

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**CONDICIONES DE MESOCOSMOS CON APLICACIÓN DE BIOCHAR Y USO
DE LOMBRICES EN LA CALIDAD FÍSICA DE UN ANDISOL**

POR

CAMILA SOLANGE ZAPATA QUINTANA

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

**CHILLÁN – CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CONDICIONES DE MESOCOSMOS CON APLICACIÓN DE BIOCHAR Y USO
DE LOMBRICES EN LA CALIDAD FÍSICA DE UN ANDISOL**

POR

CAMILA SOLANGE ZAPATA QUINTANA

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

**CHILLÁN – CHILE
2025**

Aprobada por:

Profesor asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Mg.Cs. Dr. Cs Ambientales

Guía

Profesor Asistente, Christian Guajardo F.
Ing. Agrónomo, Dr. En Ingeniería Agraria

Asesor

Profesor Asistente, Winfred Espejo C.
Médico Veterinario, Dr. en Ciencias ambientales

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y Métodos	5
Resultados y Discusión	10
Conclusiones	18
Referencias	19

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Tabla 1 Descripción tratamientos evaluados.....	5
Tabla 2 Valores medios parámetros físicos, macroagregados (MAC), microagregados (MIC), diámetro peso medio (DPM) densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), humedad aprovechable (HA) y conductividad hidráulica (Ks) evaluados para los diferentes tratamientos	11
Tabla 3 Valores medios de contenido de materia orgánica (MO) evaluados para los diferentes tratamientos.....	16
Tabla 4 Índice de calidad física de suelos (ICFS) total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados.....	18

CONDICIONES DE MESOCOSMOS CON APLICACIÓN DE BIOCHAR Y USO DE LOMBRICES EN LA CALIDAD FÍSICA DE UN ANDISOL

RESUMEN

La degradación del suelo y pérdida de calidad física son problemas importantes que afectan la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. En este contexto, se evaluó la aplicación de biochar y el uso de lombrices de la especie *Aporrectodea caliginosa* para mejorar la calidad física de un Andisol a través de un experimento en condiciones de mesocosmos. Los resultados mostraron que la combinación de biochar y lombrices modificó la estructura y propiedades físicas del suelo, mientras que la aplicación de solo biochar no tuvo un impacto significativo. Por otro lado, el uso exclusivo de lombrices demostró un mayor impacto en la modificación de las propiedades físicas y la agregación del suelo. Además, se utilizó un modelo de evaluación de calidad física, el cual reveló que el tratamiento con lombrices logró mejorar la calidad del suelo de "baja" a "media" en el corto plazo. Estos hallazgos sugieren que la incorporación de lombrices en el suelo es una estrategia efectiva para mejorar su calidad física.

Palabras claves adicionales: Biochar, lombrices, calidad física del suelo.

SUMMARY

ABSTRACT

Soil degradation and loss of physical quality are significant problems that affect agricultural productivity and environmental sustainability. In this context, the application of biochar and the use of earthworms of the species *Aporrectodea caliginosa* were evaluated to improve the physical quality of an Andisol through an experiment under mesocosm conditions. The results showed that the combination of biochar and earthworms modified the structure and physical properties of the soil, while the application of biochar alone had no significant impact. On the other hand, the exclusive use of earthworms demonstrated a greater impact on modifying physical properties and soil aggregation. Additionally, a physical quality evaluation model was used, which revealed that the treatment with earthworms improved soil quality from "low" to "medium" in the short term. These findings suggest that

incorporating earthworms into the soil is an effective strategy to improve its physical quality.

Additional keywords: Biochar, earthworms, soil physical quality.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un medio dinámico y complejo donde se desarrollan procesos biológicos, químicos y físicos que sustentan el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Brunel y Seguel, 2011) debido a esto cualquier alteración que ocurra en él, ya sea por agentes naturales o intervención humana, puede tener consecuencias en sus funciones, afectando tanto la producción vegetal como la conservación de los ecosistemas (Porta Casanellas *et al.*, 2014) , En este contexto, la complejidad y dinamismo del suelo lo hacen vulnerable a la degradación, la cual puede definirse como la pérdida de calidad y productividad del suelo (Lal, 2015), por lo cual el concepto calidad se convierte en un aspecto clave, ya que en esencia implica la capacidad que posee el suelo para realizar sus funciones de manera óptima (Karlen *et al.*, 2001). Esto a su vez, lo convierte en un factor determinante para la sostenibilidad de los ecosistemas y la producción agrícola (Lal, 2017) y en una herramienta esencial para la toma de decisiones en cuanto a manejo y uso del suelo (García *et al.*, 2012). Puede ser evaluada mediante el índice de calidad (ICS), el cual es un indicador que integra diversas propiedades, considerando contenido de materia orgánica y parámetros físicos como estructura, porosidad, densidad aparente, capacidad de infiltración y retención de humedad (Vasu *et al.*, 2024). Dentro de los parámetros físicos, la organización estructural es un factor importante que influye en la calidad del suelo debido a su impacto en la función y el comportamiento del suelo (Schoeneberger *et al.*, 2012). Una estructura óptima proporciona espacios porosos adecuados para el movimiento de gases y agua, permitiendo una buena infiltración y retención de humedad, esto genera un hábitat idóneo para los organismos del suelo, facilita el crecimiento de raíces, reduce la erosión y mejora la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Singh *et al.*, 2024). En consecuencia, la estructura desempeña un papel vital en la calidad del suelo (Peng *et al.*, 2023), y en la regulación de muchos procesos (Rabot *et al.*, 2018), y puede definirse como la disposición espacial de las partículas primarias (López,

2006), cuando este grupo de partículas se unen mediante la acción combinada de procesos de cohesión y fragmentación (Ghezzehei, 2023), se generan partículas de mayor tamaño, denominadas agregados, originados cuando la macro fauna descompone la materia orgánica fresca y, posteriormente, los miembros de la comunidad microbiana la transforman en agentes aglutinantes entre las partículas minerales del suelo (Guhra *et al.*, 2022). Según su tamaño los agregados se clasifican en macro agregados los que garantizan la estabilidad física del hábitat que sustenta el crecimiento de las raíces, microorganismos y fauna del suelo. En micro agregados los cuales consisten en minerales orgánicos específicos que son importantes para las funciones de almacenamiento de carbono, pero se limitan a proporcionar funciones de hábitat debido a sus espacios porosos muy pequeños (Bünemann *et al.*, 2018; Yudina y Kuzyakov, 2023).

Los agregados del suelo, especialmente los estables en agua, juegan un papel crucial en la determinación de la calidad del suelo al influir directamente en la infiltración hídrica y la estructura del suelo (Blevins y Frye, 1993). La formación de agregados estables es esencial para mantener una estructura saludable y promover la conservación del suelo, ya que una estructura favorable se caracteriza por una alta estabilidad de los agregados (Bronick y Lal, 2005). Dado que la estructura del suelo desempeña un rol fundamental en muchos procesos edáficos, es fundamental implementar prácticas de conservación que preserven la integridad del suelo y su estructura (Rucks *et al.*, 2004). En este sentido, la estabilidad de los agregados es un indicador clave de la salud del suelo (Rieke *et al.*, 2022), definida como la capacidad del suelo para resistir la degradación y mantener su estructura y arreglo de espacios sólidos y porosos (Zhang *et al.*, 2022).

Actualmente se plantean distintas estrategias dirigidas a mejorar el suelo mediante la modificación de ciertas propiedades (Xiong *et al.*, 2022), entre estas estrategias se encuentra el biocarbón, el cual es un material rico en carbono producido por pirólisis en condiciones de oxígeno limitado (Di *et al.*, 2019), se ha propuesto su uso como aditivo para el suelo como un medio para mitigar el cambio climático mediante el secuestro de carbono a largo plazo y al mismo tiempo mejorar las propiedades y funciones del suelo (Jeffery *et al.*, 2011), dependiendo del tipo de

biocarbón y las propiedades del suelo (Rasa *et al.*, 2018), de igual manera podría favorecer los procesos de construcción de la estructura del suelo por medios indirectos (Burrell *et al.*, 2016), proporcionando un hábitat mejorado para los microorganismos del suelo (Pietikäinen *et al.*, 2000; Van Zwieten *et al.*, 2010).

Otra de estas estrategias corresponde a las lombrices de tierra, las cuales desempeñan un papel importante en cuanto a la formación y mantención de la estructura del suelo (Blanchart *et al.*, 1999), corresponden a un grupo de invertebrados del suelo que comprenden la mayor biomasa acumulada del ecosistema terrestre, y son los representantes más conocidos de la macro fauna del suelo (Bottinelli *et al.*, 2015). A través de su alimentación, movimiento y excreción, influyen directamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del ecosistema del suelo (Liu *et al.*, 2021), son importantes debido a su influencia en la descomposición de la materia orgánica, desarrollo de la estructura del suelo y el ciclo de nutrientes (Ríos, 2005). Las lombrices de tierra tienen influencias extremadamente importantes en cuanto a la estructura ya que los suelos ricos en lombrices suelen tener una estructura más estable (Garvín *et al.*, 2001), Además, proporcionan canales y madrigueras los cuales contribuyen a la macro porosidad y, por tanto, influyen en la infiltración del agua (Lee y Foster, 1991). Por lo que, tanto la actividad de las lombrices como la densidad de estas dentro del suelo cambian sus propiedades físicas (Bottinelli *et al.*, 2015).

En este contexto, la presente investigación busca contribuir de manera significativa a la búsqueda de soluciones sostenibles para la agricultura y conservación de los suelos, evaluando el efecto de la aplicación de biochar y uso de lombrices en la calidad física de un Andisol, ya que es fundamental que el suelo actúe como una base sólida proporcionando un soporte adecuado y una estructura estable (Topp *et al.*, 1997). Por lo que estrategias como estas podrían ser efectivas para mejorar las propiedades y calidad física del suelo, en donde la estabilidad de los agregados es un aspecto fundamental para lograr este objetivo, ya que se encuentra estrechamente relacionada (Jat *et al.*, 2023), y tiene un impacto significativo en la sostenibilidad agrícola, calidad ambiental y salud ecosistémica (Doran *et al.*, 2018).

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se planteó como hipótesis del experimento que la aplicación de biochar en conjunto con lombrices modifica las propiedades físicas de un Andisol. El objetivo general fue determinar si el uso de residuos biocarbonosos como el biochar mediante usos de lombrices de la especie *Aporrectodea caliginosa* puede mejorar significativamente las propiedades estructurales de un suelo Andisol. Los objetivos específicos se definieron como (1) Establecer el efecto en la organización estructural de un Andisol a las aplicaciones de biochar, lombrices y biochar más lombrices. (2) Evaluar mediante un modelo de calidad física las aplicaciones de biochar, lombrices y biochar con lombrices en un Andisol.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental

Corresponde a un experimento de mesocosmos completamente al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones cada uno, ubicados en la estación Experimental El Nogal de la Universidad de Concepción, campus Chillán, región de Ñuble, Chile. La duración del experimento fue de cuatro semanas. La descripción de los tratamientos evaluados se encuentra en la siguiente Tabla (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción tratamientos evaluados.

Tratamiento	Sigla	Descripción
Suelo control	T0	Suelo
Suelo con biocarbón	TB	Suelo + 1 % biocarbón
Suelo con lombrices	TL	Suelo + 30 lombrices
Suelo con biocarbón y lombrices	TBL	Suelo + 1 % biocarbón + 30 lombrices

Zona de estudio

Ubicada en la Estación Experimental El Nogal de la Universidad de Concepción, campus Chillán (36°35'52.6"S 72°04'55.0"W). Suelo correspondiente al orden Andisol, serie Arrayán, derivado de cenizas volcánicas modernas, de textura franco-arcillosa. Su clasificación pertenece a Medial, amorphich, thermic Humic Haploxerands (Stolpe, 2006)

Mesocosmos

Se realizó un ensayo experimental en mesocosmos, el cual es definido como una unidad experimental al aire libre, delimitada y parcialmente cerrada, que simula de manera precisa el entorno natural de manera controlada (Crossland y La Point, 1992).

Para el desarrollo del ensayo se utilizaron nueve recipientes perforados de 6 L de capacidad, enterrados hasta la mitad en el suelo. El contenido de cada recipiente fue de 3 Kg de suelo, procedente del mismo entorno, cubriendo la superficie con una lámina de suelo de 1 cm de profundidad con material vegetal con el fin de simular condiciones ambientales.

Lombrices

Las lombrices utilizadas en el experimento corresponden a la especie *Aporrectodea caliginosa* perteneciente a la Familia Lumbricidae. Es una de las especies más comunes en suelos agrícolas y praderas, desempeñando un papel fundamental en la estructuración del suelo y la descomposición de materia orgánica (Bohlen, 1996). Esta lombriz se clasifica como endogeica, lo que significa que habita en horizontes minerales del suelo, formando galerías horizontales y alimentándose de materia orgánica parcialmente descompuesta. Su actividad mejora la porosidad del suelo, facilitando la aireación y la infiltración del agua, lo que contribuye a la fertilidad edáfica (Lavelle y Spain, 2001). Para el experimento se utilizó una población de 30 individuos adultos introducidos en cada réplica de los tratamientos que incluían lombrices.

Caracterización del biocarbón

Elaborado a partir de acículas de pino recolectadas de predios forestales de la región de Ñuble y Biobío, pirolizadas a 600 °C durante 90 minutos en una mufla marca Nabertherm LE/11/R7 en el Laboratorio de Materiales Carbonosos, Universidad de Concepción, Campus Chillán.

Establecimiento de ensayo

Se realizaron cuatro tratamientos (Tabla 1; T0, TB, TL y TBL) con tres repeticiones cada uno en recipientes plásticos con una capacidad de 6 L, previamente perforados en el fondo para evitar anegamiento de agua. Cada recipiente contenía 3 Kg de

suelo previamente tamizado. Se incorporó una dosis de 1 % (p/p) de biocarbón para los tratamientos con biochar (TB y TBL), 30 lombrices adultas de la especie *Aporrectodea caliginosa* fueron incorporadas a los tratamientos con lombrices (TL y TBL). Las lombrices habían sido previamente colectadas a mano desde el mismo sitio experimental a 20 cm de profundidad y fueron mantenidas en suelo húmedo en oscuridad a 20 °C durante dos semanas hasta su uso. En el sitio experimental, se distribuyeron con sus respectivos tratamientos en una superficie de 12 m², introduciéndolas de manera que quedaran 20 cm de borde expuesto sobre la superficie. De la superficie contigua a cada recipiente, se extrajo una lámina de 1 cm de profundidad con vegetación para cubrir el suelo superficial de cada recipiente. Los tratamientos fueron incubados en campo por cuatro semanas. Durante este período de incubación en Chillán, se registraron 112 mm de precipitaciones, con temperaturas promedio de 14,2 °C para las máximas y 5,4 °C para las mínimas. Finalizado el tiempo de ensayo se realizaron mediciones de materia orgánica (MO), macroagregados (MAC), microagregados (MIC), diámetro ponderación media (DPM), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), humedad aprovechable (HA), y Conductividad hidráulica (Ks). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad de Concepción de acuerdo con la metodología para suelos de Sandoval *et al.*, (2012).

Determinación de la distribución por tamaño de agregado en húmedo.

La agregación del suelo se determinó utilizando 100 g de suelo seco (Sandoval *et al.*, 2012) previamente tamizado por dos tamices (4,75 mm y 2 mm), la separación de los diferentes tamaños de agregados se realizó mediante tamizado en húmedo siguiendo el procedimiento descrito por Yoder (1936). Para esto se utilizan tamices de diferentes diámetros (2; 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 mm), ordenados de mayor a menor. Los tamices son sumergidos en agua donde se realiza una agitación de 25 ciclos min⁻¹ durante 15 min. El porcentaje de agregados por tamaño es calculado a partir de la masa seca (g) de los agregados que van quedando en cada tamiz.

Los resultados se expresan en porcentajes de agregados, considerándose macroagregados (MAC) aquellos $\geq 0,25$ mm y micro agregados (MIC) aquellos $\leq 0,25$ mm.

Determinación de la estabilidad de los agregados del suelo en húmedo

Luego del secado se procede a pesar cada una de las fases obtenidas. El diámetro peso medio (DPM) se determinó según (Kemper y Rosenau, 1986) mediante la siguiente fórmula:

$$DPM = \frac{\sum X_i * W_i}{W}$$

Donde:

W_i = Peso de los agregados en gramos.

X_i = es el diámetro de los orificios del tamiz en milímetros.

W = corresponde al peso total de los agregados de la muestra en gramos.

Textura del suelo

La textura del suelo se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, según metodología descrita por Sandoval *et al.*, (2012). Este método se basa en la Ley de Stokes, que relaciona el tamaño de las partículas con la velocidad de sedimentación a diferentes tiempos, se utiliza para calcular la proporción relativa de las partículas de arena, limo y arcilla en el suelo.

Densidad aparente (Da)

Determinada mediante el método del terrón, según metodología descrita por Klute y page (1986), el cual consiste en recubrir un agregado de suelo con una delgada película de parafina sólida y luego determinar su peso y volumen en base a la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{MS \text{ (gr)}}{V \text{ (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

MS = Peso seco del terrón

V = Volumen

Porcentaje Porosidad total (Pt %)

La porosidad total del suelo fue determinada mediante la siguiente fórmula:

$$P = [1 - (D_a / D_r) * 100]$$

Donde:

P= porosidad expresada en porcentaje (%)

Da= densidad aparente del suelo (g/cm^{-3}).

Dr= densidad real del suelo (g/cm^{-3}).

(Sandoval *et al.*, 2012)

Humedad aprovechable (HA)

Determinada mediante la cámara hídrica en tensiones de 1/3 y 15 atmosferas, para determinar capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Sandoval *et al.*, 2012). A partir de esta información se calcula la HA, utilizando la siguiente fórmula:

$$HA=(CC-PMP)\div 100*Da*z$$

Donde:

HA = altura de agua (cm)

CC = capacidad de campo (% hbss)

PMP = punto de marchitez permanente (% hbss)

Da = densidad aparente del suelo ($\text{g} / \text{cm}^{-3}$)

z = profundidad de suelo involucrada (cm)

Conductividad Hidráulica Saturada (Ks)

La conductividad hidráulica saturada (Ks) se determinó a través del método del permeámetro de carga constante, según la metodología descrita por Forsythe (1975). Este método consiste en medir el caudal de agua que fluye a través de una muestra de suelo saturada, bajo condiciones de carga constante.

La conductividad hidráulica saturada (Ks) fue calculada mediante la siguiente ecuación:

$$Ks = \frac{Q * L}{A * H}$$

Donde:

Ks = conductividad hidráulica saturada (L / T^{-1})

Q = caudal ($\text{L}^3 / \text{T}^{-1}$)

L = largo de la muestra de suelo (L)

A = área del cilindro (L^2)

$H = L + h =$ carga de agua (L)

$h =$ altura de agua sobre la muestra (L)

Materia orgánica

Determinada mediante la técnica de digestión de humedad, la cual consiste en una oxidación de la materia orgánica con una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico, luego de la reacción el cromato reducido se mide colorimétricamente (Sadzawka *et al.*, 2006).

Modelo de índice de calidad

Para la evaluación de calidad del suelo Andisol sometido a los distintos tratamientos se utilizó el modelo “Indicador de Calidad de Suelos (ICS)” desarrollado por Sandoval *et al.*, (2020), evaluando ocho parámetros físicos: materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), macro agregados (MAC), micro agregados (MIC), diámetro peso medio (DPM).

Análisis estadístico

Los resultados fueron sometidos al análisis estadístico de varianza (ANDEVA) y test de comparación de medias DMS (diferencia mínima significativa) con 95 % de nivel de significancia ($\alpha = 0,05$). Para verificar la normalidad de los datos se realizó la prueba de Shapiro-Wilks y la homogeneidad de datos será verificada mediante el Test de Levene. El programa estadístico computacional utilizado fue Infostat.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físicos

Los resultados de los parámetros físicos evaluados para los distintos tratamientos se presentan en la Tabla 2

Efecto de los tratamientos sobre la organización Estructural del suelo. En relación a los indicadores referidos al tamaño y estabilidad de los agregados (macroagregados (MAC), microagregados (MIC) y diámetro peso medio (DPM) del suelo), los resultados para los distintos tratamientos (Tabla 2) presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre ellos, siendo el tratamiento con solo lombrices (TL) el que presento un mayor contenido de macroagregados (90,26 %), resultando significativamente superior ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos, esto podría explicarse por la actividad biológica de las lombrices, quienes contribuyen a la

agregación del suelo principalmente mediante la producción de heces y la excavación (Edwards y Bohlen, 1996), ya que la mezcla de partículas orgánicas y minerales en el intestino de las lombrices crea condiciones propicias para la formación de agregados (Shipitalo y Protz, 1989).

Tabla 2. Valores medios parámetros físicos, macroagregados (MAC), microagregados (MIC), diámetro peso medio (DPM) densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), humedad aprovechable (HA) y conductividad hidráulica (Ks) evaluados para los diferentes tratamientos.

Tratamientos*	MAC %	MIC %	DPM cm	Da Mg m ⁻³	Pt %	HA cm	Ks cm/h
T0	72,0 cb	5,7 b	0,8 c	1,3 a	49,0 b	13,1 c	2,0 c
TB	65,6 c	2,5 c	0,8 cb	1,3 a	47,6 c	13,0 c	1,1 d
TBL	78,1 b	4,9 b	0,9 b	1,3 a	49,5 b	14,16 b	2,3 b
TL	90,26 a	7,7 a	1,1 a	1,2 b	53,1 a	18,76 a	4,3 a
DMS	7,16	1,09	0,08	0,08	0,67	0,19	0,08
CV (%)	3,31	7,35	3,17	2,24	0,47	0,46	1,18

*T0= tratamiento control; TB= tratamiento con biochar; TBL= tratamiento biochar/lombrices; TL= tratamiento con lombrices. Materia orgánica (MO) DMS= diferencia mínima significativa, CV= coeficiente de variación. Letras distintas en columnas indican diferencia estadística significativa, $P \leq 0,05$. DMS= diferencia mínima significativa, CV= coeficiente de variación

Respecto al tratamiento combinado con lombrices y biochar (TBL) también se observó un incremento en el contenido de macroagregados (78,1 %) respecto al tratamiento control (T0) (72,0 %), lo que sugiere un efecto positivo de la combinación de estos dos factores en la estructura del suelo. Sin embargo, el tratamiento con solo biochar (TB) resultó en una disminución significativa en el contenido de macroagregados en comparación con el tratamiento control (T0), una posible explicación para este resultado es que la aplicación de biochar alteró la estructura del suelo de manera negativa, lo que llevó a una disminución en la formación de macroagregados, por lo que estos resultados sugieren que el biochar puede no ser suficiente por sí solo para mejorar la formación de agregados y que su efectividad

puede depender de la combinación con otros factores, como la presencia de lombrices, que pueden potenciar su efecto positivo en la estructura del suelo.

En cuanto al contenido de microagregados, es relevante mencionar que el suelo utilizado en este experimento corresponde a un Andisol, el cual posee una estructura moderadamente estable, como se evidencia en el tratamiento control (T0) con un contenido de microagregados de 5,7 %. Sin embargo, es importante destacar que los Andisoles son suelos volcánicos caracterizados por su baja densidad aparente y alta porosidad, lo que los hace propensos a la erosión y compactación (Shoji *et al.*, 1994). En base a los resultados obtenidos del tratamiento control, el tratamiento con lombrices (TL) mostró un aumento significativo en la formación de microagregados, alcanzando un contenido de 7,7 %, lo que sugiere que la actividad de las lombrices puede mejorar significativamente la estructura del suelo al promover la agregación de partículas y formación de microagregados a través de la ingestión y procesamiento de materia orgánica y minerales (Fonte *et al.*, 2012). Por otro lado, el tratamiento con solo biochar (TB) presentó un contenido de microagregados de 2,5 %, lo que indica que, bajo las condiciones de este experimento, el biochar por sí solo no presentó un efecto positivo en la formación de microagregados en el corto plazo, lo cual podría deberse a distintos factores como la necesidad de un período más prolongado de estudio para interactuar con los componentes del suelo y promover cambios significativos en la estructura del suelo. De acuerdo con Lehmann *et al.*, (2011), el biochar podría mejorar la estructura del suelo a largo plazo.

Respecto a los resultados del DPM el cual es un indicador de la estabilidad estructural del suelo, y donde valores más altos reflejan una mayor resistencia a la disgregación (Tisdall y OADES, 1982), el tratamiento con lombrices (TL) presentó el mayor valor (1,1 cm), lo que indica una mejor estabilidad estructural en comparación con el tratamiento control (0,8 cm), esto señalaría un importante efecto que favorecería la organización estructural de estos suelos de origen volcánicos cuya estabilidad de los agregados se considera débil o frágil (Sandoval *et al.*, 2007), de igual manera el tratamiento con lombrices y biochar (TBL) presentó un aumento (0,9 cm), lo que indicaría que la combinación de lombrices y biochar podría mejorar

las propiedades estructurales del suelo. Sin embargo, el tratamiento solo biochar no logró mostrar un mejor resultado respecto al control (0,8 cm), lo que sugiere que el biochar solo podría no ser suficiente para mejorar la estabilidad de los agregados en el corto plazo (Glaser *et al.*, 2002), por lo cual los resultados en cuanto a los indicadores relacionados a la organización estructural indican que la aplicación de lombrices (TL) es el tratamiento más efectivo para mejorar la estabilidad estructural del suelo, promoviendo la formación de agregados y aumentando el diámetro peso, este efecto se debe principalmente a la acción combinada de la alimentación y la bioturbación que realizan las lombrices al consumir partículas minerales y materia orgánica, generando excretas denominadas coprolitos, los cuales al ser depositados en el suelo, contribuyen a la formación de agregados estables mediante diversos mecanismos físicos y biológicos de estabilización. La combinación de lombrices y biochar (TBL) también generó beneficios en la estabilidad del suelo, presentando mejoras respecto al tratamiento control, por lo que la presencia de lombrices pareciera haber mitigado de alguna manera los efectos negativos del biochar, favoreciendo la integración de este material en el suelo, aunque en menor medida, ya que los valores permanecen por debajo del tratamiento con solo lombrices (TL). Por otro lado, el tratamiento con biochar (TB) no generó mejoras significativas en la estructura del suelo; por el contrario, mostró una disminución en el contenido de agregados estables, registrando los valores más bajos entre todos los tratamientos. Estos resultados sugieren que, en condiciones con baja o nula actividad biológica, la aplicación de biochar puede tener efectos desfavorables sobre la estabilidad estructural del suelo, lo que podría coincidir con estudios que destacan la importancia de la actividad biológica en la formación de agregados del suelo y sugieren que la aplicación de biochar debe acompañarse de otras prácticas biológicas para potenciar sus efectos positivos (Lehmann *et al.*, 2011).

Efecto de los tratamientos sobre la densidad aparente (Da) y porosidad total del suelo (Da). El espacio poroso del suelo fue evaluado mediante Densidad Aparente (Da) y porcentaje de Porosidad total (Pt), los cuales son indicadores claves en la calidad física del suelo, ya que influyen en la disponibilidad de agua y oxígeno para las plantas (Hamza y Anderson, 2005), por lo que un suelo con menor densidad

aparente y mayor porosidad facilita el crecimiento radicular, mejora la infiltración del agua y reduce el riesgo de compactación. En general son valores elevados para el tipo de suelo (Andisol), esto podría deberse al manejo histórico de estos, con labranza tradicional durante muchos años, ya que los valores normales según el orden Andisol no debieran sobrepasar $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ (Nachtergaele, 2001), esto corrobora que la calidad física de este suelo se ha visto afectada. Sin embargo, el tratamiento con lombrices (TL) resultó significativamente con una menor densidad aparente ($1,2 \text{ g m}^{-3}$), en comparación con el tratamiento control (T0), el tratamiento con solo biochar (TB) y la combinación de lombrices y biochar (TBL), los cuales mantuvieron valores similares ($1,3 \text{ g m}^{-3}$). Este efecto positivo del tratamiento con lombrices puede atribuirse a la forma en que reorganizan la estructura del suelo mientras se abren paso a través de él, es decir, ingiriendo y excretando suelo y material orgánico, mientras que las ingestiones crean macro poros adicionales, la egestión no solo llena partes de estos poros, sino que también modifica la densidad aparente del suelo a través de la incorporación de material orgánico al suelo (Sharma *et al.*, 2017). Por otro lado, el biochar por sí solo (TB) no mostró diferencias significativas en la densidad aparente del suelo con respecto al control, lo que sugiere que su efecto sobre la estructura del suelo podría requerir más tiempo o condiciones específicas para manifestarse (Lehmann *et al.*, 2011).

Los resultados sobre la porosidad total muestran diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos evaluados, donde el suelo tratado con lombrices (TL) presentó el mayor valor de porosidad total (53,1 %), lo que confirma la contribución positiva de las lombrices en la formación de poros y la mejora de la estructura del suelo, promoviendo la porosidad a través de la formación de madrigueras y al incrementar la proporción de agregados del suelo. En cambio, el tratamiento con solo biochar mostró la menor porosidad (47,6 %), incluso por debajo del tratamiento control (49,0 %), esto sugiere que el biochar, en ausencia de actividad biológica, puede no generar mejoras inmediatas en la porosidad del suelo y que, en algunos casos, puede incluso reducirla si la distribución del material en el perfil del suelo no es homogénea (Glaser *et al.*, 2002). Sin embargo, cuando el biochar se aplicó junto con lombrices (TBL), la porosidad aumentó (49,5 %), aunque sin diferencias

significativas con el tratamiento control, esto refuerza la idea que el biochar puede necesitar la interacción con organismos del suelo para ejercer un efecto positivo (Lehmann *et al.*, 2011), por lo que los resultados obtenidos indicarían que la actividad de las lombrices es fundamental para mejorar la estructura del suelo a corto plazo, promoviendo una menor densidad aparente y una mayor porosidad total. En cambio, el biochar, si bien es reconocido por su potencial para mejorar las propiedades del suelo, parece no generar mejoras inmediatas en la densidad y porosidad sin la presencia de organismos biológicos que faciliten su incorporación y distribución (Lehmann *et al.*, 2011).

Efecto de los tratamientos sobre los parámetros de humedad aprovechable (HA) y conductividad hidráulica (Ks). Los resultados obtenidos sobre la humedad aprovechable (HA) y la conductividad hidráulica del suelo (Ks) evidencian diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos evaluados, el tratamiento control (T0) presentó valores intermedios de HA (13,1 cm) y Ks ($2,0 \text{ cm} / \text{h}^{-1}$), lo que indica que el suelo mantiene una capacidad limitada para retener e infiltrar agua de manera eficiente, lo que demuestra claramente que las propiedades físicas de este suelo se han modificado de manera negativa, ya que los suelos del orden Andisol se caracterizan por tener una humedad aprovechable moderada a alta (Taxonomy, 2014), dentro de los tratamientos se observa el efecto positivo del tratamiento con lombrices, el cual presentó la mayor humedad aprovechable (18,76 cm) y conductividad hidráulica más alta ($4,3 \text{ cm} / \text{h}^{-1}$), lo que sugiere que la actividad biológica de las lombrices mejora la porosidad del suelo y su capacidad de retención de agua, promoviendo la formación de agregados estables y creación de bioporos, los cuales facilitan la infiltración y el almacenamiento de agua en el perfil del suelo (Lavelle *et al.*, 2006), El tratamiento combinado con lombrices y biochar (TBL) presentó un aumento en la humedad aprovechable (14,16 cm) en comparación con el control, aunque menor que el tratamiento solo con lombrices. Además, la conductividad hidráulica ($2,3 \text{ cm} / \text{h}^{-1}$) fue significativamente mayor que la del control y el tratamiento con biochar, pero menor que la del tratamiento con lombrices. Estos resultados indican que la combinación de ambos tratamientos genera un efecto intermedio, donde la acción de las lombrices mejora la estructura del suelo y la

infiltración de agua, pero el biochar podría estar limitando este efecto, ya que el tratamiento con biochar (TB) no mostró mejoras en la humedad aprovechable en comparación con el tratamiento control (T0), presentando un valor de 13,0 cm, mientras que la conductividad hidráulica disminuyó a 1,1 cm / h⁻¹. si bien el biochar es utilizado para mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, algunos investigadores han descubierto que la aplicación de algunos tipos de biochar tienen un cierto efecto negativo generando una disminución en la permeabilidad del suelo al obstruir los poros, además dependiendo de su materia prima y temperatura de pirolisis, podría aumentar la repelencia del agua y reducir la capacidad de retención del suelo (Lin *et al.*, 2024).

Contenido Materia Orgánica (MO). Corresponde a un indicador clave de la calidad del suelo, ya que participa en procesos esenciales como estructura, retención de agua y actividad biológica (Nieder y Benbi, 2008). En este experimento, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el contenido de MO entre los tratamientos aplicados, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores medios de contenido de materia orgánica (MO) evaluados para los diferentes tratamientos.

Tratamientos*	MO(%)
T0	4,5 c
TB	5,6 b
TBL	5,9 ba
TL	6,3 a
DMS	0,5
CV (%)	3,21

*T0= tratamiento control; TB= tratamiento con biochar; TBL= tratamiento biochar/lombrices; TL= tratamiento con lombrices. Letras distintas en columnas indican diferencia estadística significativa, $P \leq 0,05$, Materia orgánica (MO) DMS= diferencia mínima significativa, CV= coeficiente de variación

El tratamiento con lombrices (TL) presentó el mayor contenido de MO (6,3 %), seguido por el tratamiento combinado con biochar y lombrices (TBL) con un (5,9 %), y el tratamiento con biochar (TB) con un (5,6 %), en comparación con el tratamiento

control (T0) que registró el valor más bajo (4,5 %). Por lo que estos resultados indican que los tratamientos utilizados, especialmente aquellos que incluyen lombrices, favorecen la acumulación de MO en este suelo Andisol. El efecto observado en el tratamiento con lombrices (TL) puede atribuirse al rol que estos organismos desempeñan en la dinámica de la materia orgánica del suelo. A través de su actividad biológica, las lombrices fragmentan, ingieren y mezclan residuos orgánicos con partículas minerales, lo que favorece su descomposición y transformación en compuestos más estables. Durante su proceso digestivo, además, liberan sustancias mucilaginosas y húmicas que promueven la formación de agregados estables, los cuales protegen la materia orgánica frente a la rápida mineralización y permiten su acumulación en el perfil edáfico (Edwards y Arancon, 2022).

Índice de calidad física de suelos (ICFS). El Índice de Calidad Física del Suelo (ICFS) es una herramienta que permite evaluar el estado físico del suelo considerando varios parámetros. Este índice entrega una visión general del comportamiento del suelo frente a distintos manejos, ayudando a la toma de decisiones. Para el cálculo del ICFS, fueron considerados los valores de los parámetros físicos evaluados, comparándolos con niveles de referencia descritos por Sandoval *et al.*, (2020), y los valores finales se presentan en la Tabla 4.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tratamiento control (T0) presentó un ICFS total de 7, clasificado como “baja” calidad física, evidenciando un suelo con limitaciones en propiedades fundamentales para su funcionamiento óptimo. Este mismo valor se mantuvo en el tratamiento con biochar (TB), lo que indica que, bajo las condiciones de este experimento y en el corto plazo, la aplicación exclusiva de biochar no fue suficiente para mejorar la calidad física del suelo. Este resultado coincide con lo reportado por Blanco-Canqui (2017), quien señala que los efectos del biochar sobre las propiedades físicas del suelo pueden requerir más tiempo para manifestarse, y dependen fuertemente de factores como la textura del suelo, el tipo de biochar y su interacción con la biota edáfica.

Por el contrario, el tratamiento con lombrices (TL) mostró un ICFS total de 11, el cual se clasifica como “calidad media”, lo que representa una mejora significativa en

comparación con el tratamiento control. Este aumento demuestra que la incorporación de lombrices tiene un impacto significativo en la calidad física del suelo en el corto plazo, debido a la capacidad que poseen para mejorar la estructura del suelo, aumentar la porosidad y la infiltración de agua, y promover la formación de agregados estables (Lavelle *et al.*, 2006).

Tabla 4. Índice de calidad física de suelos (ICFS) total, de acuerdo a los parámetros físicos evaluados.

ICFS Total tratamientos evaluados.				
	T0	TB	TBL	TL
MO	-1	1	1	1
Da	-1	-2	-1	-1
Pt	-2	-2	-2	-2
MAC	3	3	3	3
MIC	3	3	3	3
DPM	1	1	1	2
AWP	2	2	2	3
Ks	2	1	2	2
TOTAL	7	7	9	11
Calidad física	baja	baja	baja	media

MO: materia orgánica; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; MAC: macroagregados; MIC: microagregados; DPM= diámetro peso medio; AWP: altura de agua aprovechable o HA; Ks= conductividad hidráulica. T0= control; TB= tratamiento con biochar; TBL = tratamiento mezcla biochar/lombrices; TL= tratamiento con lombrices

CONCLUSIONES

1. Según los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que el uso de lombrices de la especie *Aporrectodea caliginosa* mejoró significativamente las propiedades estructurales de un suelo Andisol en el corto plazo, mientras que el tratamiento con biochar no generó cambios significativos. Estos resultados indican que la incorporación de lombrices,

solas o en conjunto con biochar, constituye una estrategia eficaz para mejorar la estructura de suelos Andisoles.

2. Según los resultados obtenidos, se puede concluir que el ICFS indica que la aplicación de biochar no logró modificar la condición de baja calidad física observada en el tratamiento control. Sin embargo, el tratamiento con lombrices permitió mejorar significativamente el índice, elevando la calidad del suelo de “baja” a “media” en el corto plazo, lo que evidencia su efectividad como estrategia de mejoramiento de la calidad física del suelo.

REFERENCIAS

1. Blanchart, E., Albrecht, A., Alegre, J., Duboisset, A., Gilot, C., Pashanasi, B., Lavelle, P., & Brussaard, L. (1999). Effects of earthworms on soil structure and physical properties. *Earthworm management in tropical agroecosystems*, 5, 149-171.
2. Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
3. Bohlen, P. (1996). *Biology and ecology of earthworms*. Chapman & Hall.
4. Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and tillage research*, 146, 118-124.
5. Brunel, N., & Seguel, O. (2011). Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro sur*, 39(1), 1-12.
6. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., & Mäder, P. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
7. Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102.
8. Crossland, N. O., & La Point, T. W. (1992). The design of mesocosm experiments. In (Vol. 11, pp. 1-4): Wiley Online Library.
9. Di, W., Yanfang, F., Lihong, X., Manqiang, L., Bei, Y., Feng, H., & Linzhang, Y. (2019). Biochar combined with vermicompost increases crop production while reducing ammonia and nitrous oxide emissions from a paddy soil. *Pedosphere*, 29(1), 82-94.

10. Edwards, C., & Bohlen, P. (1996). *Biología y ecología de las lombrices de tierra*. In: Londres: Chapman y Hall.
11. Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). The use of earthworms in organic waste management and vermiculture. In *Biology and ecology of earthworms* (pp. 467-527). Springer.
12. Fonte, S. J., Quintero, D. C., Velásquez, E., & Lavelle, P. (2012). Interactive effects of plants and earthworms on the physical stabilization of soil organic matter in aggregates. *Plant and soil*, 359, 205-214.
13. Forsythe, W. (1975). *Manual de Laboratorio, Física de Suelos* (Vol. 25). Bib. Orton IICA/CATIE.
14. García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes*, 35(2), 125-138.
15. Garvín, M. H., Martínez, F., Jesús, J. B., Gutiérrez, M., Ruiz, P., & Cosín, D. J. D. (2001). Effect of *Hormogaster elisae* (Oligochaeta; Hormogastridae) on the stability of soil aggregates. *European journal of soil biology*, 37(4), 273-276.
16. Ghezzehei, T. A. (2023). Aggregation. In M. J. Goss & M. Oliver (Eds.), *Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)* (pp. 8-15). Academic Press.
17. Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and fertility of soils*, 35, 219-230.
18. Guhra, T., Stolze, K., & Totsche, K. U. (2022). Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 164, 108483.
19. Hamza, M., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 82(2), 121-145.
20. Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 144(1), 175-187.
21. Karlen, D., Andrews, S., & Doran, J. (2001). Soil quality: Current concepts and applications.

22. Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 425-442.
23. Klute, A., & Page, A. L. (1986). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods; Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc.
24. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.
25. Lal, R. (2017). Soil Conservation☆. In *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier.
26. Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S. b., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European journal of soil biology*, 42, S3-S15.
27. Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). Soil organisms. *Soil ecology*, 201-356.
28. Lee, K., & Foster, R. (1991). Soil fauna and soil structure. *Soil Research*, 29(6), 745-775.
29. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
30. Lin, Y., Cai, Q., Chen, B., & Garg, A. (2024). A review of the negative effects of biochar on soil in green infrastructure with consideration of soil properties. *Indian Geotechnical Journal*, 1-15.
31. Liu, T., Cheng, J., Li, X. D., an Shao, M., Jiang, C., Huang, B., Zhu, X. C., Huang, S. H., & Huang, Y. L. (2021). Effects of earthworm (*Amyntas aspergillum*) activities and cast mulching on soil evaporation. *Catena*, 200, 105104.
32. López, A. J. (2006). Manual de edafología. *Sevilla, España: Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla*.
33. Nachtergaele, F. (2001). Soil taxonomy—a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Geoderma*, 99, 336-337.
34. Peng, J., Yang, Q., Zhang, C., Ni, S., Wang, J., & Cai, C. (2023). Aggregate pore structure, stability characteristics, and biochemical properties induced by different cultivation durations in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and tillage research*, 233, 105797.

35. Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., & Fritze, H. (2000). Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 89(2), 231-242.
36. Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Poch Claret, R. M. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos*. Ediciones Mundi-Prensa.
37. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137.
38. Ríos, Y. (2005). Importancia de las lombrices en la agricultura. *Sistemas integrados de*, 1-6.
39. Sadzawka, R. A., Carrasco, R. M. A., Grez, Z. R., Mora, M. L., la, L., Flores, P. H., & Neaman, A. (2006). Metodos recomendados para los suelos de Chile. *Serie Actas INIA*, 34, 1-164.
40. Sandoval, E., Dorner, F., Seguel, S., Cuevas, B., & Rivera, S. (2012). Métodos de análisis físicos del suelo.
41. Sandoval, M. A., Stolpe, N. B., Zagal, E. M., & Mardones, M. (2007). The effect of crop-pasture rotations on the C, N and S contents of soil aggregates and structural stability in a volcanic soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 57(3), 255-262.
42. Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., & Benham, E. C. (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Government Printing Office.
43. Sharma, D., Tomar, S., & Chakraborty, D. (2017). Role of earthworm in improving soil structure and functioning. *Current Science*, 1064-1071.
44. Shipitalo, M. J., & Protz, R. (1989). Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma*, 45(3), 357-374.
45. Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1994). *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization* (Vol. 21). Elsevier.
46. Singh, O., Shahi, U. P., Dutta, D., Rajput, V. D., & Singh, A. (2024). Strategic Tillage for Improved Soil Health and Nutrient Dynamics. *Strategic Tillage and Soil Management-New Perspectives*.
47. Stolpe, N. B. (2006). *Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile* (Vol. 1). Universidad de Concepción Chillán.
48. Taxonomy, S. (2014). Keys to soil taxonomy. In: USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

49. Tisdall, J. M., & OADES, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33(2), 141-163.
50. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and soil*, 327, 235-246.
51. Vasu, D., Tiwary, P., & Chandran, P. (2024). A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. *Soil and tillage research*, 244, 106246.
52. Xiong, X., He, M., Dutta, S., & Tsang, D. C. (2022). Biochar and sustainable development goals. In *Biochar in Agriculture for Achieving Sustainable Development Goals* (pp. 15-22). Elsevier.
53. Yudina, A., & Kuzyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*, 434, 116478.