana en los poros del biocarbón (Ferreira *et al.*, 2021), el incremento de la actividad enzimática del suelo (Sanchez-Hernandez *et al.*, 2021), un mayor contenido de COS (Nobile *et al.*, 2022) y la reducción de emisiones de GEI (Wu *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2024). No obstante, también se han informado resultados contradictorios, incluyendo aumentos en las emisiones de GEI (Namoi *et al.*, 2021), disminución del COS y menor persistencia del biocarbón, que se atribuye a la fragmentación del material por acción de la fauna edáfica y su movilización a través del perfil del suelo, lo que facilita su degradación microbiana (Domene, 2016; Wang *et al.*, 2023b).

Estas discrepancias se deben a diversos factores que influyen en la respuesta del suelo frente a la aplicación conjunta del biocarbón y enmiendas orgánicas. La materia prima, temperatura y tipo de pirólisis influyen directamente en las propiedades fisicoquímicas del biocarbón (Ippolito *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023a) al igual que el tipo de enmienda orgánica utilizada para su activación. Estos factores, interactúan de manera distinta según el tipo de suelo, generando respuestas variables.

La aplicación conjunta de biocarbón con otras enmiendas se considera una estrategia clave para secuestrar C y mejorar la calidad del suelo contribuyendo a la mitigación del cambio climático y la valorización de residuos agrícolas (Torres-Morales *et al.*, 2023). Para promover su implementación en el sector agrícola de Chile, se requiere un análisis detallado del ciclo de vida y evaluaciones de la huella de C para estimar con precisión las ganancias ambientales (Mikajlo *et al.*, 2024). Sin embargo, se dispone de poca información sobre los efectos ambientales y agronómicos del biocarbón tras su activación biológica, especialmente considerando los factores que modulan la respuesta del ecosistema edáfico.

HIPÓTESIS

La aplicación de enmiendas orgánicas con adición de biocarbón mejora parámetros de calidad de los suelos, reduciendo las emisiones de GEI y favoreciendo el secuestro de C atmosférico, lo que se traduce en una menor huella de C en comparación con las enmiendas sin biocarbón.

OBJETIVOS

Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas con la adición de biocarbón sobre las propiedades del suelo, las emisiones de GEI y la huella de C en suelos contrastantes mediante un experimento de mesocosmos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) desde suelos tratados con distintas enmiendas.
- Determinar cambios en las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos sometidos a las diferentes enmiendas.
- Determinar la huella de carbono de cada enmienda orgánica mediante un ACV.

PROPUESTA METODOLÓGICA

Descripción de los suelos

El estudio se realizará con dos suelos muestreados en el centro sur de Chile, en la región de Ñuble: un Andisol de la serie Arrayán, ubicado en la comuna de Coihueco ($36^{\circ}38'06.6''\text{S}$ $71^{\circ}54'06.2''\text{W}$), formado a partir de cenizas volcánicas modernas con dominancia de la clase textural franco limosa, clasificado como Haploxerands Húmicos; y un Alfisol de la serie Cauquenes situado en la comuna de Quirihue ($36^{\circ}12'43.3''\text{S}$ $72^{\circ}29'49.5''\text{W}$) formado a partir de rocas graníticas de texturas arcillosas clasificado como Ultic Palexeralfs por Stolpe, (2006). Ambas zonas con clima templado cálido con lluvias invernales (Santibáñez, 2017).

Se considerará el historial de suelo de ambos sitios; en Quirihue el suelo de estudio se encuentra establecido con cultivo de avena, con presencia ocasional de

ovinos y en el caso del suelo Coihueco está establecida una pradera mixta conformada en su mayoría por *Taraxacum officinale* L. (diente de león), *Plantago lanceolata* L. (siete venas) y *Lolium perenne* L. (ballica), con pastoreo rotativo de bovinos y sin aplicación de fertilizantes inorgánicos.

Se tomarán muestras de cada suelo antes de la aplicación de los tratamientos, que serán enviadas a laboratorio de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Chillán, para su análisis químico, físico y biológico.

Producción de biocarbones

La producción se realizará en el Laboratorio de Materiales Carbonosos de la Universidad de Concepción, ubicado en Chillán, Región de Ñuble, Chile (36°35'45.2" S, 72°04'49.7" W). Para la obtención de los biocarbones se utilizará como materia prima residuos de poda de cerezo de campos agrícolas de la zona de Coihueco y cascarilla de arroz provenientes de la zona arrocería de San Carlos, ambos en la región de Ñuble. En el caso de la madera de cerezo, ésta se triturará hasta llegar a un tamaño de partícula < 1 cm. Ambos materiales se someterán a pirólisis rápida a 600°C por 90 minutos en un horno de mufla marca Nabertherm y se tamizarán a tamaño de partículas de 2 mm.

Se obtendrán dos tipos de biocarbón siendo catalogados como biocarbón de poda de cerezo (BRC) y biocarbón de cascarilla de arroz (BCA) los cuales se analizarán en laboratorio para determinar sus propiedades químicas y se caracterizarán físicamente mediante isoterma de adsorción de N₂, con enfoque en su estructura y un análisis de grupos funcionales a través de la técnica DTP-He/MS, que implica la descomposición térmica programada con helio acoplada a espectrofotometría de masas.

Preparación de enmiendas

La preparación de las enmiendas se llevará a cabo bajo dos enfoques planteados por Sanchez *et al.* (2019): i) Bioactivación del suelo *in situ*, que consiste en aplicar directamente al suelo las lombrices y el biocarbón y ii) Bioactivación *ex situ*, que consiste en compostar biomasa en presencia de biocarbón. En este caso, se

utilizarán dos tipos de compostaje: vermicompost (mediado por lombrices epigeas) y bokashi (mediado por microorganismos).

Para la bioactivación *in situ* (tratamiento denominado como L en referencia a la lombriz utilizada), se utilizará la especie anécica *Lumbricus terrestris* L. Se recolectarán 50 ejemplares adultos en el Campus Chillán de la Universidad de Concepción utilizando un método de extracción con extracto de cebolla (*Allium cepa* L.; Singh *et al.*, 2016), y se mantendrán en cámara aclimatada con los mismos suelos que se utilizarán posteriormente para activar el biocarbón.

Para la bioactivación con vermicompost (tratamiento identificado como V), los biocarbones se combinarán en una proporción del 5% (p/p) con un sustrato de bagazo de uva de la variedad País (*Vitis vinífera* L.) obtenida de viñedos en el Valle del Itata, en recipientes plásticos de 10 L perforados en la base para evitar la acumulación de lixiviados. Se añadirán lombrices de la especie epigea y detritívora *Eisenia fetida* S. (30 adultos kg⁻¹), obtenidas de vermicompostera del laboratorio, seleccionadas uniformemente entre poblaciones adultas y juveniles para asegurar su supervivencia y reproducción. Para garantizar su óptimo desarrollo, se mantendrán en cámara a temperatura constante de 22°C y una humedad relativa del 80% durante 90 días de incubación, con 2 repeticiones para cada biocarbón (Antileo *et al.*, 2024).

En el caso de la bioactivación con bokashi (tratamiento identificado como B), los biocarbones se combinarán al 5% (p/p) con estiércol de gallina para aportar nutrientes de rápida disponibilidad para los microorganismos, suelo para asegurar un buen contenido de microbioma, edulcorante comercial, para proporcionar energía que acelera el proceso de descomposición, afrechillo, yogurt para aportar bacterias ácido-lácticas y levaduras quienes serán las encargadas de iniciar el proceso. Se utilizará la metodología de preparación propuesta por INIA (Céspedes, 2019), que consistirá en mezclar todas los insumos descritos anteriormente, sobre un acolchado plástico de polipropileno. Se mantendrá una humedad aproximada del 60% y se registrará la temperatura diariamente para monitorear la fermentación. Dado que se trata de un proceso aeróbico, la mezcla se volteará 3 veces al día los

primeros 3 días, 2 veces al día los siguientes 3 días y 1 vez al día hasta obtener el producto estabilizado luego de 15 días.

Incubación de suelos con enmiendas

Las incubaciones de suelo se llevarán a cabo en el Laboratorio de Materiales Carbonosos y Agricultura de la Universidad de Concepción, Chillán, Chile; se realizarán bajo condiciones controladas, en completa oscuridad y temperatura constante de 20 ± 2 °C, en frascos de vidrio de 1 L con 700 g de suelo ajustado al 60% de la capacidad de agua disponible (WFPS), humedad que se mantendrá agregando agua semanalmente.

Las enmiendas de cada tratamiento se incorporarán a los suelos en una dosis de aplicación del 1,5% (p/p), según lo establecido por experimentos preliminares elaborados en el laboratorio. A excepción de la enmienda L, en la cual se aplicará el biocarbón a la misma dosis, pero además se introducirá una lombriz por frasco. Para cada una de las enmiendas (L, V y B) se considerará cuatro tratamientos: biocarbón de restos de cerezo (BRC), biocarbón de cascarilla de arroz (BCA), sin biocarbón (SBC) y un control absoluto (CT) (Tabla 1).

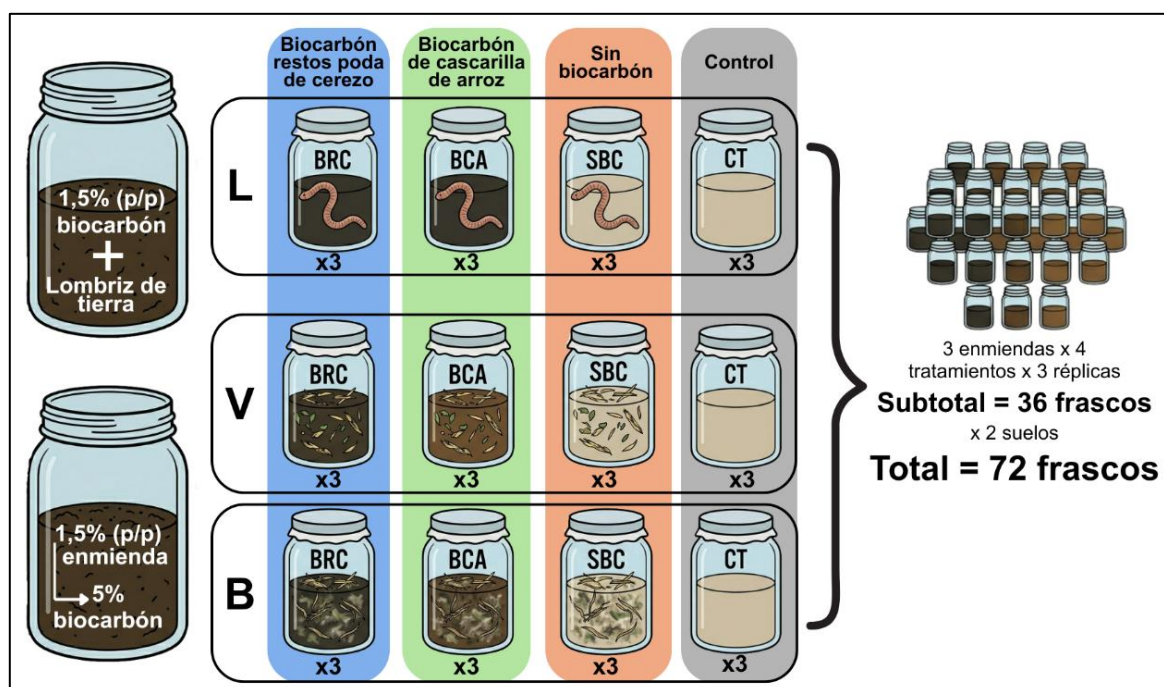
Tabla 1. Resumen descriptivo de los tratamientos.

Nomenclatura	Enmienda	Biocarbón	Activación
CT	Control	Ninguno	No aplica
L	Lombriz de tierra	Ninguno	<i>In situ</i>
L + BRC	Lombriz de tierra	Restos de poda de cerezo	<i>In situ</i>
L + BCA	Lombriz de tierra	Cascarilla de arroz	<i>In situ</i>
V	Vermicompost	Ninguno	<i>Ex situ</i>
V + BRC	Vermicompost	Restos de poda de cerezo	<i>Ex situ</i>
V + BCA	Vermicompost	Cascarilla de arroz	<i>Ex situ</i>
B	Bokashi	Ninguno	<i>Ex situ</i>
B + BRC	Bokashi	Restos de poda de cerezo	<i>Ex situ</i>
B + BCA	Bokashi	Cascarilla de arroz	<i>Ex situ</i>

El experimento se realizará en un diseño completamente al azar, y cada tratamiento se replicará tres veces, lo que suma un total de 36 frascos para cada suelo, es decir, 72 frascos en total (Figura 1).

Los frascos se cubrirán con Parafilm para evitar la pérdida de humedad y el escape de las lombrices en el caso de los frascos con la enmienda L. Sin embargo, se perforarán para generar las condiciones adecuadas de aireación (Aamer *et al.* 2020).

Figura 1. Diseño experimental.



Muestreo y análisis de emisiones de GEI

Los flujos de CO₂, CH₄ y N₂O del suelo se medirán a partir del día 1 y luego los días 3, 5, 7, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 después de la aplicación de los tratamientos. Se utilizarán solo al momento de la medición, tapas herméticas de metal equipadas con septas de goma para la extracción de gases. Las muestras de gas se recolectarán a los 15 minutos después del cierre de los frascos, utilizando jeringas de 60 mL equipadas con llave de paso. Las muestras se almacenarán al vacío mediante viales de 20 mL (Exetainer, Labco Ltd., Reino Unido) y se mantendrán bajo presión hasta

el análisis.

Las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O, se determinarán utilizando un cromatógrafo de gases (Perkin Elmer modelo Clarus 600, Akron, OH, EE. UU.), equipado con un detector de captura de electrones (ECD) y un detector de ionización de llama (FID) (Ginebra *et al.*, 2022).

A partir de las concentraciones obtenidas, los flujos de gases se calcularán mediante la siguiente ecuación (1):

$$F = \frac{(C_t - C_0) \times V \times M}{m \times V_m \times \Delta t} \quad (1)$$

Donde F es el flujo de gas (mg de gas kg⁻¹ suelo h⁻¹) C_t es la concentración del gas al tiempo t (ppm), C_0 es la concentración del gas al tiempo inicial (ppm), V es el volumen del espacio de cabeza del frasco (L), M es la masa molar del gas (mg mmol⁻¹), considerando 44,01 para CO₂, 16,04 para CH₄ y 44,01 para N₂O, m es la masa de suelo seco (kg), V_m es el volumen molar del gas a la temperatura de medición (L mmol⁻¹), y Δt es el tiempo de cierre del frasco (h)

El volumen del espacio de cabeza (V) se calculará como la diferencia entre el volumen total del frasco y el volumen ocupado por el suelo. Los frascos tienen una capacidad de 1 L, el volumen ocupado por el suelo (ecuación 2) se determinará a partir de la masa de suelo húmedo (700 g), su contenido de humedad (60% WFPS) y su densidad aparente, a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{suelo} = \frac{m_{suelo\ húmedo}}{\rho_a \times (1 + \theta)} \quad (2)$$

Donde ρ_a es la densidad aparente del suelo (g cm⁻³) y θ es el contenido de agua gravimétrico (g agua g⁻¹ suelo seco).

El volumen molar (V_m) se calculará mediante la Ley de los Gases Ideales (ecuación 3)

$$V_m = \frac{R \times T}{P} \quad (3)$$

Donde R es la constante universal de los gases (0,082057 L atm K⁻¹ mol⁻¹), T es la temperatura absoluta durante la medición (293,15 K, correspondiente a 20 ± 2

$^{\circ}\text{C}$) y P es la presión atmosférica estándar (1 atm).

El tiempo de cierre (Δt) corresponde a 15 minutos, equivalente a 0,25 horas.

Los flujos diarios se estimarán mediante interpolación lineal, entre mediciones consecutivas, siguiendo el modelo $y = \alpha x + \beta$, donde y es la emisión diaria estimada ($\text{mg de gas kg}^{-1} \text{ suelo día}^{-1}$), x los días, α la razón de cambio entre dos períodos consecutivos (ecuación 4) y β la intersección con el eje y (ecuación 5). Las emisiones acumuladas durante los 90 días de incubación se calcularán como la suma de los flujos diarios estimados para cada período (Muñoz *et al.*, 2019).

$$\alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

$$\beta = y_1 - \alpha x_1 \quad (5)$$

Parámetros químicos, físicos y biológicos

Se evaluará el efecto de los distintos tratamientos en la calidad del suelo comparando los análisis químicos y físicos que se realizarán antes de la aplicación de las enmiendas y al final del ensayo (a los 90 días).

En el análisis químico, tanto el pH como los macronutrientes se obtendrán de muestras compuestas de cada tratamiento, siguiendo los protocolos estándar de análisis de suelos (Sadzawka *et al.*, 2006). El contenido de C orgánico se determinará mediante combustión seca en un analizador elemental (Truspec CN, LECO, St. Joseph, MI, EE. UU.) (Muñoz *et al.*, 2019).

Para el análisis físico, se evaluará la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente para estimar la humedad aprovechable y se determinará la densidad aparente para el cálculo del almacenamiento de C, según la ecuación (6).

$$C_{\text{almacenado}} = \frac{\text{CO} \times \rho_a}{p \times a} \quad (6)$$

donde:

- CO = carbono orgánico (%)
- ρ_a = densidad aparente (g/cm^3)
- p = profundidad (cm)
- a = área (cm^2)

Para el análisis biológico, se evaluará la actividad enzimática antes y después de la aplicación de las enmiendas. Se seleccionarán enzimas vinculadas a los ciclos biogeoquímicos clave: β -glucosidasa y carboxilesterasa para el ciclo de C; ureasa para el ciclo de N y fosfatasa ácida para el ciclo del fósforo (P). La actividad de la carboxilesterasa se determinará siguiendo el enfoque sugerido por Sanchez-Hernandez *et al.* (2015), mientras que la actividad de la ureasa se medirá según Schinner *et al.* (1996). Por su parte, las actividades de β -glucosidasa y fosfatasa ácida se analizarán utilizando el método descrito por Popova y Deng (2010).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos del estudio de mesocosmos serán analizados estadísticamente utilizando el software R (versión 2025.05.1+513). El análisis incluirá el cálculo de medias, desviaciones estándar, diferencias de medias y análisis de correlación. La normalidad de los datos se verificará mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para probar las diferencias en las medias se utilizará el análisis de varianza (ANOVA).

En el caso de encontrar efectos significativos ($p \leq 0,05$), se realizarán comparaciones de medias con la prueba LSD de Fischer ($p \leq 0,05$). Finalmente, se utilizará el coeficiente de correlación r de Pearson para (i) obtener correlaciones entre las propiedades del suelo y las emisiones de GEI y (ii) para investigar el efecto de las propiedades del biocarbón en las emisiones de CO_2 , CH_4 , N_2O (Ginebra *et al.*, 2022).

Evaluación del ciclo de vida y huella de carbono

Para determinar la huella de carbono asociada a la producción de las distintas enmiendas con biocarbón, se cuantificarán las emisiones de GEI generadas en cada etapa del ciclo de vida de los tratamientos. Esta evaluación se realizará mediante un ACV, siguiendo la metodología establecida en las normas ISO 14040 y 14044, así como los lineamientos de la norma ISO 14067, que proporciona los criterios y directrices para la cuantificación de la huella de carbono en productos (ISO, 2018).

La evaluación de la huella de carbono se enfocará únicamente en la categoría de impacto de cambio climático.

El análisis se realizará siguiendo 6 escenarios: i) BRC y lombrices, ii) BCA y

lombrices, iii) vermichar de BRC iv) vermichar de BCA, v) bokashi con BRC y vi) bokashi con BCA, y el escenario basal será la aplicación de las enmiendas sin biocarbón (Tabla 5). La estructura del análisis consistirá, en primer lugar, en la definición de los objetivos y alcance del sistema. El análisis de inventario, la evaluación del impacto de ciclo de vida como su interpretación se presentarán en los resultados y discusión.

Tabla 2. Descripción de escenarios para ACV.

Escenario	Descripción
Basal	Lombrices
Basal	Vermicompost
Basal	Bokashi
1	BRC + Lombrices
2	BCA + Lombrices
3	BRC + Vermicompost
4	BCA + Vermicompost
5	BRC + Bokashi
6	BCA + Bokashi

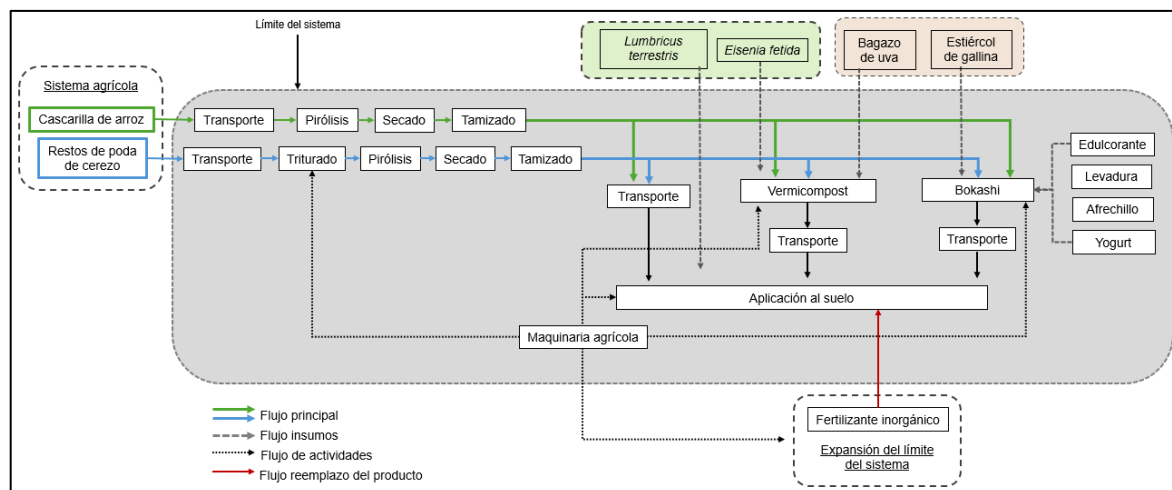
Definición de objetivos y alcance. El objetivo general del ACV en este estudio será evaluar y comparar la huella de carbono de 6 enmiendas orgánicas enriquecidas con biocarbón.

Unidad funcional. Para comparar la huella de carbono asociada a los seis escenarios se utilizará como unidad funcional 1 tonelada de enmienda. Esta unidad permite la comparación entre los escenarios, y ha sido la más utilizada dentro de la literatura consultada.

Límites del sistema. El ACV se limitará a un enfoque desde la cuna hasta la tumba, es decir, se considerarán las emisiones asociadas al ciclo de vida de las enmiendas desde el transporte de la materia prima hasta la aplicación del producto en el suelo. Adicionalmente, para estimar las ganancias ambientales de las enmiendas se

considerará una expansión de los límites del sistema, basado en el reemplazo de fertilizantes inorgánicos por las enmiendas orgánicas con biocarbón, utilizando como indicador el rendimiento de *L. perenne*, información obtenida experimentalmente por estudios preliminares en el Laboratorio de Materiales Carbonosos. El esquema general del sistema se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Límites del sistema a analizar.



Cada biocarbón está representado mediante una flecha de color específico, que indica el flujo del producto: azul para BC-RC y verde para BC-CA. Fuente: elaboración propia.

Principios y supuestos de asignación. Para calcular con precisión la huella de carbono de las enmiendas y garantizar que los resultados sean aplicables a condiciones reales de campo, se aplicarán supuestos clave como: la ubicación de la planta de pirólisis, el origen y transporte de las materias primas, así como la maquinaria e implementos utilizados tanto en la producción de las enmiendas como en su aplicación. Esto permitirá asignar los impactos ambientales de forma proporcional y representativa a las condiciones operativas reales. Por otro lado, se excluirán aquellos flujos que no contribuyen en gran medida al impacto final del producto, suponiendo que los desechos agrícolas que se someterán a pirólisis no tienen valor económico (Oldfield *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2024), así mismo para los insumos que se utilizarán para la preparación de enmiendas como: bagazo de uva y estiércol de gallina (Figura 2). En cuanto a las lombrices, tanto *L. terrestris* como

E. fetida se dejarán fuera de los límites del sistema, debido a la complejidad de la estimación de su huella ambiental y la falta de información en literatura.

Inventario del ciclo de vida. El ACV se realizará utilizando el software SimaPro v9.6 (PRé Sustainability, 2023), a partir de datos específicos que se extraerán de laboratorio, incluyendo las mediciones de GEI de todo el proceso de fabricación de los tratamientos y el almacenamiento de C de los suelos tratados; y se complementarán con datos genéricos provenientes de la base de datos Ecoinvent v3 (Ecoinvent Centre, 2023) y literatura científica disponible, lo que permitirá establecer comparaciones precisas entre los distintos escenarios evaluados. Adicionalmente, para evaluar y cuantificar el potencial de reemplazo de fertilizantes inorgánicos (urea y superfosfato triple) por enmiendas, se utilizarán los datos de rendimiento de *L. perenne* obtenidos experimentalmente para cada tratamiento (escenario), los cuales se contrastarán con los valores de rendimiento reportados en literatura para sistemas fertilizados convencionalmente.

Por otro lado, como parte del análisis de inventario, se identificarán los procesos del ciclo de vida que contribuyen significativamente a la huella de C de cada enmienda, con el fin de proponer mejoras para reducir las emisiones asociadas.

ANÁLISIS CRÍTICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Contexto y justificación

La propuesta metodológica descrita tiene como finalidad sentar las bases para la elaboración de nuevas investigaciones orientadas a SBN para la recuperación de suelos agrícolas degradados que han perdido su potencial de secuestro de C, garantizando que dichas soluciones cuenten con el respaldo de las ganancias ambientales derivadas de su implementación.

El secuestro de C en los suelos puede potenciarse mediante dos vías: procesos que aumenten las entradas de C, como la aplicación de enmiendas orgánicas, y procesos que ralenticen su pérdida, como el uso del biocarbón, el cual facilita el secuestro de C a largo plazo debido a su composición estable de C aromático (Paustian *et al.*, 2019; Enebe *et al.*, 2025).

Este estudio busca evaluar ambientalmente una solución que integre ambas vías de secuestro de C, aprovechando el efecto combinado que resulta de mezclar biocarbón y fuentes orgánicas, considerando además dos tipos de suelos contrastantes (Andisol y Alfisol) que permitirán explorar la interacción suelo-tratamiento.

Resultados esperados

Emisiones de GEI. Se espera que las enmiendas con biocarbón presenten menores emisiones de CO₂ y N₂O en comparación con aquellas sin biocarbón, debido a que el biocarbón actúa como estabilizador de la materia orgánica y reduce la disponibilidad de nutrientes para microorganismos vinculados a la producción de estos gases. No obstante, la magnitud de este efecto podría variar según el tipo de biocarbón incorporado y el tipo de suelo. En este sentido, se anticipa una respuesta más pronunciada en el Alfisol con respecto al Andisol, considerando su historial de uso descritos en la metodología. En cuanto a las emisiones de CH₄, no se prevén cambios significativos, dado que las condiciones de incubación son aeróbicas (60% WFPS).

Calidad del suelo. Se espera que la incorporación de biocarbón mejore los parámetros de calidad del suelo en comparación con las enmiendas sin biocarbón, manifestándose en un aumento en el COS y un incremento de la actividad enzimática. Sin embargo, la magnitud de estos cambios podría ser contrastante entre los dos tipos de suelo, debido a que cada uno posee sus propios mecanismos de regulación biogeoquímica, determinados por sus propiedades edáficas intrínsecas (composición mineralógica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica basal) y sus distintos historiales de uso.

Asimismo, se prevé que los dos tipos de biocarbón (BRC y BCA) generen respuestas diferenciales en los parámetros de calidad del suelo, como consecuencia de las diferencias en su composición fisicoquímica derivadas de la materia prima utilizada. La dirección de estas diferencias será analizada una vez se disponga de la caracterización química de ambos biocarbones y de los resultados experimentales.

El efecto sinérgico esperado de las enmiendas enriquecidas con biocarbón podría ser más evidente en tratamientos con bioactivación *ex situ* (V y B) debido a la colonización microbiana previa del biocarbón. En cambio, la bioactivación *in situ* (L) podría generar respuestas más moderadas en el corto plazo del experimento (90 días), considerando que la interacción suelo-lombriz-biocarbón requiere mayor tiempo para manifestar efectos significativos (Weyers y Spokas, 2011; Nahidan y Ghasemzadeh, 2022).

ACV y Huella de carbono. En cuanto a la huella de C, se espera que sea menor en las enmiendas enriquecidas con biocarbón en comparación con aquellas sin biocarbón, como resultado de dos efectos integrados: (i) la reducción de emisiones de GEI durante la incubación, y (ii) el almacenamiento de C recalcitrante aportado por el biocarbón. Sin embargo, la magnitud de esta respuesta dependerá del balance entre las emisiones generadas durante la producción de las enmiendas y el C secuestrado en el suelo. Asimismo, se anticipan diferencias en la huella de C entre las enmiendas elaboradas con BRC y BCA, asociadas a las diferencias en su estructura aromática y estabilidad.

Finalmente, se espera obtener ganancias ambientales derivadas de la producción y aplicación de estas enmiendas como reemplazo de fertilizantes inorgánicos en la producción de *L. perenne*.

Limitaciones de la metodología

Si bien la metodología propuesta contempla un ensayo en condiciones de laboratorio y con incubaciones a corto plazo (90 días), esta aproximación no representa la complejidad de los factores ambientales en campo. No obstante, permitirá fundamentar el desarrollo de futuras evaluaciones en condiciones reales y a largo plazo. Además, brindará la oportunidad de identificar y mejorar los puntos críticos mediante el ACV, con el fin de reducir aún más las fuentes de emisiones de C asociadas a la producción y aplicación de estas enmiendas antes de escalar a campo.

Otra limitación es la exclusión de las lombrices en el ACV debida a la falta de información disponible para estimar su huella ambiental, lo que podría subestimar

el impacto de los tratamientos que dependen de su uso (L y V). No obstante, esta decisión se explicita en los supuestos del análisis y se reconoce como una oportunidad para futuras investigaciones.

Fortalezas y contribuciones

El principal aporte de esta investigación radica en su enfoque integrador, combinando la evaluación de emisiones de GEI, parámetros de calidad del suelo y ACV en un mismo diseño experimental. Esto permitirá comparar sistemáticamente diferentes estrategias de activación biológica del biocarbón (*in situ* y *ex situ*), en dos tipos de biocarbón y en dos suelos contrastantes de la Región de Ñuble. La inclusión de dos tipos de suelos con propiedades contrastantes permitirá explorar interacciones que podrían ser determinantes para recomendar prácticas según el contexto edáfico.

Se destaca el enfoque territorial de la propuesta metodológica al utilizar residuos agrícolas de la zona, promoviendo la revalorización de desechos que normalmente son removidos mediante quemas abiertas. De esta forma, la investigación contribuye a la economía circular al transformar subproductos agrícolas en insumos con valor agronómico y ambiental, reduciendo emisiones asociadas a su disposición tradicional y ofreciendo una alternativa sostenible al uso de fertilizantes inorgánicos.

Importancia e impacto esperado

La importancia de esta investigación radica en la integración de herramientas como el ACV y el cálculo de huella de C para cuantificar el impacto ambiental de la aplicación de enmiendas orgánicas con biocarbón. Este trabajo conjunto entre las ciencias agronómicas y ambientales permitirá desarrollar soluciones más sostenibles, adaptadas tanto al contexto de cambio climático como a sus implicancias en la producción de alimentos.

Los resultados generados contribuirán a reducir las incertidumbres identificadas por el MMA, respecto a la categorización del biocarbón como SBN, aportando evidencia científica contextualizada para la Región de Ñuble.

Finalmente, se espera que los hallazgos de este estudio entreguen información relevante para agricultores y tomadores de decisiones locales, facilitando la

adopción de prácticas basadas en economía circular, que mejoren la calidad del suelo y contribuyan a la mitigación del cambio climático desde el sector agropecuario.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Año 1						Año 2											
	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Producción de biocarbón y preparación de enmiendas																		
Muestreo de suelos																		
Extracción de lombrices																		
Incubación de enmiendas																		
Mediciones de GEI																		
Análisis enzimático																		
Mediciones de CO ₂ del compostaje de enmiendas																		
Análisis de mediciones de GEI																		
Análisis físico y químico de suelos																		
Análisis estadístico																		
ACV																		
Escritura de tesis y elaboración de manuscrito para publicación																		
Informes de avances																		
Defensa de tesis y examen de grado																		
Envío de manuscrito para publicación																		
Presentación a congreso																		

REFERENCIAS

1. Amer, M., M. Shaaban, M.U. Hassan, H. Guoqin, L. Ying, T. Hai Ying, F. Rasul, M. Qiaoying, L. Zhuanling, A. Rasheed and Z. Peng. 2020. Biochar mitigates the N₂O emissions from acidic soil by increasing the nosZ and nirK gene abundance and soil pH. J. Environ. Manage. 255: 109891.

2. Antileo-Mellado, S., C. Muñoz, J.C. Sanchez-Hernandez, M. Ginebra and M. Sandoval. 2024. Effect of biochar on vermicompost production: chemical, biochemical, and biological properties. *Agronomy* 14(3): 615.
3. Cépedes, M. 2019. Producción de bokashi. Ficha Técnica N°42: Suelos: Producción de Bokashi. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Raihuén. Chillán, Chile.
4. Cui, J., J. Jiang, E. Chang, F. Zhang, L. Guo, D. Fang, R. Xu and Y. Wang. 2023. Underlying reasons and factors associated with changes in earthworm activities in response to biochar amendment: a review. *Biochar* 5(1): 79.
5. Domene, X. 2016. A critical analysis of meso- and macrofauna effects following biochar supplementation. pp: 268-292. In: T.K. Ralebitso-Senior and C.H. Orr (Eds.). *Biochar application*. Academic Press. London, UK.
6. Ecoinvent Centre. 2023. Ecoinvent database [base de datos]. Versión 3. Ecoinvent Centre. <https://www.ecoinvent.org>. [Consulta: 21 marzo 2026].
7. Enebe, M.C., R.L. Ray and R.W. Griffin. 2025. Carbon sequestration and soil responses to soil amendments – A review. *J. Hazard. Mater. Adv.* 18: 100714.
8. EPD International. 2021. Biochar product category classification (PCR): PCR 2021:07 version 1.0. EPD International. Stockholm, Sweden.
9. Ferreira, T., F.A. Hansel, C.M.B.F. Maia, M. Guiotoku, L. Cunha and G.G. Brown. 2021. Earthworm-biochar interactions: A laboratory trial using *Pontoscolex corethrurus*. *Sci. Total Environ.* 777: 146147.
10. Fu, J., X. Zhou, Y. He, R. Liu, Y. Yao, G. Zhou, H. Chen, L. Zhou, Y. Fu and S.H. Bai. 2023. Co-application of biochar and organic amendments on soil greenhouse gas emissions: A meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 897: 166171.
11. Fungo, B., J. Lehmann, K. Kalbitz, M. Thiongo, M. Tenywa, I. Okeyo and H. Neufeldt. 2019. Ammonia and nitrous oxide emissions from a field Ultisol amended with tithonia green manure, urea, and biochar. *Biol. Fertil. Soils* 55(2): 135-148.
12. Ginebra, M., C. Muñoz, R. Calvelo-Pereira, M. Doussoulin and E. Zagal. 2022. Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment. *Sci. Total Environ.* 806: 150465.
13. IPCC. 2023. Sections. pp: 35-115. In: H. Lee and J. Romero (Eds.). *Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Geneva, Switzerland.
14. Ippolito, J.A., L. Cui, C. Kammann, N. Wrage-Mönnig, J.M. Estavillo, T. Fuertes-Mendizabal, M.L. Cayuela, G. Sigua, J. Novak, K. Spokas and N. Borchard. 2020. Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* 2(4): 421-438.

15. ISO. 2018. Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. ISO 14067:2018. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
16. Kurniawan, T.A., M.H.D. Othman, X. Liang, H.H. Goh, P. Gikas, K.-K. Chong and K.W. Chew. 2023. Challenges and opportunities for biochar to promote circular economy and carbon neutrality. *J. Environ. Manage.* 332: 117429.
17. Lavagi, V., J. Kaplan, G. Vidalakis, M. Ortiz, M.V. Rodriguez, M. Amador, F. Hopkins, S. Ying and D. Pagliaccia. 2024. Recycling agricultural waste to enhance sustainable greenhouse agriculture: analyzing the cost-effectiveness and agronomic benefits of bokashi and biochar byproducts as soil amendments in citrus nursery production. *Sustainability* 16(14): 5992.
18. Lehmann, J., A. Cowie, C.A. Masiello, C. Kammann, D. Woolf, J.E. Amonette, M.L. Cayuela, M. Camps-Arbestain and T. Whitman. 2021. Biochar in climate change mitigation. *Nat. Geosci.* 14(12): 883-892.
19. Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. pp: 1-12. In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.). *Biochar for environmental management: science and technology*. Earthscan Publishers Ltd. London, UK.
20. Li, B., Y. Guo, F. Liang, W. Liu, Y. Wang, W. Cao, H. Song, J. Chen and J. Guo. 2024. Global integrative meta-analysis of the responses in soil organic carbon stock to biochar amendment. *J. Environ. Manage.* 351: 119745.
21. Liu, Y., H.Y. Tang, A. Muhammad and G.Q. Huang. 2019. Emission mechanism and reduction countermeasures of agricultural greenhouse gases - a review. *Greenh. Gases Sci. Technol.* 9(2): 160-174.
22. Marquet, P.A., M. Rojas, A. Stehr, L. Farías, H. González, J.C. Muñoz, E. Wagemann, C. Rojas, I. Rodríguez y J. Hoyos. 2021. Soluciones basadas en la naturaleza. Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Santiago, Chile.
23. Matamoros, J., F. Reyes, A. Toro y C. Muñoz. 2024. Activated biochar: innovative solution for the productivity of *Lolium multiflorum* in an Andisol volcanic soil. Datos no publicados. Programa de doctorado en Ciencias Agronómicas, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
24. Matuščík, J., T. Hnátková and V. Kočí. 2020. Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *J. Clean. Prod.* 259: 120998.
25. Mikajlo, I., T.Z. Lerch, B. Louvel, J. Hynšt, J. Záhora and B. Pourrut. 2024. Composted biochar versus compost with biochar: effects on soil properties and plant growth. *Biochar* 6(1): 85.
26. Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2023. Informe del inventario nacional de Chile 2022: inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros

contaminantes climáticos 1990-2020. División de Cambio Climático. Santiago, Chile.

27. Muñoz, C., M. Ginebra and E. Zagal. 2019. Variation of greenhouse gases fluxes and soil properties with addition of biochar from farm-wastes in volcanic and non-volcanic soils. *Sustainability* 11(7): 1831.
28. Muñoz, C., A. Loncomilla and N. Valenzuela. 2023. Effect of biochar on the agronomic and environmental properties of bokashi and compost. *J. Agric. Sci. Res.* 3(19): 1-12.
29. Muñoz, E., G. Curaqueo, M. Cea, L. Vera and R. Navia. 2017. Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system. *J. Clean. Prod.* 158: 1-7.
30. Nahidan, S. y M. Ghasemzadeh. 2022. Biochemical phosphorus transformations in a calcareous soil as affected by earthworm, cow manure and its biochar additions. *Appl. Soil Ecol.* 179: 104310.
31. Namoi, N., D. Pelster, T.S. Rosenstock, L. Mwangi, S. Kamau, P. Mutuo and E. Barrios. 2019. Earthworms regulate ability of biochar to mitigate CO₂ and N₂O emissions from a tropical soil. *Appl. Soil Ecol.* 140: 57-67.
32. Nobile, C., M. Lebrun, C. Védère, N. Honvault, M.L. Aubertin, M.P. Faucon, C. Girardin, S. Houot, L. Kervroëdan, A.M. Dulaurent, C. Rumpel and D. Houben. 2022. Biochar and compost addition increases soil organic carbon content and substitutes P and K fertilizer in three French cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 42(6): 119.
33. Noguera, D., M. Rondón, K.-R. Laossi, V. Hoyos, P. Lavelle, M.H. Cruz de Carvalho and S. Barot. 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biol. Biochem.* 42(7): 1017-1027.
34. Oldfield, T.L., N. Sikirica, C. Mondini, G. López, P.J. Kuikman and N.M. Holden. 2018. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *J. Environ. Manage.* 218: 465-476.
35. Pagliaccia, D., M. Ortiz, M.V. Rodriguez, S. Abbott, A. De Francesco, M. Amador, V. Lavagi, B. Maki, F. Hopkins, J. Kaplan, S. Ying and G. Vidalakis. 2024. Enhancing soil health and nutrient availability for Carrizo citrange (*X Citroncirus* sp.) through bokashi and biochar amendments: An exploration into indoor sustainable soil ecosystem management. *Sci. Hortic.* 326: 112661.
36. Palm, C., H. Blanco-Canqui, F. DeClerck, L. Gatere and P. Grace. 2014. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agric. Ecosyst. Environ.* 187: 87-105.
37. Pan, S.-Y., C.-D. Dong, J.-F. Su, P.-Y. Wang, C.-W. Chen, J.-S. Chang, H. Kim, C.-P. Huang and C.-M. Hung. 2021. The role of biochar in regulating the carbon, phosphorus, and nitrogen cycles exemplified by soil systems. *Sustainability* 13(10): 5612.

38. Paustian, K., E. Larson, J. Kent, E. Marx and A. Swan. 2019. Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Front. Clim.* 1: 8.
39. PRé Sustainability. 2023. SimaPro [programa computacional]. Versión 9.6. PRé Sustainability. <https://simapro.com>. [Consulta: 21 marzo 2026].
40. Rajalakshmi, A.G. 2020. Utilization of agricultural waste as biochar for soil health. pp: 207-221. In: J.S. Singh and C. Singh (Eds.). *Biochar applications in agriculture and environment management*. Springer International Publishing. Cham, Switzerland.
41. Rodríguez-Machín, L., F. Ronsse, Y. Casas-Ledón and L.E. Arteaga-Pérez. 2021. Fast pyrolysis of raw and acid-leached sugarcane residues en route to producing chemicals and fuels: Economic and environmental assessments. *J. Clean. Prod.* 296: 126601.
42. Sadzawka R., A., M.A. Carrasco R., R. Grez Z., M. de I. L. Mora G., H. Flores P., A. Neaman y I. de I.A.C. R. de I.L. Platina. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
43. Sanchez-Hernandez, J.C., J. Notario del Pino and J. Domínguez. 2015. Earthworm-induced carboxylesterase activity in soil: Assessing the potential for detoxification and monitoring organophosphorus pesticides. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 122: 303-312.
44. Sanchez-Hernandez, J.C., K.S. Ro, A.A. Szogi, S. Chang and B. Park. 2021. Earthworms increase the potential for enzymatic bio-activation of biochars made from co-pyrolyzing animal manures and plastic wastes. *J. Hazard. Mater.* 408: 124405.
45. Sanchez-Hernandez, J.C., K.S. Ro and F.J. Díaz. 2019. Biochar and earthworms working in tandem: Research opportunities for soil bioremediation. *Sci. Total Environ.* 688: 574-583.
46. Santibáñez Q., F. 2017. *Atlas agroclimático de Chile*. Estado actual y tendencias del clima. Tomo IV: Regiones de Biobío y La Araucanía. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
47. Singh, H., B.K. Northup, C.W. Rice and P.V.V. Prasad. 2022. Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar* 4(1): 8.
48. Stolpe, N.B. 2006. *Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile*. Vol. 1. Universidad de Concepción. Chillán, Chile.
49. Thies, J. and M. Rillig. 2015. Characteristics of biochar: biological properties. pp: 85-105. In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.). *Biochar for environmental management*. (2a. ed.). Routledge. London, UK.

50. Torres-Morales, E., D. Khatiwada, M. Xylia and F.X. Johnson. 2023. Investigating biochar as a net-negative emissions strategy in Colombia: Potentials, costs, and barriers. *Curr. Res. Environ. Sustain.* 6: 100229.
51. Wang, J., J. Liu, L. Chang, Y. Pan, L. Zhai, Z. Shen, L. Shi and Y. Chen. 2023b. The characteristic difference between non-drilosphere and drilosphere-aged biochar: Revealing that earthworms accelerate the aging of biochar. *Chemosphere* 321: 138141.
52. Wang, L., D. Chen and L. Zhu. 2023a. Biochar carbon sequestration potential rectification in soils: Synthesis effects of biochar on soil CO₂, CH₄ and N₂O emissions. *Sci. Total Environ.* 904: 167047.
53. Wang, Z.C., J.B. Dunn, J. Han and M.Q. Wang. 2014. Effects of co-produced biochar on life cycle greenhouse gas emissions of pyrolysis-derived renewable fuels. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 8(2): 189-204.
54. Weyers, S.L. y K.A. Spokas. 2011. Impact of biochar on earthworm populations: A review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2011: 541592.
55. Wu, Y., J. Liu, M. Shaaban and R. Hu. 2021. Dynamics of soil N₂O emissions and functional gene abundance in response to biochar application in the presence of earthworms. *Environ. Pollut.* 268: 115670.
56. Wu, Y., Y. Jiang, H. Di, J. Liu, Y. Lu and M. Shaaban. 2024. Effects of biochar addition on earthworm enhanced N₂O emission. *Eur. J. Soil Biol.* 123: 103679.
57. Zhang, Q., S. Li, M. Saleem, M.Y. Ali and J. Xiang. 2021. Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Appl. Soil Ecol.* 168: 104154.
58. Zhang, Z., Z. Zhu, B. Shen and L. Liu. 2019. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy* 171: 581-598.