

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Departamento de Ambiente y Desarrollo

Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación

**Efecto de la labranza cero y *Mucuna pruriens* como cultivo de
cobertura sobre las características físicas del suelo y el rendimiento del
maíz**

Estudiante

Jamael Josiah Chan Sosa

Asesores

Ricardo Alexander Peña Venegas, Ph.D.

Rony Francisco Muñoz Molina, M.Sc.

Honduras, agosto 2025

Autoridades

KEITH ANDREWS

Rector i.a

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora de Departamento Ambiente y Desarrollo

JULIO NAVARRO

Secretario General

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Laboratorio de Suelos de la Universidad Zamorano por brindar el espacio, los equipos y el respaldo técnico necesarios para el desarrollo de este estudio. Asimismo, agradezco a la Unidad de Agricultura Regenerativa por su colaboración en la ejecución de las actividades de campo, cuyo apoyo fue indispensable para la recopilación de datos confiables y representativos.

Contenido

Agradecimientos	3
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Metodología.....	14
Sitio de Estudio	14
Diseño y Establecimiento de Estudio	14
Propiedades Físicas	17
Densidad Aparente	17
Densidad Real	17
Porosidad Total	18
Resistencia a la Penetración	19
Estabilidad Estructural	19
Estado de Agregación	20
Crecimiento de Maíz	21
Rendimiento de Grano.....	21
Análisis Estadístico	21
Resultados y Discusión.....	23
Conclusiones	41
Recomendaciones.....	42

Referencias..... 43

Anexos..... 47

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Descripción de los tratamientos en función del sistema de labranza y cultivo de cobertura para determinar el efecto sobre el suelo y desarrollo del cultivo de maíz.....	15
Cuadro 2 Clasificación diámetro medio ponderado	20

Índice de Figuras

Figura 1 Delimitación del sitio de estudio en el campus de la Universidad Zamorano	14
Figura 2 Distribución espacial del diseño experimental con parcelas divididas según tipo de labranza y manejo de cobertura	16
Figura 3 Efecto de cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre densidades y porosidad total	23
Figura 4 Efecto de sistemas de labranza sobre densidades y porosidad total	25
Figura 5 Efecto de sistema de labranza y cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre densidades y porosidad total.....	26
Figura 6 Efecto de cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre la resistencia a la penetración.....	28
Figura 7 Efecto de sistema de labranza sobre la resistencia a la penetración	30
Figura 8 Efecto de sistema de labranza y cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre la resistencia a la penetración.....	31
Figura 9 Efecto de cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre los agregados del suelo	32
Figura 10 Efecto de sistema de labranza sobre los agregados del suelo.....	33
Figura 11 Efecto de sistema de labranza y cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre los agregados del suelo	34
Figura 12 Efecto de cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra	35
Figura 13 Efecto de sistema de labranza sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra	36
Figura 14 Efecto de sistema de labranza y cobertura de <i>Mucuna pruriens</i> sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra	37
Figura 15 Efecto de cobertura <i>Mucuna pruriens</i> sobre el rendimiento de maíz.....	38
Figura 16 Efecto de sistema de labranza sobre el rendimiento de maíz	39
Figura 17 Efecto de labranza y cobertura <i>Mucuna pruriens</i> sobre el rendimiento.....	40

Índice de Anexos

Anexo A Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Cero con Cobertura	47
Anexo B Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Cero sin Cobertura	48
Anexo C Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Convencional con Cobertura	49
Anexo D Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Convencional sin Cobertura	50
Anexo E Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Labranza con Cobertura	51
Anexo F Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Cobertura	52
Anexo G Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Labranza.....	53
Anexo H Resultado del análisis de varianza para densidad aparente y densidad real.....	54
Anexo I Resultado del análisis de varianza para Porosidad total y resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad	55
Anexo J Resultado del análisis de varianza para resistencia a la penetración a 20 cm y resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad	56
Anexo K Resultado del análisis de varianza para estabilidad estructural estado de agregación de agregados del suelo	57
Anexo L Resultados de análisis de varianza para crecimiento de maíz: altura de planta y numero de hojas.....	58
Anexo M Resultados de análisis de varianza para rendimiento de maíz.....	59

Resumen

La salud del suelo es clave para mantener la productividad agrícola, ya que regula procesos físicos, químicos y biológicos que controlan la disponibilidad de nutrientes, la retención de agua y la estabilidad estructural del sistema. Se evaluó el efecto individual y la interacción entre dos sistemas de labranza (cero y convencional) y el uso de *Mucuna pruriens* como cultivo de cobertura sobre propiedades físicas del suelo. El experimento se estableció bajo un diseño de parcelas divididas, en condiciones de trópico seco. Las variables analizadas incluyeron densidades del suelo, porosidad, resistencia a la penetración, estabilidad estructural, estado de agregación, crecimiento vegetativo y rendimiento. El uso de *Mucuna pruriens* no generó diferencias significativas en las propiedades físicas del suelo ni en el rendimiento del cultivo. Además, se observó una menor altura en las plantas de maíz en comparación con la parcela sin cultivo de cobertura, donde crecieron malezas de la familia de las gramíneas, las cuales presentan una mayor relación carbono nitrógeno. La labranza cero aumentó el diámetro medio ponderado y el estado de agregación, indicando mayor estabilidad. Por otro lado, la labranza convencional disminuyó la densidad aparente de forma temporal y favoreció un mayor rendimiento de *Zea mays L.*, atribuido a mejores condiciones físicas para la emergencia y el desarrollo radicular inicial. No se detectaron efectos sinérgicos por la interacción entre labranza y cobertura sobre las propiedades físicas. Los resultados indican que la adopción de prácticas regenerativas requieren continuidad para inducir cambios físicos sostenidos y, que su impacto agronómico inmediato depende de la condición inicial del suelo y del contexto de manejo.

Palabras clave: Compactación, estabilidad estructural, sistema de labranza

Abstract

Soil health is essential for sustaining agricultural productivity, as it regulates physical, chemical, and biological processes that control nutrient availability, water retention, and structural stability. This study evaluated the individual and combined effects of two tillage systems, no-till and conventional, and the use of *Mucuna pruriens* as a cover crop on soil physical properties. The experiment followed a split-plot design under dry tropical conditions. Variables analyzed included bulk density, porosity, penetration resistance, aggregate stability, water stable aggregate, vegetative growth, and yield. The use of *Mucuna pruriens* did not significantly affect soil physical properties or maize yield, and plant height was lower in plots with *Mucuna* compared to those without cover, where natural weeds, mainly grasses with higher carbon to nitrogen ratios, were dominant. No-till increased mean weight diameter and aggregation state, indicating improved structural stability. In contrast, conventional tillage temporarily reduced bulk density and resulted in higher yield, likely due to better physical conditions for seedling emergence and early root development. No significant interaction effects between tillage and cover crop were detected on soil properties. The findings suggest that regenerative practices such as no-till and cover cropping require long-term implementation to produce sustained physical improvements, and their immediate agronomic outcomes depend on the initial condition of the soil and specific management context.

Keywords: Compaction, structural stability, tillage system

Introducción

La agricultura convencional es el sistema de producción más predominante a nivel mundial; considerada una consecuencia natural de la Revolución verde de Norman Borlaug (Durham y Mizik, 2021). Este sistema se puede definir como una producción a gran escala altamente mecanizada para la preparación del suelo, utilizando insumos para mejorar el rendimiento de un cultivo en específico (Sumberg y Giller, 2022). Este sistema de producción es altamente productivo, pero a costo de la degradación del suelo causado por parte de las prácticas agrícolas convencionales. Estas prácticas convencionales tienden a dejar el suelo descubierto durante largos periodos del año, lo cual, tiene un impacto directo sobre la erosión de la capa superficial del suelo y la reducción de su contenido de materia orgánica del suelo (Gomiero, 2016). Por esta razón, han surgido sistemas de producción muchos más sostenibles como la agricultura regenerativa.

La agricultura regenerativa se enfoca en sistemas de producción agropecuaria que mejora la salud del suelo, su biodiversidad y ciclos naturales (Armas Vega, 2024). Tiene como objetivo devolver carbono al suelo, reciclar nutrientes, incrementar rendimientos e incrementar la resistencia a la inestabilidad climática. Practicantes de la agricultura regenerativa utilizan varias metodologías que involucran el uso de sistemas biológicos y ecosistémicos para mejorar la productividad y restaurar el suelo. Una de las prácticas que fomenta la agricultura regenerativa es la labranza cero, ya que puede incrementar la captura de carbono en el suelo. De acuerdo con Haddaway et al. (2017), la labranza cero aumenta significativamente los contenidos de carbono del suelo, en comparación con la labranza convencional. Sus resultados muestran este efecto particularmente entre los 0 – 30 cm, representando alrededor de 4.6 Mg/ha durante un periodo de al menos 10 años.

Otra práctica que fomenta la agricultura regenerativa es la cobertura del suelo, mediante el uso de plantas que generan gran cantidad de biomasa (van Eerd et al., 2023). Según McDaniel et al. (2014), agregar uno o más cultivos en rotación a un monocultivo puede aumentar el carbono total del

suelo en un 3.6% y el nitrógeno total en un 5.3%, pero cuando las rotaciones incluyen un cultivo de cobertura, el carbono puede aumentar en un 8.5% y el nitrógeno total en un 12.8%.

Los cultivos de cobertura suelen plantarse antes del cultivo principal para mejorar la productividad. Un buen cultivo de cobertura es una planta que germina y desarrolla su sistema foliar de manera rápida, es resistente a condiciones climáticas variables, resistente a plagas y enfermedades y capaz de fijar el nitrógeno atmosférico del aire (Koudahe et al., 2022). Por esta razón, las leguminosas son cultivos de cobertura comunes en la agricultura ya que poseen varias características particulares beneficiosas para la salud del suelo. Además, la cobertura vegetal es uno de los enfoques más eficientes para una mejor optimización del recurso hídrico, lo cual usualmente es un factor limitante en la productividad y rendimiento de los cultivos

La *Mucuna pruriens* conocido comúnmente como frijol terciopelo, es una planta leguminosa que pertenece a la familia fabácea. Se caracteriza por tener ramas largas y delgadas, hojas lanceoladas alternas y flores blancas con una corolla de color purpura azulada. La *Mucuna pruriens* también es conocida por su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, lo que la vuelve beneficiosa para la salud del suelo, y es tolerante a diversos tipos de estrés abiótico, como la sequía y baja fertilidad del suelo (Lampariello et al., 2012). De hecho, en un estudio realizado por Blanchart et al. (2006), revela que las parcelas de *Mucuna pruriens* mostró una mayor densidad de nemátodos beneficiosos que se alimentan de bacterias que suelen causar daño a las plantas. Estos cambios indican que *Mucuna pruriens* mejora la actividad biológica del suelo, lo cual es crucial para el ciclo de nutrientes y la supresión de plagas. La *Mucuna pruriens* tiene varios beneficios, sin embargo, no se ha estudiado como afecta las propiedades físicas del suelo.

El presente estudio busca evaluar el uso de prácticas de conservación de suelo tales como los cultivos de cobertura y la labranza cero, como una alternativa a la producción convencional, con el fin de reducir la degradación de recursos, especialmente el suelo. El presente estudio fue el cuarto experimento realizado en el lote en donde previamente lo han evaluado Barrios Bernal y Durón

Alvarado (2021), Chavarría Montenegro y Belloza Urbina (2022) y Flores Tapia y Huanca Terceros (2023). Durante tres años consecutivos de evaluación de propiedades físicas del suelo en el lote experimental de la Universidad Zamorano, se ha caracterizado el estado físico del suelo a 20 cm de profundidad mediante indicadores clave como resistencia a la penetración (RP), densidad aparente (ρ_b) y estabilidad estructural (DMP). Los valores de RP mostraron una tendencia creciente a lo largo del tiempo, pasando de 3.00 – 4.08 kg cm⁻² en el primer año hasta niveles máximos de 18.09 kg cm⁻² en el tercer año, en los lotes experimentales bajo labranza convencional. La ρ_b también se incrementó progresivamente, de valores bajos entre 0.83 y 0.86 g cm⁻³ en los primeros ciclos hasta rangos de 1.27 – 1.32 g cm⁻³ en el último año en el cual se evidenció compactación de suelo. Por su parte, la DMP se mantuvo constante en todos los tratamientos y ciclos, con valores entre 4.89 y 5.76 en una escala de 1 a 6, indicando buena resistencia de los agregados ante la degradación por efecto del agua. Estos resultados reflejan una evolución del suelo hacia una estructura más densa y menos permeable, especialmente en ausencia de cobertura.

El objetivo principal de la investigación es evaluar el efecto combinado de *Mucuna pruriens* como cultivo de cobertura y de dos sistemas de labranza sobre las características físicas del suelo. Los objetivos específicos son: i) evaluar el efecto de las prácticas de conservación de suelos aplicadas sobre la estabilidad estructural, estado de agregación, resistencia a la penetración, porosidad total y densidades del suelo; y, ii) determinar el efecto de las prácticas de conservación de suelos aplicadas sobre el crecimiento y rendimiento de maíz.

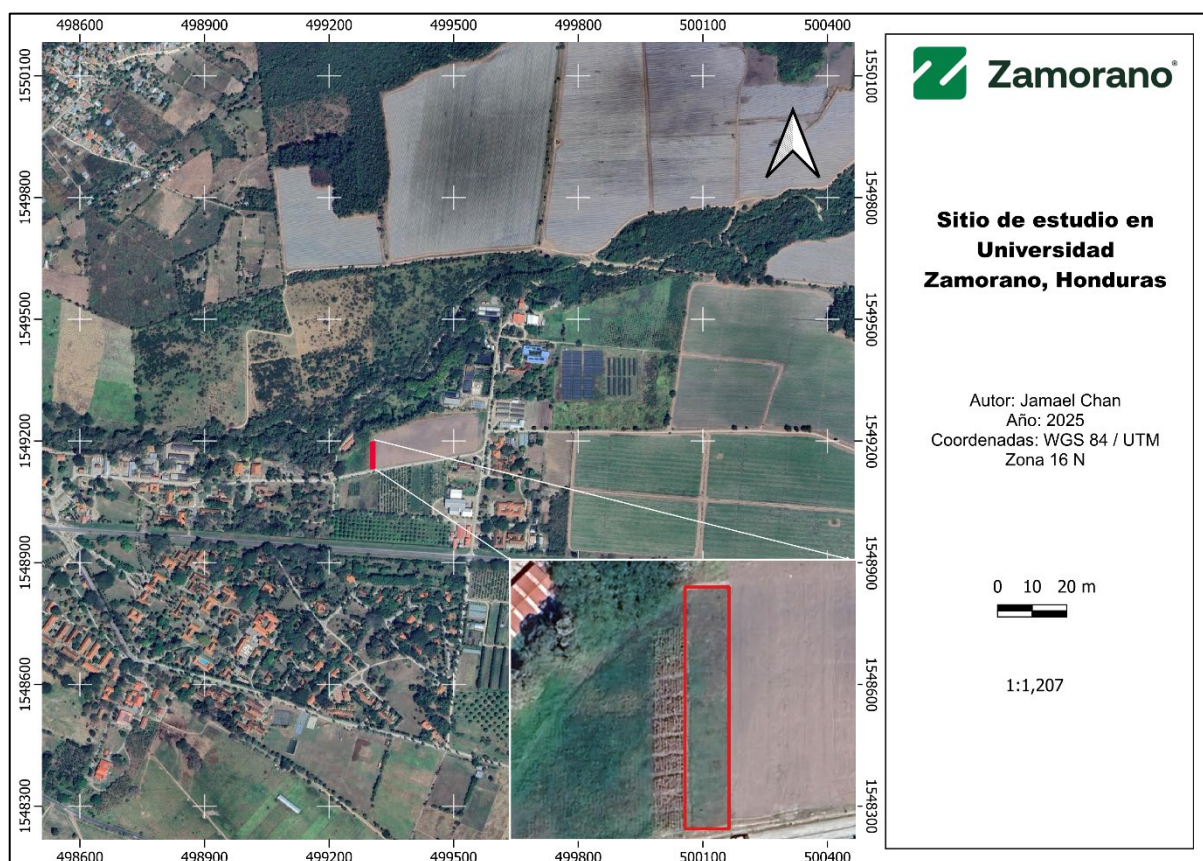
Metodología

Sitio de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano ubicada en el Valle del Yeguaré, municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, localizada a 30 km al este de Tegucigalpa, Honduras. Específicamente en un lote ubicado de forma cercana al área de frutales, tiene un área de 1,298.4 m² con una longitud de 60 m y 21.64 m de ancho (Figura 1).

Figura 1

Delimitación del sitio de estudio en el campus de la Universidad Zamorano



Diseño y Establecimiento de Estudio

Se utilizó un diseño de parcelas divididas. A partir de este, se analizaron dos factores: sistema de labranza y cultivo de cobertura. El lote se dividió verticalmente a la mitad, donde se estableció labranza cero en el lado izquierdo del lote y labranza convencional en el lado derecho. Posteriormente,

a partir de estas dos parcelas principales, se estableció cultivo de cobertura llamado *Mucuna pruriens*. A partir de la combinación del factor de sistema de labranza y el factor cultivo de cobertura *Mucuna pruriens* se generaron cuatro tratamientos: labranza cero con cobertura (LCero Con), labranza cero sin cobertura (LCero Sin), labranza convencional con cobertura (LConv Con) y labranza convencional sin cobertura (LConv Sin). El tratamiento de labranza convencional sin cobertura (LConv Sin) fue considerado como el tratamiento testigo (Cuadro 1).

Cuadro 1

Descripción de los tratamientos en función del sistema de labranza y cultivo de cobertura para determinar el efecto sobre el suelo y desarrollo del cultivo de maíz

Tratamiento Ω	Sistema de Labranza	Cultivo de Cobertura
LCero Con	Labranza Cero	Cobertura incorporada sobre el suelo
LCero Sin	Labranza Cero	Sin Cobertura
LConv Con	Labranza Convencional	Cobertura incorporada al suelo
LConv Sin	Labranza Convencional	Sin Cobertura

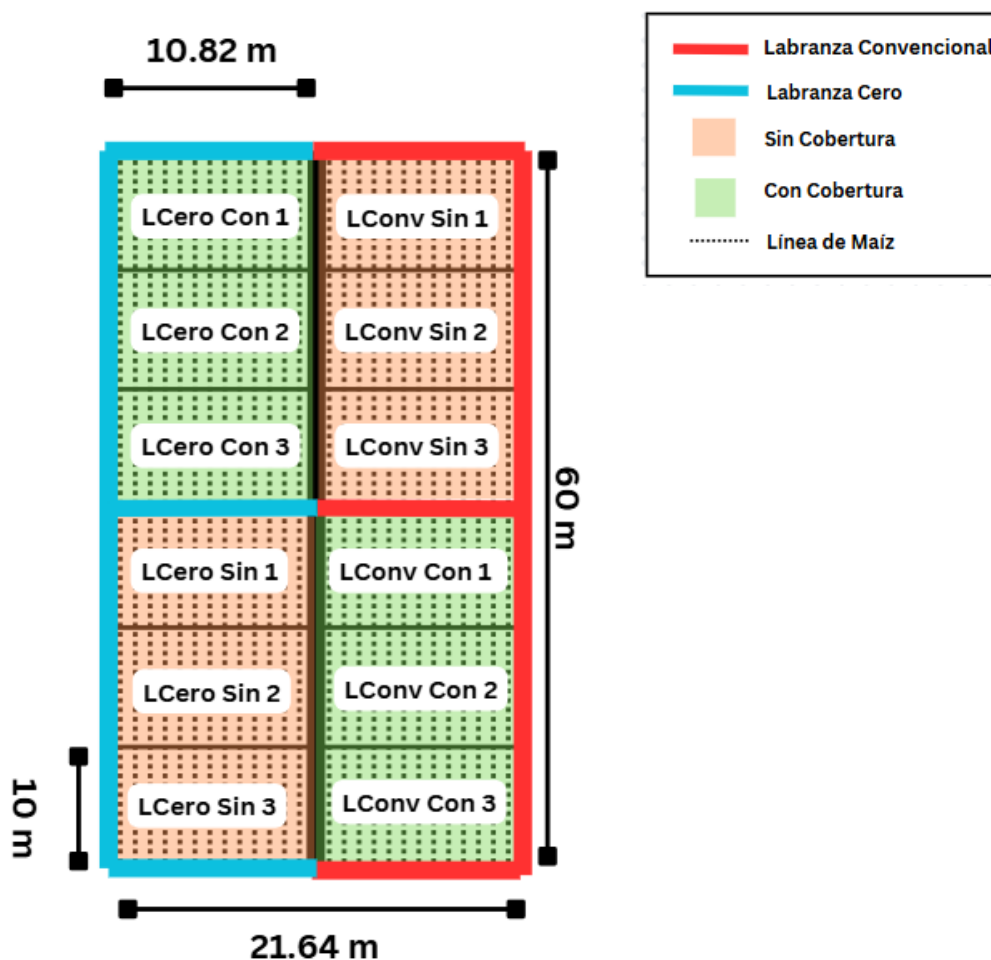
Nota. Ω LConv Con: Labranza convencional con cobertura, LConv Sin: Labranza convencional sin cobertura, LCero Con: Labranza cero con cobertura, LCero Sin: Labranza cero sin cobertura.

El experimento involucró dos fases generales. La primera fase implicó la siembra de la *Mucuna pruriens* en las áreas donde se realizaron los tratamientos (LCero Con) y (LCero Sin). La siembra de la *Mucuna pruriens* se realizó en septiembre de 2023 a 1.2 m de distancia entre hilera y 0.25 m de distancia entre planta teniendo una densidad de 33,333 plantas por hectárea y se cortó 90 días después de siembra (DDS), antes de la floración. La mucuna se incorporó mediante dos pases de rastra pesada en las áreas donde se realizó el tratamiento (LConv Con) mientras que el tratamiento (LCero Con) se dejó solamente en la superficie del suelo. La segunda fase consistió en establecer en el lote de estudio el cultivo de maíz de variedad Tuxpeño, el cual tiene polinización abierta. El lote se dividió en cuatro parcelas iguales teniendo 30 m de largo y 10.82 m de ancho con un área de 324.6 m² por tratamiento. Cada parcela se dividió en tres subparcelas generando tres repeticiones por tratamiento. Por lo cual, se tuvieron 12 unidades experimentales con dimensión de 10 m de ancho y 10.82 m de largo. En cada unidad experimental, se sembraron 13 líneas de maíz con distanciamiento entre planta

de 20 cm y 80 cm entre surco. Luego, se instaló un sistema de riego por goteo teniendo una cinta de goteo por cada línea de maíz. También se aplicaron dos herbicidas los cuales fueron Gesaprim® 90 WG y Prowler® 45.5 CS para reducir la cantidad de maleza al momento de la siembra y, finalmente, se realizaron dos fertilizaciones de urea (46N - 0P - 0K). Se aplicó una cantidad total de 20 lb en banda en todo el lote experimental a los 7 DDS y, posteriormente 25 lb a los 40 DDS (Figura 2).

Figura 2

Distribución espacial del diseño experimental con parcelas divididas según tipo de labranza y manejo de cobertura



Propiedades Físicas

Las propiedades físicas del suelo seleccionadas como indicadores de salud de este fueron estabilidad estructural, en los cuales se midieron el diámetro medio ponderado (mm) y estado de agregación (%). También, se midieron las densidades del suelo: densidad aparente (g cm^{-3}) y densidad real (g cm^{-3}). A partir de las densidades, se calculó porosidad total (%) del suelo. Por otro lado, se midió la resistencia a la penetración (kpa) a 10, 20 y 30 cm de profundidad del suelo. A los 90 DDS, se hicieron 36 cajuelas, donde por cada unidad experimental se realizaron tres cajuelas con dimensiones de $50 \times 50 \times 50$ cm y se muestreo para densidad aparente y estabilidad estructural.

Densidad Aparente

La densidad aparente del suelo se midió mediante el un anillo biselado con dimensiones de 7 cm de alto y 5.4 cm de diámetro, dando un volumen de 160.32 cm^3 . Con el anillo se tomaron muestras de suelo en las 36 cajuelas a profundidades de 0-20 cm 90 DDS. Las muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos donde se pasaron a sobres manilas y fueron secados a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas en un horno (Agostini et al., 2014). Finalmente, se pesaron en una balanza para determinar la densidad aparente con una relación peso-volumen utilizando la Ecuación 1 para el cálculo de densidad aparente:

$$\rho_b = \frac{(\textit{peso de muestra+cilindro})-\textit{peso del cilindro}}{\textit{Volumen del cilindro muestreador}} \quad [1]$$

Densidad Real

Para la determinación de la densidad real del suelo, se inició con el pesado de 10 g de suelo seco al aire natural, previamente tamizado con malla de 2 mm. En un crisol fueron llevados a una estufa y secados a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Paralelamente, se pesó el picnómetro vacío y se registró el valor. Además, se colocaron 2 g del suelo seco dentro del picnómetro, se tapó y se registró el nuevo peso. Luego se incorporó agua destilada hasta alcanzar un tercio del volumen del picnómetro, el cual se introduce inmediatamente, sin tapa, en una campana de vacío durante dos horas. Pasado este

tiempo, se retiró el picnómetro y se añadió más agua hasta completar dos tercios de su capacidad, y se colocó nuevamente en vacío por una hora adicional. Posteriormente, se retiraron los picnómetros y se llenaron completamente con agua destilada, se taparon y se pesaron registrando este peso. Finalmente, se vació por completo el contenido, se lavó y secó el picnómetro, y se llenó con agua destilada. Se tapó y se realizó el último pesado, registrando el dato correspondiente. A través de las masas pesadas y registradas para cada muestra, se utilizó la Ecuación 2 para calcular densidad real del suelo.

$$\rho_s = \frac{M_{pss} - M_{pv} \times D_w}{(M_{pw} - M_{pv}) - (M_{pssw} - M_{pss})} \quad [2]$$

Donde:

ρ_s = densidad específica, en g/mL

M_{pss} = masa del picnómetro + suelo seco a 105 °C, en g

M_{pv} = masa del picnómetro vacío y seco, en g

M_{pw} = masa del picnómetro + agua, en g

M_{pssw} = masa del picnómetro + agua + suelo seco, en g

D_w = densidad del agua en g/mL

Porosidad Total

Para poder calcular la porosidad total se utilizó la relación de densidad aparente y densidad real. La densidad aparente toma en cuenta la masa del suelo y el volumen total del suelo incluyendo el espacio poroso, mientras que la densidad real solo toma en cuenta el volumen del suelo. Al conocer estas dos densidades del suelo, se calculó la porosidad total mediante la Ecuación 3.

$$\left(1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)\right) \times 100 \quad [3]$$

Donde:

ρ_b = densidad aparente

ρ_s = densidad real

Resistencia a la Penetración

La medición de resistencia a penetración se realizó 90 DDS. Para determinar la RP se utilizó el penetrómetro manual de marca Eijkelkamp® realizando mediciones cada 10 cm de profundidad por unidad experimental hasta llegar a 30 cm de profundidad. Se utilizó el cono de 1 cm².

Estabilidad Estructural

La estabilidad estructural fue medida mediante el método Yodder a los 90 DDS. Con uso del palín, se tomaron muestras de suelo en las 36 cajuelas a profundidades de 0 - 20 cm. Posteriormente, las muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos para llevar a cabo el método Yodder. Las muestras fueron secadas al aire a 40 °C. Los terrones mayores a 5 cm de diámetro fueron rotos y las raíces junto a las piedras mayores a 8 mm fueron retiradas de la muestra. Se pesaron 25 g de suelo y se introdujeron a la serie de tamices de forma inclinada en el recipiente con agua del equipo Maser. Los tamices se colocaron de acuerdo con su apertura siendo que el tamiz con mayor apertura el cual es de 2 mm era el primer tamiz visible, seguido por los tamices de 1.0 mm, 0.500 mm, 0.25 mm y 0.125 mm de apertura. El tamiz superior de 2 mm se niveló con la superficie del agua al momento de la oscilación del Yodder. Después, el equipo de tamizado accionado por presión empezó a sumergir la serie de tamices en agua finalizando después de 30 minutos. Se retiraron los tamices para secar el material retenido en cada tamiz y se transfirió a cajas de Petri. Posteriormente, fueron secados a 105 °C en una estufa por 24 horas. Seguidamente, la masa del suelo de cada fracción se determinó y se usó para calcular el diámetro medio ponderado. A través del diámetro medio ponderado se realizó la clasificación de la estabilidad estructural de los agregados. Primeramente, se calculó el porcentaje de agregado mediante la Ecuación 4 y posteriormente se utilizó la Ecuación 5 para calcular el diámetro medio ponderado. Basado en los resultados del diámetro medio ponderado, se clasificaron los agregados y se otorgó un grado de estabilidad para cada muestra (Cuadro 2).

Cálculo de porcentaje de agregado del suelo

$$Mssi\% = Msrr \times 100 / Mss \quad [4]$$

Donde:

Mssi% = porcentaje de los agregados del suelo contenidos por cada tamiz

Mssr = peso total de los agregados retenidos en cada tamiz

Mss = masa total del suelo seco en g

Cálculo de DMP:

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{Mssi\% \times \bar{x}}{100} \quad [5]$$

Cuadro 2

Clasificación diámetro medio ponderado

Diámetro medio ponderado (mm)	Estabilidad estructural
< 0.5	Inestable
0.5 - 1.5	Ligeramente estable
1.5 - 3.0	Moderadamente estable
3.0 - 5.0	Estable
> 5.0	Muy estable

Nota. Tomado de Gómez Giraldo (2013)

Estado de Agregación

Para determinar el estado de agregación (EA), se obtuvo la masa de suelo retenida en cada tamiz y la masa inicial del suelo seco. Luego se calcularon los porcentajes de agregación de tamices con 0.5 mm, 1mm y 2 mm y se sumaron para obtener el estado de agregación utilizando la Ecuación 6.

Cálculo de estado de agregación:

$$EA = \sum_{i=1}^n \frac{Mssr \times 100}{Mss} \quad [6]$$

Donde:

Mssr = peso total de los agregados retenidos en cada tamiz (0.5, 1mm, 2mm)

Mss = masa total del suelo seco

Crecimiento de Maíz

Por otro lado, para medir el crecimiento de maíz, se tomó en cuenta la altura de la planta y hoja por planta. Después de sembrar el cultivo de maíz, se midió el crecimiento 60 DDS. El área de muestreo fue de 5 m lineales en cada unidad experimental (UE). Se midió la altura de la planta desde la base hasta la última hoja verdadera mediante una cinta métrica y se contaron las hojas completamente desarrolladas desde la parte basal hasta el ápice.

Rendimiento de Grano

Se cosechó el maíz tomando en cuenta plantas útiles de cada fila, considerando aquellas que tuvieran una altura promedio, una coloración saludable, mazorcas con buen vigor y madurez fisiológica. Se midió el rendimiento de grano a los 150 DDS después de tener la humedad relativa del grano a 13%. Se seleccionó un área de UE representativo para obtener las muestras, abarcando cuatro hileras y una longitud de 8 m. Por último, se procedió a desgranar el maíz cosechado de cada tratamiento y se pesaron los granos en una báscula. Se registraron los pesos y se cuantificó el rendimiento de grano en toneladas por hectárea de cada tratamiento.

Análisis Estadístico

Para realizar el análisis estadístico, se comenzó analizando los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Para evaluar la normalidad se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (Anexos A-D) mientras que la homocedasticidad se comprobó mediante la prueba Levene (Anexos E-G). Una vez confirmados estos supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de los diferentes tratamientos y determinar si existen diferencias significativas. Finalmente, se aplicó el análisis de la prueba Tukey para realizar comparaciones múltiples entre medias e identificar tratamientos que difieran significativamente. En la variable de crecimiento, los datos recopilados no cumplieron con el supuesto de ANOVA por lo cual se analizó con Welch ANOVA y prueba Games Howell test. En la primera parte del análisis estadístico se analizaron, de manera independiente, los

efectos de los dos factores principales, cultivo de cobertura y sistema de labranza, sobre cada una de las variables evaluadas y posteriormente se evaluó su interacción.

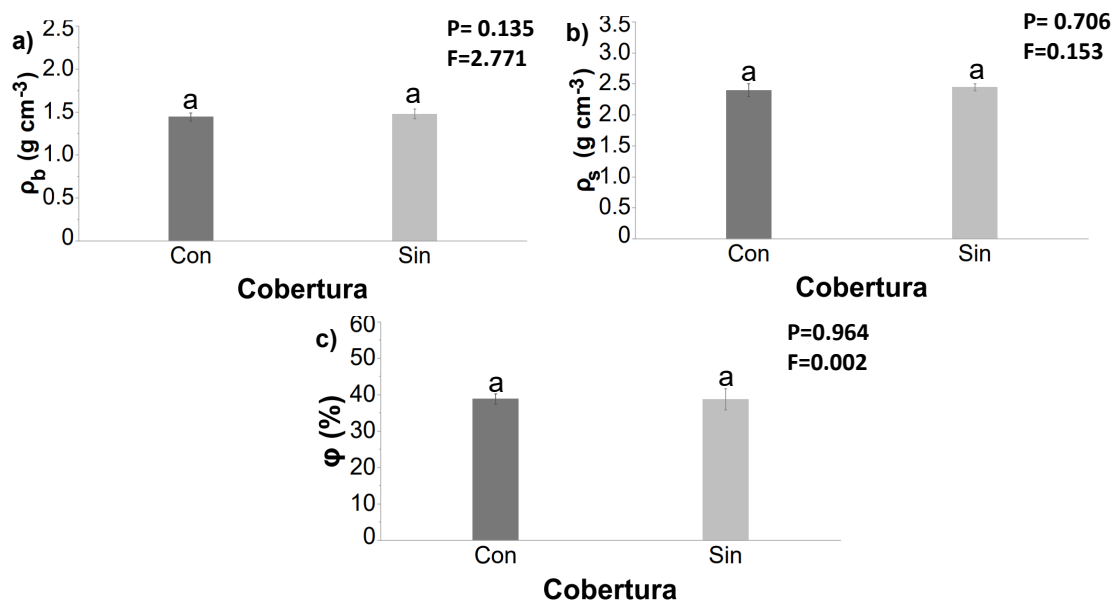
Resultados y Discusión

Efecto de la labranza y del cultivo de cobertura sobre las densidades y espacio poroso del suelo

El uso de *Mucuna Pruriens* como cultivo de cobertura no causó efectos significativos sobre las densidades y porosidad (Figura 3; Anexo H). Las variables de densidad aparente, densidad real y porosidad total no demostraron cambios relevantes entre los tratamientos lo que sugiere que la cobertura no tuvo efecto sobre las características físicas del suelo.

Figura 3

Efecto de cobertura de *Mucuna pruriens* sobre densidades y porosidad total



Nota. (a) densidad aparente (g cm^{-3}), (b) densidad real (g cm^{-3}) y (c) porosidad total (%). Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

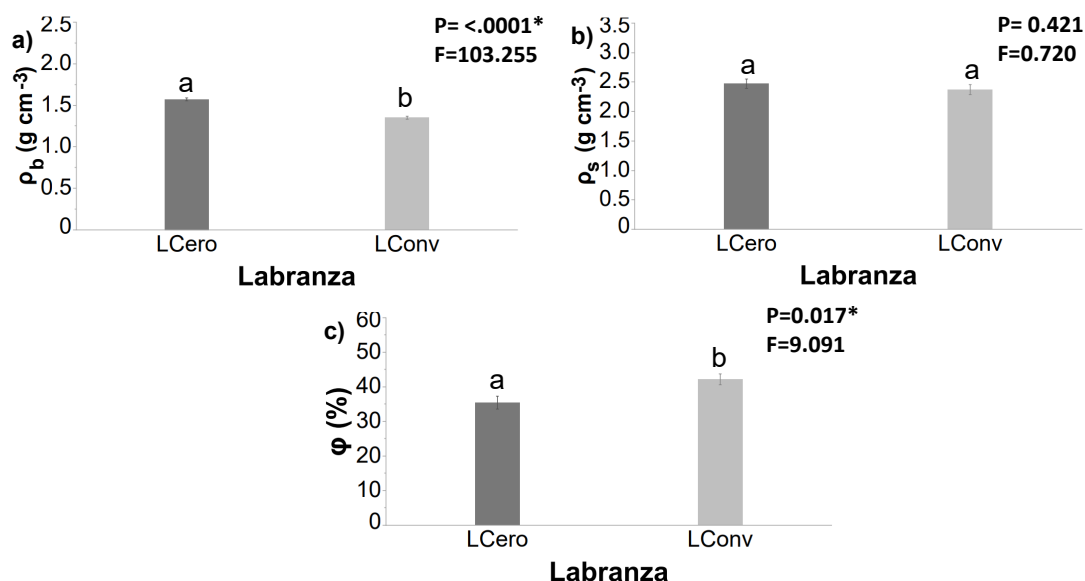
Con respecto a la densidad aparente, ambos tratamientos: con y sin cobertura, reflejaron densidades similares de 1.5 g cm^{-3} indicando que la cobertura no influyó en la compactación del suelo teniendo un valor F de 2.771 y un valor p de 0.135 (Figura 3a Anexo H). En el caso de densidad real, las densidades registradas fueron equivalentes entre tratamiento teniendo un valor de 2.3 g cm^{-3} , infiriendo que la parte mineral del suelo en los tratamientos son similares con un valor F de 0.153 y un valor p de 0.706 (Figura 3b Anexo H). Finalmente, la porosidad del suelo se mantuvo similar, sin diferencias significativas, teniendo una porosidad de 37% con un valor F de 0.002 y un valor p de 0.964

(Figura 3c; Anexo H). Esto se explica debido a que el aporte de la biomasa y los desechos de raíz cada año es relativamente bajo en comparación con el volumen total del suelo, por lo que, no crea un ajuste de estructura suficiente para modificar una densidad clara o porosidad total incluso después de varios ciclos de aplicación de cultivos de cobertura. Irmak et al. (2018) presentaron hallazgos similares en donde no hubo cambios significativos en la densidad aparente ni en porosidad después de aplicación de cultivos de cobertura por 3 años consecutivos.

El tipo de labranza empleada tuvo un efecto sobre la densidad aparente y porosidad total, mientras que la densidad real no tuvo diferencias significativas (Figura 3; Anexo H). Se observaron diferencias claras con respecto a la densidad aparente, en el cual la labranza convencional mostró valores bajos de 1.2 g cm^{-3} , indicando una menor compactación del suelo en comparación con la labranza cero con un valor F de 103.255 y un valor p de $<0.001^*$. Esto se puede explicar por la acción mecánica del laboreo, que desintegra los agregados y genera una estructura suelta a corto plazo. Por otro lado, la labranza cero no perturba el perfil del suelo, lo que mantuvo una estructura más densa reflejada por los valores más altos de 1.5 g cm^{-3} (Figura 4a Anexo H). Esto concuerda con el estudio de Orzech et al. (2021), en donde suelos bajo labranza convencional mostraron una reducción significativa de la densidad aparente y un aumento de la porosidad total tras operaciones como el arado y el rastreo previo a la siembra.

Figura 4

Efecto de sistemas de labranza sobre densidades y porosidad total



Nota. (a) Densidad aparente (g cm⁻³), (b) densidad real (g cm⁻³) y (c) porosidad total (%). Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

Con respecto a la densidad real, no se detectaron variaciones entre los sistemas de labranza con un valor F de 0.720 y un valor p de 0.421. Ambos sistemas de labranza presentaron valores similares de 2.4 g cm⁻³, lo que sugiere que la composición mineral no es alterada por el tipo de labranza (Figura 4b; Anexo H). Esto es coherente con la naturaleza de esta variable, la cual no es afectada por prácticas agrícolas a corto plazo.

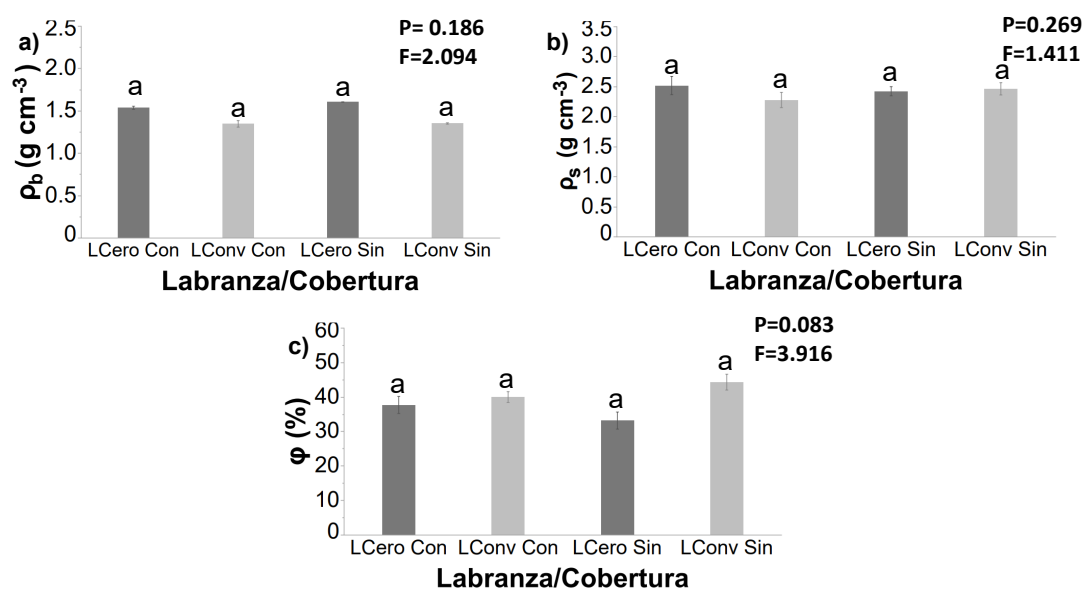
Respecto a la porosidad total, se presentaron diferencias entre los sistemas de labranza con valor F de 9.091 y valor p de 0.017* (Figura 4c; Anexo H). El suelo manejado con labranza convencional presentó mayor proporción de poros lo cual indica un suelo más aireado. Esto es coherente con la menor densidad aparente observada en (Figura 4a) y con (Horn et al., 1995).

La interacción entre labranza y cobertura no generó diferencias significativas en las densidades ni en la porosidad del suelo (Figura 5; Anexo H). Al analizar el efecto del sistema de labranza y el uso de *Mucuna pruriens* como cobertura, se observó que ninguno de los tratamientos provocó cambios estadísticamente significativos en la densidad aparente, teniendo valores promedio

de 1.4 g cm^{-3} con un valor F de 2.094 y un valor p de 0.186 (Figura 5a Anexo H). Según Blanco-Canqui y Ruis (2018), las modificaciones sustanciales de la densidad aparente suelen requerir varios años consecutivos bajo un mismo manejo para evidenciarse de manera clara. Aunque en este caso se han aplicado prácticas de labranza y cobertura durante cuatro ciclos agrícolas consecutivos, los suelos aún presentan condiciones de compactación. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Araya et al. (2022), quienes documentaron que incluso después de más de 15 años bajo labranza reducida y uso de cultivos de cobertura, las mejoras en densidad aparente y distribución de poros fueron limitadas, sin observarse incrementos sustanciales en la capacidad estructural del suelo.

Figura 5

*Efecto de sistema de labranza y cobertura de *Mucuna pruriens* sobre densidades y porosidad total*



Nota. (a) densidad aparente (g cm^{-3}), (b) densidad real (g cm^{-3}) y (c) porosidad total (%). Las barras de error representan $\pm\text{EE}$. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

De la misma manera, la densidad real tampoco mostró diferencias significativas entre tratamientos presentando un valor F de 1.411 y un valor p de 0.269. Esto indica que la composición mineral del suelo y la materia orgánica se mantuvieron estable sin verse afectadas por el sistema de labranza y cultivo de cobertura *Mucuna pruriens*, teniendo valores promedios de 2.4 g cm^{-3} (Figura

5b; Anexo H). De acuerdo con Blanco-Canqui et al. (2006), labranza cero puede disminuir la densidad real del suelo debido al incremento de materia orgánica. Esto se atribuye al aumento de carbono orgánico, que tiene una densidad más baja que los minerales del suelo. Con mayor materia orgánica, el suelo diluye la proporción de partículas minerales densas, disminuyendo la densidad real.

Por otro lado, en la porosidad del suelo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, teniendo valores promedio de 35 g cm^{-3} con un valor F de 3.916 y un valor p de 0.083 (Figura 5c; Anexo H). Esto evidencia que el uso de *Mucuna pruriens* y dos sistemas de labranza no modificaron la porosidad total del suelo evaluado. Este comportamiento puede explicarse por la interacción de varios factores edáficos. En primer lugar, se ha documentado que las prácticas de conservación como la labranza cero y uso de cultivos de cobertura tienden a mejorar primero parámetros dinámicos del suelo, como la conectividad de poros, antes de reflejarse en cambios medibles en la porosidad total (Panday y Nkongolo, 2021). Esto se explica por el ritmo lento con el que ocurren los procesos de recuperación estructural del perfil edáfico. La evidencia indica que tanto la porosidad total como la conectividad de los poros requieren varios años bajo manejo de labranza cero y cultivo de cobertura antes de mostrar cambios claros (Araya et al., 2022).

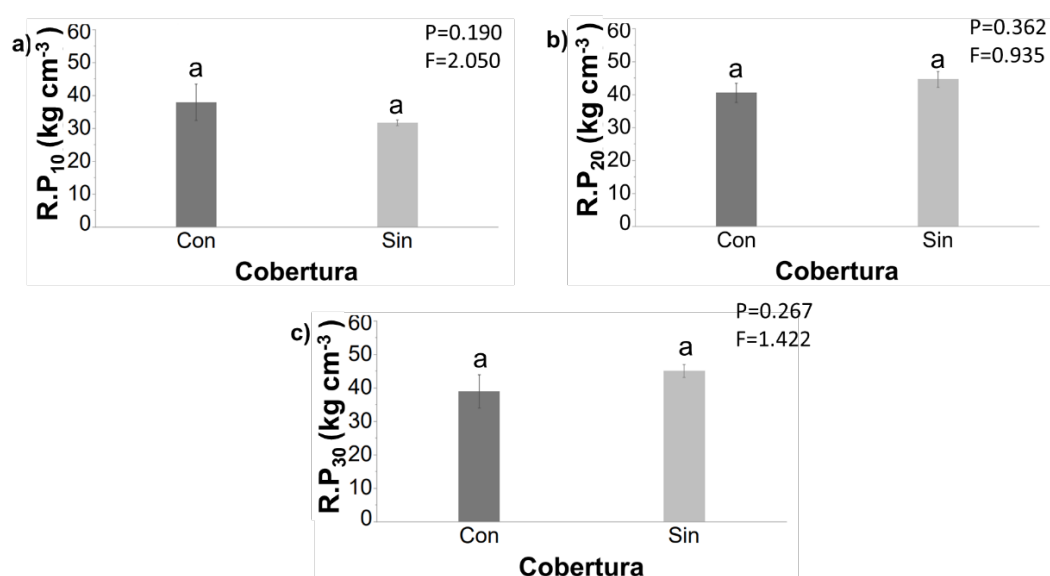
Efecto de la labranza y del cultivo de cobertura sobre la resistencia a la penetración del suelo

El uso de cultivo de cobertura no generó diferencias significativas en la resistencia a la penetración en las tres profundidades analizadas. A 10 cm de profundidad se reportó un valor F de 2.050 y un valor p de 0.190. Por otro lado, a 20 cm de profundidad se presenció un valor F de 0.935 y un valor p de 0.362 y a 30 cm de profundidad se tuvo un valor F de 1.422 y un valor p de 0.267 (Figura 6; Anexo J). Sin embargo, los valores obtenidos reflejan un grado elevado de compactación a lo largo del perfil edáfico. A 10 cm de profundidad, se registró una resistencia promedio de 34.85 kg cm^{-3} , valor que excede el umbral crítico propuesto por Lal (1994) y se clasifica como una limitación muy fuerte para el desarrollo radicular del maíz. A 20 cm, la resistencia promedio alcanzó los 42.60 kg cm^{-3} , manteniéndose dentro del mismo nivel de severidad. A 30 cm, se registró un valor de 42.03 kg cm^{-3} ,

lo que confirma la continuidad de condiciones restrictivas en el subsuelo. Estos resultados indican la presencia de una capa compactada persistente, posiblemente asociada a prácticas de manejo intensivo, que restringe el crecimiento radicular vertical y limita la capacidad del cultivo para acceder a recursos hídricos y nutricionales en profundidad. Incluso tras la cuarta aplicación de cultivo de cobertura, sugiere la presencia de una capa subsuperficial compactada cuya estructura física no fue modificada significativamente por las prácticas implementadas. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en suelos agrícolas con antecedentes de compactación inducida por maquinaria o manejo intensivo. Jabro et al. (2021) encontraron que, en suelos manejados bajo labranza cero, un solo ciclo de cultivos de cobertura no fue suficiente para reducir la resistencia a la penetración en la capa de 8 a 20 cm, observándose mejoras únicamente tras varios ciclos consecutivos y el uso combinado de especies con raíces pivotantes profundas. En consecuencia, la cobertura con *Mucuna pruriens*, caracterizada por un sistema radicular moderadamente denso y de profundidad limitada, habría ejercido un efecto estructural superficial, sin incidir de manera significativa sobre capas compactadas más profundas.

Figura 6

Efecto de cobertura de Mucuna pruriens sobre la resistencia a la penetración



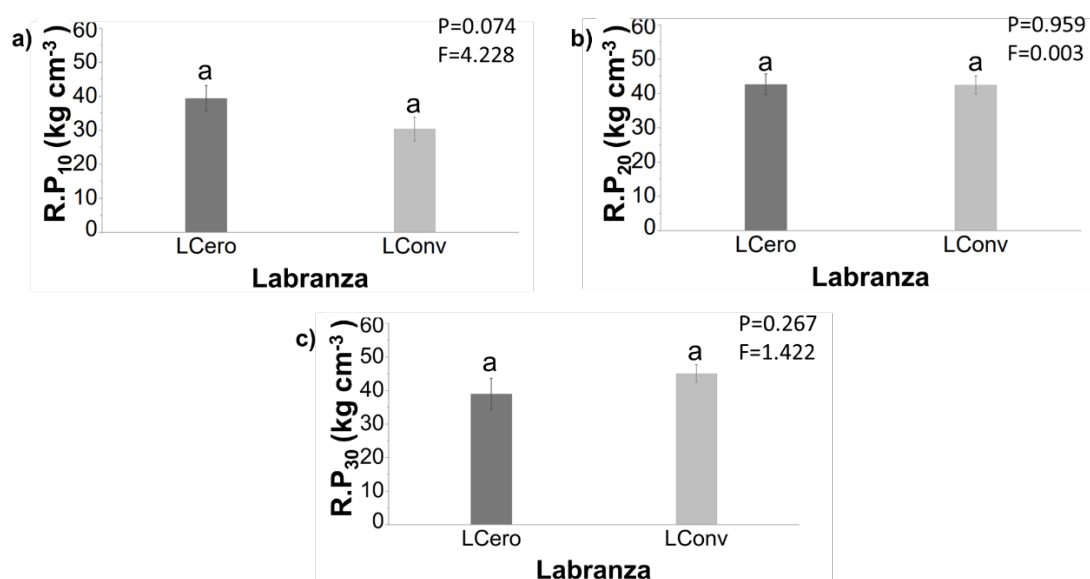
Nota. (a) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad (kg cm⁻²), (b) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad (kg cm⁻²) y

(c) Resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad (kg cm^{-2}). Las barras de error representan $\pm\text{EE}$. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

El efecto del sistema de labranza no mostró diferencias estadísticas en la resistencia a la penetración en ninguna de las tres profundidades evaluadas. A 10 cm de profundidad se reportó un valor F de 4.228 y un valor p de 0.074. Por otro lado, a 20 cm de profundidad se presenció un valor F de 0.003 y un valor p de 0.959 y a 30 cm de profundidad se tuvo un valor F de 1.422 y un valor p de 0.267 (Figura 7; Anexo J). No obstante, los valores registrados evidencian un nivel elevado de compactación a lo largo del perfil. A los 10 cm de profundidad, la resistencia promedio fue de 34.84 kg cm^{-3} , superando el umbral crítico establecido por Lal (1994), y clasificándose como una restricción muy fuerte para el desarrollo radicular del maíz. A 20 cm, el valor promedio ascendió a 42.60 kg cm^{-3} , manteniéndose como una limitante muy fuerte. A 30 cm, la resistencia alcanzó 42.03 kg cm^{-3} , confirmando la continuidad de condiciones restrictivas en el subsuelo. Estos resultados sugieren la presencia de una capa compactada estructuralmente persistente, que compromete la exploración radicular y, por ende, el acceso a agua y nutrientes en profundidad (Figura 7; Anexo J). Este patrón concuerda con lo reportado por Hamza y Anderson (2005), quienes destacan que la compactación inducida por el uso frecuente de maquinaria pesada tiende a consolidar el subsuelo, volviéndose estructuralmente compactada. De forma complementaria, Singh y Malhi (2006) demostraron que los sistemas de labranza cero, al evitar la perturbación mecánica del suelo durante periodos prolongados, pueden favorecer un aumento progresivo en la densidad aparente y mantener elevados niveles de resistencia a la penetración, especialmente cuando se superpone a una estructura ya degradada por laboreo previo.

Figura 7

Efecto de sistema de labranza sobre la resistencia a la penetración



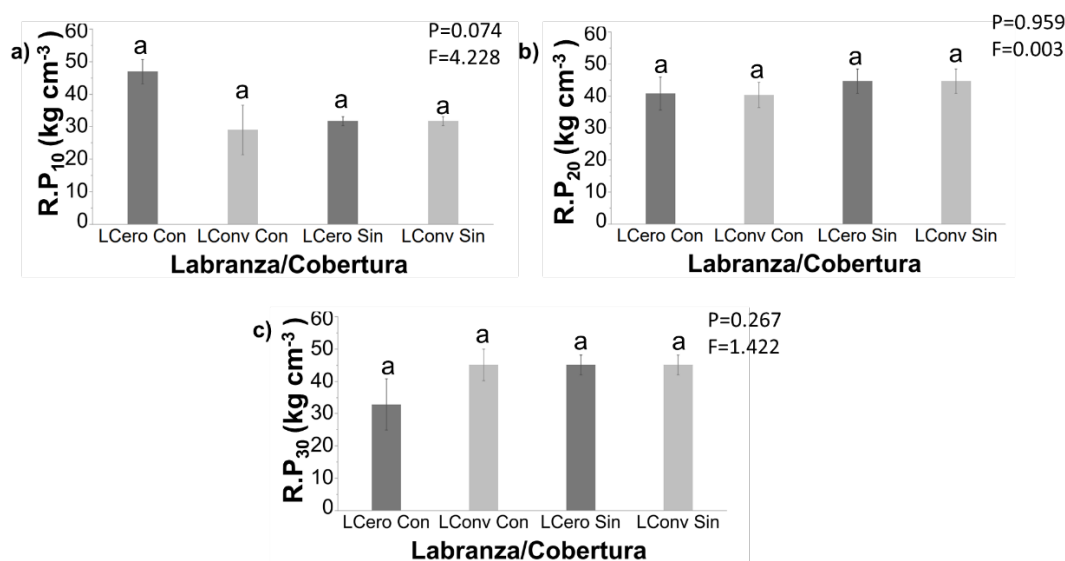
Nota. (a) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad (kg cm⁻²), (b) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad (kg cm⁻²) y (c) Resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad (kg cm⁻²). Las barras de error representan ±EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

Al evaluar la interacción Cobertura con sistema de labranza, se observó que la resistencia a la penetración fue alta en las 3 profundidades evaluadas, sin embargo, no hubo diferencias significativas en las 3 profundidades entre los 4 tratamientos. A 10 cm de profundidad se reportó un valor F de 4.228 y un valor p de 0.074. Por otro lado, a 20 cm de profundidad se presencié un valor F de 0.003 y un valor p de 0.959 y a 30 cm de profundidad se tuvo un valor F de 1.422 y un valor p de 0.267 (Figura 8; Anexo J). A 10 cm de profundidad, se registró una resistencia promedio de 34.83 kg cm⁻³ lo cual indica que el suelo es una limitante muy fuerte sobre el crecimiento de cultivo de maíz de acuerdo a la clasificación de niveles críticos de resistencia del suelo de (Lal, 1994). A 20 cm de profundidad, se midió una resistencia promedio de 42.60 kg cm⁻³ lo que revela que a esta profundidad sigue siendo una limitante muy fuerte sobre el crecimiento del maíz. A 30 cm de profundidad, la resistencia a la penetración fue en promedio de 42.03 kg cm⁻³ lo que señala que el suelo es un limitante muy fuerte sobre el crecimiento del cultivo de maíz. De 0 a 10 cm de profundidad, se notó una tendencia de

menor resistencia a la penetración destacando el tratamiento de labranza convencional con cobertura. Sin embargo, a 20 y 30 cm los valores se homogeneizan por la presencia de un “plough pan” lo cual concuerda con los resultados de Hamza y Anderson (2005).

Figura 8

*Efecto de sistema de labranza y cobertura de *Mucuna pruriens* sobre la resistencia a la penetración*



Nota. (a) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad (kg cm⁻²), (b) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad (kg cm⁻²) y (c) Resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad (kg cm⁻²). Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey.

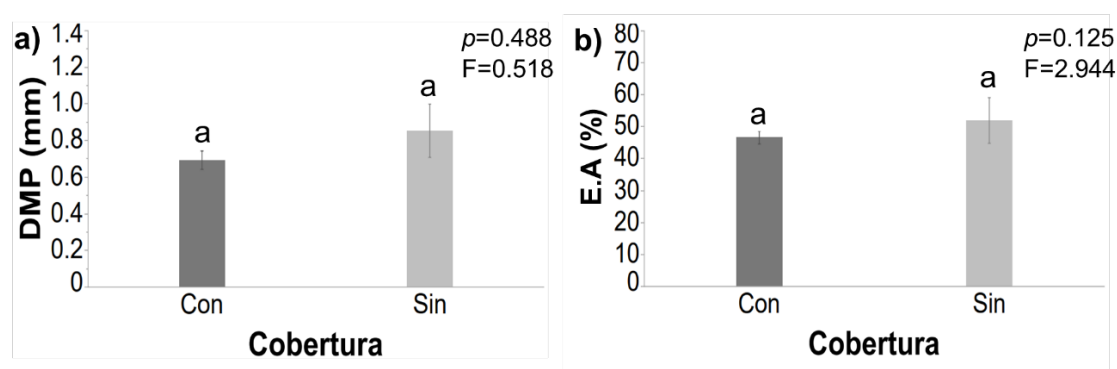
Efecto de la labranza y del cultivo de cobertura sobre estabilidad estructural del suelo

En el análisis de la estabilidad estructural, el uso de cobertura con *Mucuna pruriens* no tuvo efectos sobre el diámetro medio ponderado (DMP) con un valor F de 2.944 y un valor p de 0.125, y el EA presentó un valor F de 0.518 y un valor p de 0.488 (Figura 9; Anexo K). Esto indica que los suelos con cobertura con valores de 0.70 mm y suelos sin cobertura presentaron DMP de 0.85 mm, lo que refleja una estabilidad estructural ligeramente estable (Figura 9a; Anexo K). Del mismo modo, el estado de agregación que considera exclusivamente los agregados de 0.5, 1 mm y 2 mm, tuvo 48% en el tratamiento con cobertura y un 52% en el de suelo sin cobertura (Figura 9b; Anexo K) indicando que es un limitante moderado para el crecimiento radicular del maíz. Esto se puede explicar debido a la pausa de uso del cultivo de cobertura del año anterior. Las raíces y sus exudados no alcanzaron la

continuidad necesaria para promover la formación de macro agregados más estables; como resultado, tanto el diámetro medio ponderado como el estado de agregación, convergieron en valores similares entre tratamientos. Esto concuerda con hallazgos recientes que resaltan la necesidad de ciclos ininterrumpidos de raíces vivas y aportes orgánicos en el horizonte superficial, para generar un efecto acumulativo en la estructura del suelo y mejorar la estabilidad de los agregados (Gentsch et al., 2024).

Figura 9

Efecto de cobertura de Mucuna pruriens sobre los agregados del suelo



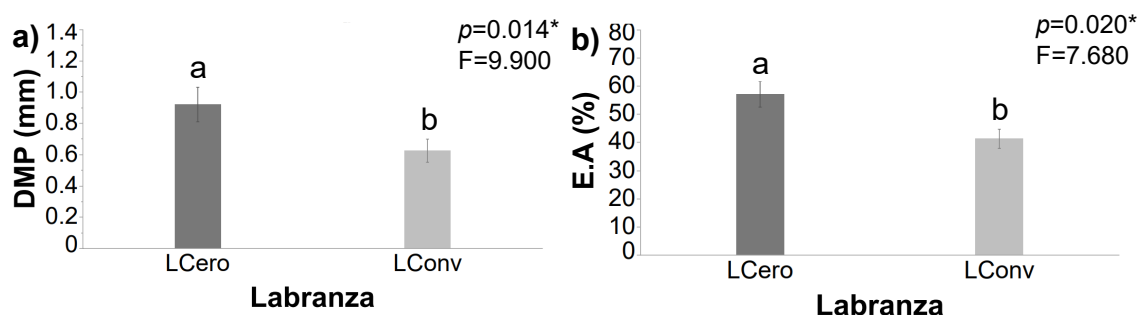
Nota. (a) estabilidad estructural (mm) y (b) estado de agregación (%). Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

El análisis de la estabilidad estructural reveló que el sistema de labranza tuvo efectos significativos sobre el diámetro medio ponderado con un con un valor F de 9.900 y un valor p de 0.014*, al igual que EA teniendo un valor F de 7.680 y un valor p de 0.020* (Figura 10; Anexo K). La labranza cero potenció la estabilidad estructural al obtener un diámetro medio ponderado de 0.90 mm frente a 0.60 mm en la labranza convencional (Figura 10a; Anexo K). Mientras que el estado de agregación de labranza cero ascendió al 60% presentando una limitante ligera para el crecimiento radicular del cultivo frente al 45% de EA con labranza convencional, lo que se traduce a una limitante moderada (Figura 10b; y Anexo K). Este comportamiento puede explicarse porque, al suprimir el volteo del suelo, se preservan tanto las redes de hifas de los hongos micorrízicos arbusculares como el glomalina que secretan, una glicoproteína clave que funciona como “pegamento” natural uniendo partículas y reforzando la estabilidad de los agregados. Esto concuerda con los hallazgos del estudio

de Wilkes et al. (2021) en el cual bajo labranza cero, las redes de hongos micorrízicos arbusculares permanecieron intactas, impulsando una mayor síntesis de glomalina, la cual funcionó como aglutinante entre micro agregados y facilitó la formación de estructuras agregadas más resistentes al agua.

Figura 10

Efecto de sistema de labranza sobre los agregados del suelo



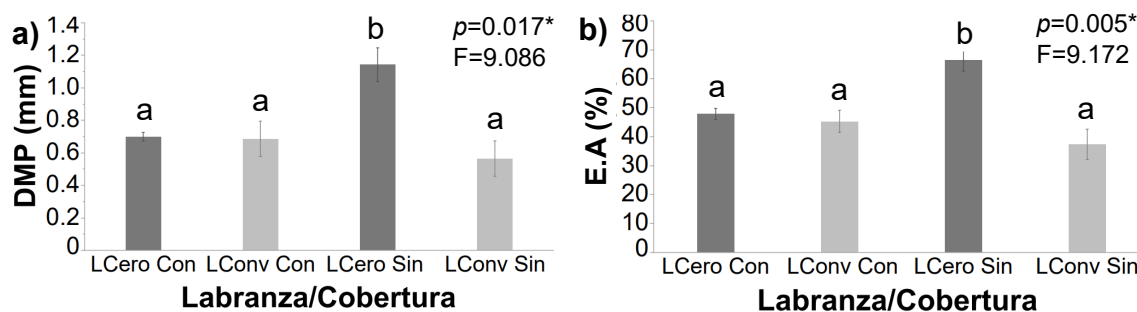
Nota. (a) estabilidad estructural (mm) y (b) estado de agregación (%). Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

La interacción entre el sistema de labranza y cultivo de cobertura *Mucuna pruriens* mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con respecto a DMP con un valor F de 9.086 y un valor p de 0.017*, y EA con un valor F de 9.172 y un valor p de 0.005* (Figura 11; Anexo K). La combinación de labranza cero sin cobertura obtuvo tanto el tamaño de poro más grandes como la proporción de agregados más resistentes, alcanzando un DMP de 1.1 mm representando una estabilidad estructural ligeramente estable (Figura 11a; Anexo K). También, el tratamiento labranza cero sin cobertura tuvo una EA de 65%, indicando que tuvo la mayor proporción de agregados de 0.5mm-2mm frente a los otros tratamientos (Figura 11b; Anexo K). Según Da Dutra et al. (2025), esta mejora se debió principalmente a la retención continua de residuos de raíces y tallos que actúan como base para la formación de agregados. Además, el alto contenido de materia orgánica en la fracción de agregados mayores de 2 mm mejora la cohesión y resistencia de las partículas. Por otro lado, el aumento de la actividad microbiana genera polisacáridos y otros exudados que funcionan como “pegamento biológico” entre las partículas, particularmente los hongos. Al evitar el volteo del suelo

se preservan las redes de hifas y la acumulación de glomalina en la capa superficial, funcionando como un pegamento biológico que une las partículas y refuerza la formación de macro agregados estables (Li et al., 2022).

Figura 11

*Efecto de sistema de labranza y cobertura de *Mucuna pruriens* sobre los agregados del suelo*



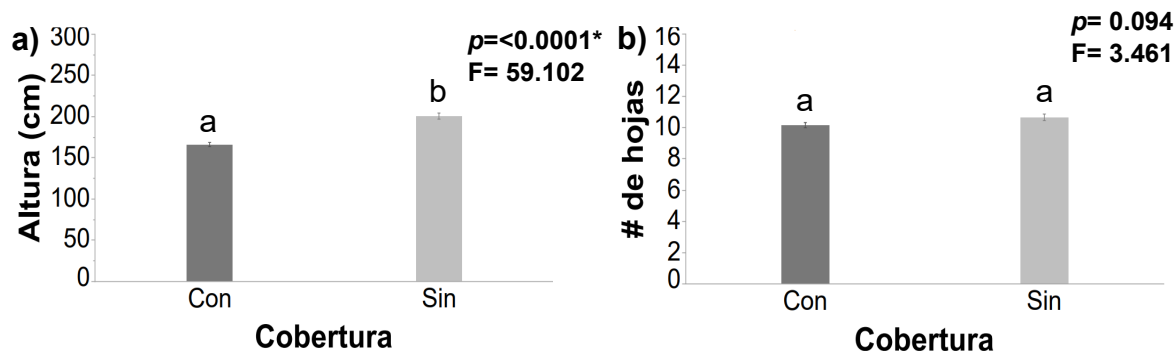
Nota. (a) estabilidad estructural (mm) y (b) estado de agregación (%). Las barras de error representan $\pm EE$. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

Al medir el crecimiento, se observó que el cultivo de cobertura tuvo un efecto significativo sobre la altura de la planta de maíz, pero no sobre el número de hojas (Figura 12; Anexo L). Las plantas que no contaron con cultivo de cobertura exhibieron una altura significativamente mayor que aquellas plantas que tuvieron *Mucuna pruriens* como cobertura, alcanzando una diferencia promedio de 50 cm con valor F de 59.102 y valor p de $<0.0001^*$ (Figura 12a Anexo L). Esto puede deberse a la composición de los residuos de *Mucuna pruriens*, los cuales, al ser una leguminosa, presentan una baja relación carbono nitrógeno y una alta velocidad de descomposición. Como consecuencia, los nutrientes son liberados de forma rápida, pero no sostenida, lo que podría desfasarse con las etapas críticas de crecimiento vegetativo del maíz. En contraste, los barbechos espontáneos dominados por gramíneas generan residuos con mayor relación carbono-nitrógeno, favoreciendo una liberación más gradual de nutrientes y una mayor acumulación de carbono en el suelo. Esta dinámica contribuye a mejorar las condiciones físicas del suelo, la retención de humedad y la disponibilidad continua de nutrientes, lo cual favorece el desarrollo inicial del cultivo de maíz. Estudios recientes han mostrado que la elección del tipo de cobertura vegetal incide directamente en la disponibilidad de nutrientes y en el entorno

edáfico para el cultivo de maíz. De acuerdo con Almeida et al. (2024), los residuos de gramíneas presentaron una relación carbono-nitrógeno más alta (22 – 23:1) en comparación con las leguminosas (14 – 15:1), lo que resultó en una liberación más lenta y sostenida del nitrógeno durante el ciclo del maíz. Esta liberación progresiva favorece una sincronía más adecuada entre la disponibilidad de nutrientes y la demanda del cultivo en sus primeras etapas, creando condiciones que promueven un desarrollo vegetativo más estable. En contraste, los residuos de leguminosas, por su rápida descomposición, liberan nutrientes de forma anticipada, lo cual puede provocar desajustes con la absorción del maíz en fases críticas de crecimiento.

Figura 12

*Efecto de cobertura de *Mucuna pruriens* sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra*



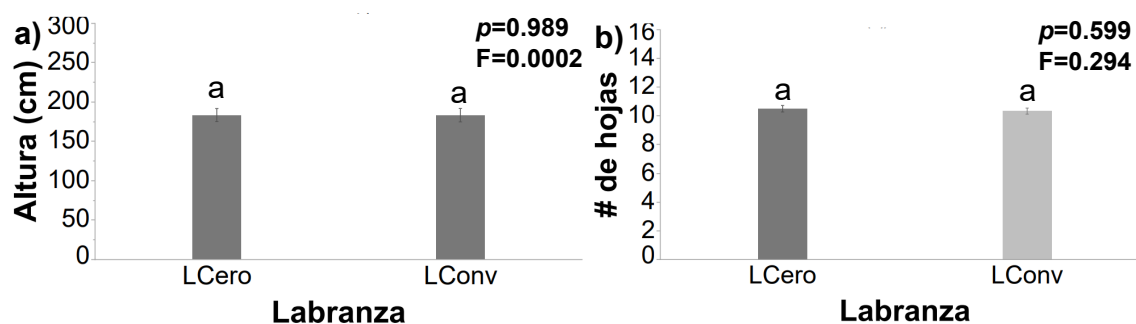
Nota. (a) altura (cm) y (b) número de hojas. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post-hoc de Games-Howell.

Por otro lado, el uso del cultivo de cobertura *Mucuna pruriens* no tuvo un efecto sobre el número de hojas, teniendo un valor F de 3.461 y un valor p de 0.094 (Figura 12b; Anexo L). La uniformidad en la cantidad de hojas por planta es debido a la robustez genética del cultivo, dado que esta característica fenológica depende esencialmente del genotipo y no de las alteraciones físicas provocadas por la cobertura vegetal (Liu et al., 2022).

Cuando el sistema de labranza fue evaluado, los resultados evidenciaron que no hubo efecto en el tipo de labranza sobre el crecimiento del cultivo (Figura 13; Anexo L). Tanto en el uso de labranza cero como labranza convencional, las plantas alcanzaron una altura promedio de 180 cm teniendo un valor F de 0.0002 y un valor p de 0.989 (Figura 13a; Anexo L). Respecto al número de hojas, se observó que en ambos sistemas de labranza las plantas desarrollaron en promedio 10 hojas con un valor F de 0.294 y un valor p de 0.599 (Figura 13b; Anexo L). Este resultado se explica por la capacidad del maíz (*Zea mays L.*) para mantener un desarrollo vegetativo estable bajo diferente manejo del suelo (Shah et al., 2016). Por otro lado, la consistencia en el número de hojas puede atribuirse a la estabilidad genética del cultivo, ya que esta variable fenológica está regulada principalmente por el genotipo y no por los cambios físicos causados por los sistemas de labranza (Liu et al., 2022).

Figura 13

Efecto de sistema de labranza sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra



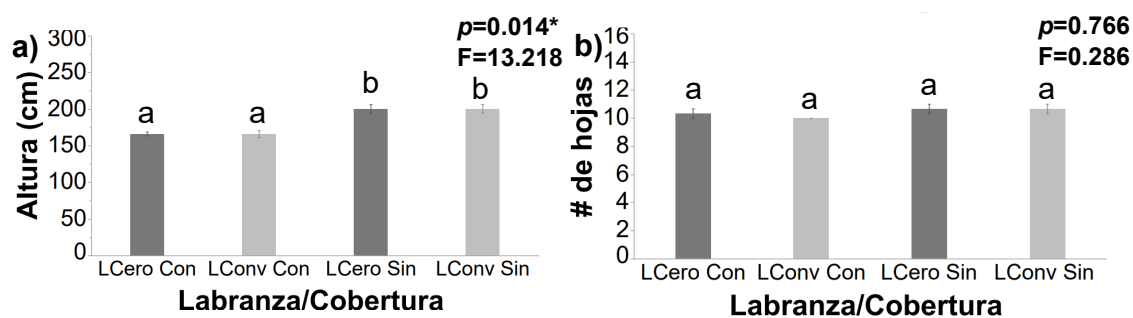
Nota. (a) altura (cm) y (b) número de hojas. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post-hoc de Games-Howell.

Al analizar el efecto combinado de la cobertura, *Mucuna pruriens*, y el sistema de labranza, se observó un efecto significativo de la interacción sobre la altura de la planta, sin embargo, no se observó un efecto sobre el número de hojas (Figura 14; Anexo L). Las plantas bajo el tratamiento labranza cero sin cobertura y labranza convencional sin cobertura alcanzaron alturas

significativamente más altas que aquellas plantas bajo labranza cero con cobertura y labranza convencional con cobertura, teniendo un valor F de 13.218 y un valor p de 0.014* (Figura 14a; Anexo L). Esto coincide con los hallazgos de Almeida et al. (2024), en donde se mostraron diferencias marcadas en la relación carbono-nitrógeno de sus residuos: las gramíneas presentaron valores más altos (22 – 23:1) frente a las leguminosas (14 – 15:1). Esta diferencia en la composición generó una liberación de nitrógeno más lenta y prolongada en las gramíneas, lo cual permitió que el nutriente estuviera disponible de forma más alineada con las necesidades del maíz durante sus primeras fases de desarrollo. En cambio, las leguminosas, al descomponerse rápidamente, liberaron nitrógeno de forma temprana, lo que puede ocasionar una falta de coincidencia con los momentos clave de absorción del cultivo, afectando la estabilidad del crecimiento vegetativo.

Figura 14

*Efecto de sistema de labranza y cobertura de *Mucuna pruriens* sobre el crecimiento de maíz variedad tuxpeño a los 60 días después de siembra*



Nota. (a) altura (cm) y (b) número de hojas. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post-hoc de Games-Howell.

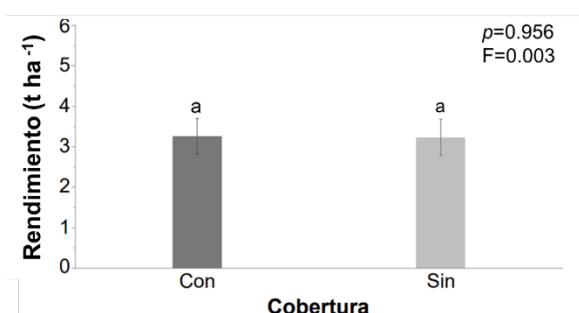
Por otro lado, en el número de hojas por planta no se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos, con valor F de 0.286 y valor p de 0.766 (Figura 14b; Anexo L). En todos los tratamientos, las plantas desarrollaron 10 hojas indicando que el crecimiento de hojas no fue influenciado por la interacción de labranza y cobertura. Esta estabilidad puede atribuirse a factores genéticos. Esto es consistente con los resultados obtenidos por Khan et al. (2022), quienes no

encontraron efectos significativos de patrones de intersembra sobre el conteo foliar de la planta principal. Dichos antecedentes refuerzan el hecho de que la combinación de cobertura y sistema de labranza no influyó en el crecimiento foliar.

Al realizar la medición de rendimiento y realizar el análisis estadístico, no se encontraron diferencias significativas, con un valor F de 0.003 y un valor p de 0.956 (Figura 15; Anexo L). La comparación de rendimiento entre parcelas con y sin cobertura mostraron valores similares, ambos rondando en promedio 3.25 t ha^{-1} (Figura 15; Anexo L). Esto sugiere que la incorporación de *Mucuna pruriens* no alteró el rendimiento. La ausencia de diferencias significativas en el rendimiento del maíz entre parcelas con y sin cobertura de *Mucuna pruriens*, indica que los beneficios potenciales de esta leguminosa no se tradujeron en una mejora productiva durante el ciclo evaluado. Dado que *Mucuna pruriens* fue incorporada al suelo 7 meses antes del ciclo agrícola del maíz, es probable que la biomasa generada haya completado su proceso de descomposición mucho antes de que el cultivo expresara sus mayores requerimientos nutricionales. Esta pérdida de sincronización entre la mineralización de nutrientes y las fases fenológicas clave del maíz, reduce sustancialmente la posibilidad de que la cobertura vegetal influya positivamente sobre el rendimiento (Bath, 2000).

Figura 15

Efecto de cobertura *Mucuna pruriens* sobre el rendimiento de maíz

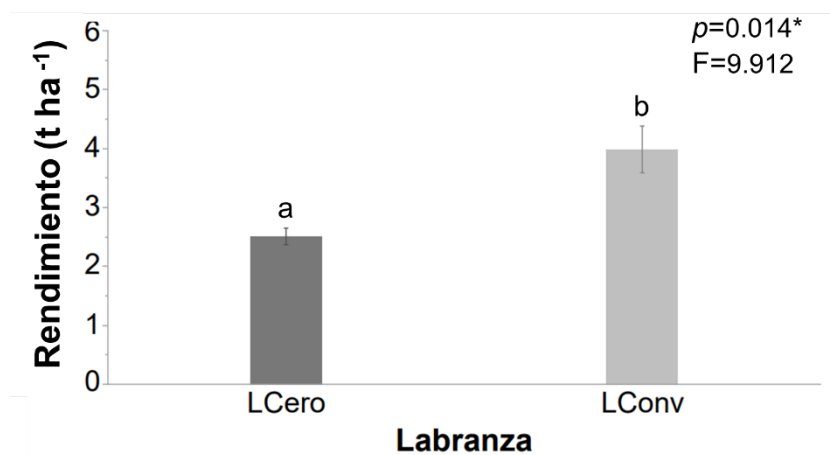


Nota. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey.

Al evaluar el rendimiento del cultivo con respecto al sistema de labranza, los análisis estadísticos evidenciaron diferencias significativas entre los tratamientos con un valor F de 9.912 y un valor p de 0.014*. Las parcelas con labranza convencional presentaron un mayor rendimiento teniendo valores de 3.99 t ha^{-1} (Figura 16; Anexo L). Este resultado indica que el tipo de labranza influyó sobre la productividad del maíz. Esto se explica por la influencia directa de la compactación superficial y las restricciones físicas que limitan la emergencia y el establecimiento inicial del cultivo. De acuerdo con Botta et al. (2024), la labranza convencional redujo de manera eficaz la densidad aparente y la resistencia a la penetración en los primeros 15 cm del perfil de manera temporal, generando un entorno físico más favorable para la germinación y el desarrollo uniforme de las plántulas. Este cambio estructural permitió una salida más rápida y homogénea de las plántulas, lo cual se reflejó en un aumento de hasta un 15 % en el rendimiento del maíz respecto a la siembra directa.

Figura 16

Efecto de sistema de labranza sobre el rendimiento de maíz



Nota. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

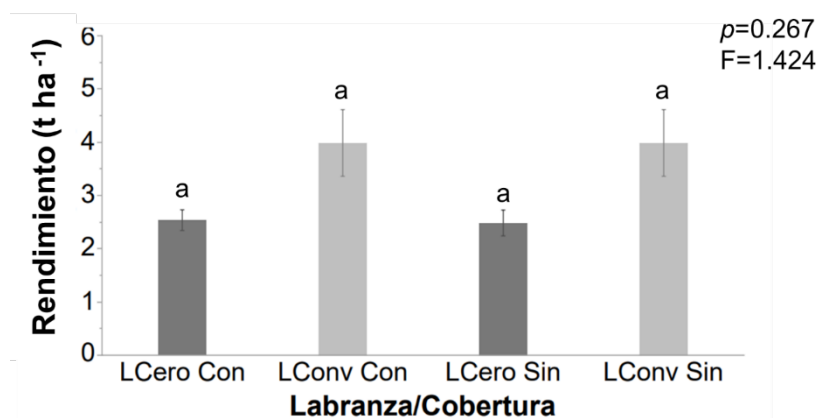
Asimismo, Chen y Weil (2011) reportaron que la compactación superficial puede disminuir significativamente la longitud radicular, comprometer la exploración del perfil y reducir el número de plantas vigorosas establecidas. En sus ensayos con maíz, se comprobó que los suelos no perturbados

presentaron una menor tasa de emergencia cuando estaban compactados, incluso en presencia de coberturas, debido a la baja porosidad.

Al evaluar el efecto de interacción de cultivo de cobertura y sistema de labranza sobre el rendimiento no se mostraron diferencias significativas a pesar de tener rendimientos distintos entre tratamientos teniendo un valor F de 1.424 y un valor p de 0.267 (Figura 17; Anexo L). Esto se puede atribuir a la independencia funcional de cultivo de cobertura y sistema de labranza sobre el establecimiento y la productividad del cultivo. De acuerdo con Dozier et al. (2017), demostraron que, en suelos franco-limosos, la combinación de labranza reducida y cobertura vegetal no generó efectos sinérgicos sobre el rendimiento de maíz.

Figura 17

*Efecto de labranza y cobertura *Mucuna pruriens* sobre el rendimiento*



Nota. Las barras de error representan \pm EE. Las medias con letras diferentes presentan una diferencia significativa con un valor de $p < 0.05$ según la prueba post hoc de Tukey

Conclusiones

El manejo regenerativo basado en labranza cero mostró señales de mejora en la estabilidad estructural del suelo, reflejadas en una mayor resistencia a la desagregación inducida por el agua. No obstante, este sistema no logró modificar de forma significativa otras propiedades físicas como la resistencia a la penetración, la porosidad total ni la densidad aparente a la profundidad de 20 cm. Estos resultados sugieren que el impacto de la labranza cero sobre la compactación mecánica y la porosidad requiere más tiempo de implementación.

En cuanto al crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz, el sistema de conservación que integró labranza cero con cobertura vegetal no logró superar los valores alcanzados bajo labranza convencional. Este resultado puede estar asociado a condiciones físicas del suelo que, bajo labranza cero, limitan el establecimiento inicial y la exploración radicular del cultivo, afectando la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes. En cambio, la labranza convencional favoreció una mejor aireación y condiciones de siembra más favorables en el corto plazo, lo cual se tradujo en un mayor desarrollo vegetativo y productivo del cultivo.

El análisis del perfil del suelo reveló la presencia de una capa compactada en el horizonte subsuperficial, principalmente entre los 10 y 30 cm de profundidad. Esta condición puede atribuirse al historial de manejo agrícola del lote, caracterizado por años de tránsito repetido de maquinaria y ausencia de prácticas de descompactación mecánica o biológica. La compactación detectada limita el crecimiento radicular, reduce la infiltración de agua y restringe la dinámica de gases en el suelo, aspectos que deben considerarse en el diseño de futuras intervenciones agronómicas para mejorar la condición física del sitio.

Recomendaciones

Se recomienda priorizar el uso de especies de la familia *Poaceae* como cultivos de cobertura en futuros ciclos de manejo regenerativo, ya que, estas gramíneas, a diferencia de las leguminosas, presentan una mayor relación carbono/nitrógeno (C/N), lo cual favorece una descomposición más lenta de sus residuos y un aporte más sostenido de materia orgánica estable al suelo. Esta característica no solo mejora la formación de agregados estables, sino que también contribuye a mantener la cobertura superficial por más tiempo, reduciendo la erosión y mejorando la retención hídrica. Además, su sistema radicular fibroso puede ayudar a mejorar la estructura del suelo y aumentar la porosidad en el largo plazo.

Antes de implementar estrategias de restauración física del suelo, se sugiere realizar un subsolado estratégico dirigido a romper capas compactadas identificadas entre los 10 y 30 cm de profundidad. Esta práctica mecánica permite aliviar la compactación subsuperficial sin alterar significativamente los horizontes superiores, mejorando así la infiltración de agua, el crecimiento radicular profundo y la aireación del perfil. Su aplicación puntual y bien planificada puede acelerar la recuperación de las funciones estructurales del suelo y maximizar la eficacia de otras prácticas de conservación que requieren un entorno físico favorable para manifestar sus beneficios.

Para una comprensión más integral de la dinámica del suelo bajo distintos sistemas de manejo, se recomienda incluir variables biológicas sensibles como la concentración de glomalina y la biomasa microbiana en futuras evaluaciones. La glomalina, una glicoproteína producida por hongos micorrízicos arbusculares, se ha vinculado con la estabilización de agregados y la mejora en la cohesión del suelo. Por otro lado, la biomasa microbiana refleja la actividad biológica general del suelo y su capacidad de descomposición de residuos orgánicos. La integración de estos indicadores permitiría interpretar mejor los procesos de formación y estabilidad de estructura, así como monitorear la recuperación del suelo en sistemas en transición hacia una agricultura regenerativa.

Referencias

- Agostini, M. D. L. Á., Monterubbianesi, M. G., Studdert, G. A. y Maurette, S. (2014). Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. *Cienc. Suelo*, 32(2), 1850–2067. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672014000200003
- Almeida, T. F., Robinson, E., Matthiesen-Anderson, R., Robertson, A. E. y Basche, A. (2024). Effect of cover crop species and termination timing on corn growth and seedling disease. *Agronomy Journal*, 116(4), 1792–1803. <https://doi.org/10.1002/agj2.21601>
- Araya, S. N., Mitchell, J. P., Hopmans, J. W. y Ghezzehei, T. A. (2022). Long-term impact of cover crop and reduced disturbance tillage on soil pore size distribution and soil water storage. *SOIL*, 8(1), 177–198. <https://doi.org/10.5194/soil-8-177-2022>
- Armas Vega, F. V. (2024). Beneficios de la agricultura regenerativa en la salud del suelo. *RECIAMUC*, 8(2), 665–677. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.\(2\).abril.2024.665-677](https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.(2).abril.2024.665-677)
- Barrios Bernal, E. A. y Durón Alvarado, L. M. (2021). *Efecto de Crotalaria juncea L. como cultivo de cobertura y dos sistemas de labranza sobre el control de malezas, mejoramiento del suelo y desarrollo del cultivo de maíz (Zea mays)* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/7212c555-9ef6-46bc-87b9-5c19f1237b91/content>
- Bath, B. (2000). *Matching the Availability of N Mineralised from Green-Manure Crops with the N-Demand of Field Vegetables*. <https://publications.slu.se/?file=publ/show&id=107654>
- Blanchart, E., Villenave, C., Viallatoux, A., Barthès, B., Girardin, C., Azontonde, A. y Feller, C. (2006). Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42, S136-S144. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.018>
- Blanco-Canqui, H., Lal, R. [R.], Post, W. M., Izaurralde, R. C. y Shipitalo, M. J. (2006). Organic Carbon Influences on Soil Particle Density and Rheological Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70(4), 1407–1414. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0355>
- Blanco-Canqui, H. y Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Botta, G. F., Ezquerria-Canalejo, A., Romay, C., Rivero, D. y Hidalgo, R. J. (2024). The agricultural traffic effects on soil and maize (*Zea mays* L.) yields under two different tillage systems. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.15159/ar.24.054> (979.8 KB).
- Chavarría Montenegro, J. R. y Belloza Urbina, W. M. (2022). *Efecto de la Crotalaria juncea L. como cultivo de cobertura y dos sistemas de labranza sobre el manejo de malezas, mejoramiento del suelo y desarrollo del cultivo maíz en el segundo año experimental* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/12e470bd-0e16-44e7-86c2-345ec91517ec/content>
- Chen, G. y Weil, R. R. (2011). Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil and Tillage Research*, 117, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.08.001>

- Da Dutra, B. R., Da Silva Câmara, P. H., Dortzbach, D., Rauber, L. R., Giumbelli, L. D., Bayer, C., Zanella, M., Ramos, J. C., Torres, J. L. R., Lovato, P. E. y Loss, A. (2025). On-Farm Evaluation of Direct Seeding of Cover Crop Effects on Soil C and N Reserves and Greenhouse Gas Emissions in a Cauliflower Production System. *Horticulturae*, 11(4), 396. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11040396>
- Dozier, I. A., Behnke, G. D., Davis, A. S., Nafziger, E. D. y Villamil, M. B. (2017). Tillage and Cover Cropping Effects on Soil Properties and Crop Production in Illinois. *Agronomy Journal*, 109(4), 1261–1270. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0613>
- Durham, T. C. y Mizik, T. (2021). Comparative Economics of Conventional, Organic, and Alternative Agricultural Production Systems. *Economies*, 9(2), 64. <https://doi.org/10.3390/economies9020064>
- Flores Tapia, A. C. y Huanca Terceros, F. M. (2023). *Efecto de Crotalaria juncea L. como cultivo de cobertura y dos sistemas de labranza sobre el control de malezas, mejoramiento del suelo y desarrollo del cultivo de maíz (Zea mays L.)* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/9a434a40-9905-48c3-92fa-b9d55608f6a2/content>
- Gentsch, N., Riechers, F. L., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D. y Guggenberger, G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*, 10(1), 139–150. <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>
- Gómez Giraldo, J. C. (2013). *Manual de Prácticas de Campo y del Laboratorio de Suelos*. SENA. <https://www.studocu.com/co/document/universidad-de-cordoba-colombia/materiales-de-ingenieria/practicas-campo-laboratorio-suelos/99896142>
- Gomiero, T. (2016). Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security: Reviewing a Complex Challenge. *Sustainability*, 8(3), 281. <https://doi.org/10.3390/su8030281>
- Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Kätterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., Jørgensen, H. B. y Isberg, P.-E. (2017). How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
- Hamza, M. A. y Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Horn, R., Domżzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A. y van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 23–36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00479-C](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C)
- Irmak, S., Sharma, V., Mohammed, A. T. y Djaman, K. (2018). Impacts of Cover Crops on Soil Physical Properties: Field Capacity, Permanent Wilting Point, Soil-Water Holding Capacity, Bulk Density, Hydraulic Conductivity, and Infiltration. *Transactions of the ASABE*, 61(4), 1307–1321. <https://doi.org/10.13031/trans.12700>
- Jabro, J. D., Allen, B. L., Rand, T., Dang, S. R. y Campbell, J. W. (2021). Effect of Previous Crop Roots on Soil Compaction in 2 Yr Rotations under a No-Tillage System. *Land*, 10(2), 202. <https://doi.org/10.3390/land10020202>

- Khan, I., Iqbal, B., Khan, A. A., Inamullah, Rehman, A., Fayyaz, A., Shakoor, A., Farooq, T. H. y Wang, L. (2022). The Interactive Impact of Straw Mulch and Biochar Application Positively Enhanced the Growth Indexes of Maize (*Zea mays* L.) Crop. *Agronomy*, 12(10), 2584. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102584>
- Koudahe, K., Allen, S. C. y Djaman, K. (2022). Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>
- Lal, R [Rattan]. (1994). *Methods And Guidelines For Assessing Sustainable Use of Soil and Water Resources in the Tropics* (Vol. 21). <http://digitalbib.usarb.md:8280/server/api/core/bitstreams/0d4e772b-6f0b-41a5-81a5-0df09ce4be4d/content>
- Lampariello, L. R., Cortelazzo, A., Guerranti, R., Sticozzi, C. y Valacchi, G. (2012). The Magic Velvet Bean of *Mucuna pruriens*. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 2(4), 331–339. [https://doi.org/10.1016/s2225-4110\(16\)30119-5](https://doi.org/10.1016/s2225-4110(16)30119-5)
- Li, Y., Xu, J., Hu, J., Zhang, T., Wu, X. y Yang, Y. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Glomalin Play a Crucial Role in Soil Aggregate Stability in Pb-Contaminated Soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph19095029>
- Liu, S., Gao, Y., Lang, H., Liu, Y. y Zhang, H. (2022). Effects of Conventional Tillage and No-Tillage Systems on Maize (*Zea mays* L.) Growth and Yield, Soil Structure, and Water in Loess Plateau of China: Field Experiment and Modeling Studies. *Land*, 11(11), 1881. <https://doi.org/10.3390/land11111881>
- McDaniel, M. D., Tiemann, L. K. y Grandy, A. S. (2014). Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 24(3), 560–570. <https://doi.org/10.1890/13-0616.1>
- Orzech, K., Wanic, M. y Załuski, D. (2021). The Effects of Soil Compaction and Different Tillage Systems on the Bulk Density and Moisture Content of Soil and the Yields of Winter Oilseed Rape and Cereals. *Agriculture*, 11(7), 666. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070666>
- Panday, D. y Nkongolo, N. V. (2021). No Tillage Improved Soil Pore Space Indices under Cover Crop and Crop Rotation. *Soil Systems*, 5(3), 38. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030038>
- Shah, A. R., Mirjat, M. S., Mughal, A. Q., Talpur, M. y Leghari, N. (2016). Growth, Yield and Root Development of Maize as Influenced by Tillage and Tractor Traffic. *Advances in Agriculture and Animal Science*, 32(1), 53–65. <https://pjaaevs.sau.edu.pk/index.php/ojs/article/view/152>
- Singh, B. y Malhi, S. S. (2006). Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil and Tillage Research*, 85(1-2), 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.12.005>
- Sumberg, J. y Giller, K. E. (2022). What is ‘conventional’ agriculture? *Global Food Security*, 32, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100617>
- van Eerd, L. L., Chahal, I., Peng, Y. y Awrey, J. C. (2023). Influence of cover crops at the four spheres: A review of ecosystem services, potential barriers, and future directions for North America. *The*

Science of the Total Environment, 858(3), 159990.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159990>

Wilkes, T. I., Warner, D. J., Edmonds-Brown, V., Davies, K. G. y Denholm, I. (2021). Zero Tillage Systems Conserve Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Enhancing Soil Glomalin and Water Stable Aggregates with Implications for Soil Stability. *Soil Systems*, 5(1), 4.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems5010004>

Anexos

Anexo A

Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Cero con Cobertura

Parámetros	DA	DR	Poros	RP10cm	RP20cm	RP30cm	Est. Estruct	Rendimiento	Estado de Agregacion
Valid	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean	1.537	2.519	37.719	46.907	40.788	32.858	0.699	2.537	47.887
Std. Deviation	0.031	0.264	4.279	6.485	8.916	13.737	0.046	0.337	3.346
Shapiro-Wilk	0.971	0.762	0.876	0.794	0.983	0.979	0.776	0.991	0.958
P-value of Shapiro-Wilk	0.676	0.027	0.313	0.100	0.747	0.726	0.057	0.819	0.580

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad, (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct) estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo B

Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Cero sin Cobertura

Parámetros	DA	DR	Poros	RP10cm	RP20cm	RP30cm	Est. Estruct	Rendimiento	Estado de Egregacion
Valid	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Missing	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean	1.606	2.426	33.2	31.725	44.641	45.094	1.143	2.483	66.513
Std. Deviation	0.004	0.133	4.282	2.387	6.602	5.28	0.180	0.42	6.739
Shapiro-Wilk	0.786	0.912	0.881	0.993	0.957	0.932	0.964	0.908	0.949
P-value of Shapiro-Wilk	0.081	0.427	0.328	0.842	0.6	0.497	0.636	0.413	0.569

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad, (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct) estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo C

Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Convencional con

Cobertura

Parámetros	DA	DR	Poros	RP10cm	RP20cm	RP30cm	Est. Estruct	Rendimiento	Estado de Agregación
Valid	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Missing	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mean	1.348	2.279	40.033	29.005	40.336	45.094	0.687	3.987	45.300
Std. Deviation	0.067	0.219	2.698	13.188	6.843	8.445	0.188	1.084	6.651
Shapiro-Wilk	0.774	0.840	0.966	0.814	0.987	0.784	0.847	0.920	0.999
P-value of Shapiro-Wilk	0.053	0.214	0.643	0.148	0.780	0.077	0.233	0.454	0.975

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad,

(RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct)

estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo D

Resultado del análisis de normalidad Shapiro-Wilk en el tratamiento de Labranza Convencional sin

Cobertura

Parámetros	DA	DR	Poros	RP10cm	RP20cm	RP30cm	Est. Estruc	Rendimiento	Estado de Agregacion
Valid	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Missing	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mean	1.353	2.466	44.347	31.725	44.641	45.094	0.565	3.987	37.360
Std. Deviation	0.014	0.178	3.983	2.387	6.603	5.280	0.189	1.084	9.134
Shapiro-Wilk	0.937	0.905	0.959	0.993	0.957	0.932	0.797	0.920	0.818
P-value of Shapiro-Wilk	0.515	0.401	0.611	0.843	0.600	0.497	0.106	0.454	0.160

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad,

(RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruc)

estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo E

Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Labranza con Cobertura

Parámetro	Prueba	Razón F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
DA	Levene	7.299	3	8	0.011
DR	Levene	1.125	3	8	0.395
Poros	Levene	0.462	3	8	0.717
RP10cm	Levene	6.809	3	8	0.014
RP20cm	Levene	0.143	3	8	0.932
RP30cm	Levene	1.523	3	8	0.282
Est. Estruct	Levene	2.153	3	8	0.172
Rendimiento	Levene	2.676	3	8	0.118
Estado de Agregacion	Levene	1.206	3	8	0.368

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad, (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct) estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo F

Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Cobertura

Parámetro	Prueba	Razón F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
DA	Levene	2.618	1	10	0.011
DR	Levene	3.091	1	10	0.109
Poros	Levene	0.308	1	10	0.591
RP10cm	Levene	10.864	1	10	0.008
RP20cm	Levene	0.172	1	10	0.687
RP30cm	Levene	3.841	1	10	0.078
Est. Estruct	Levene	11.028	1	10	0.260
Rendimiento	Levene	0.028	1	10	0.871
Estado de Agregacion	Levene	11.904	3	10	0.006

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad, (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct) estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo G

Resultado del análisis de homocedasticidad Levene para Labranza

Parámetro	Prueba	Razón F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Prob > F
DA	Levene	2.146	1	10	0.174
DR	Levene	0.001	1	10	0.983
Poros	Levene	0.961	1	10	0.350
RP10cm	Levene	1.098	1	10	0.319
RP20cm	Levene	0.172	1	10	0.687
RP30cm	Levene	0.446	1	10	0.519
Est. Estruct	Levene	4.050	1	10	0.141
Rendimiento	Levene	9.815	1	10	0.010
Estado de Agregacion	Levene	0.94	3	10	0.355

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real, (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad, (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad, (Est. Estruct) estabilidad estructural, (Rendimiento) rendimiento de maíz, Estado de agregación.

Anexo H

Resultado del análisis de varianza para densidad aparente y densidad real

Factor	DA					DR				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey		Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	2.77	1	0.1345	Con	1.44 \pm 0.047 a	0.15	1	0.7062	Con	2.40 \pm 0.104 b
				Sin	1.48 \pm 0.057 a				Sin	2.45 \pm 0.058 b
Labranza	103.25	1	<.0001	Cero	1.57 \pm 0.017 a	0.72	1	0.4208	Cero	2.47 \pm 0.079 a
				Conv.	1.35 \pm 0.018 b				Conv.	2.37 \pm 0.084 a
Labranza* Cobertura	2.09	1	0.1859	Lconv, con	1.34 \pm 0.039 b	1.41	1	0.269	Lconv, con	2.28 \pm 0.127 a
				Lcero, con	1.53 \pm 0.018 a				Lcero, con	2.52 \pm 0.153 a
				Lconv, sin	1.35 \pm 0.008 b				Lconv, sin	2.37 \pm 0.103 a
				Lcero, sin	1.60 \pm 0.002 a				Lcero, sin	2.42 \pm 0.077 a

Nota. (DA) densidad aparente, (DR) densidad real

Anexo I

Resultado del análisis de varianza para porosidad total y resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad

Factor	Poros					RP10cm				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey		Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	0.0021	1	0.9644	Con	38.88 \pm 1.405 a	2.050	1	0.1901	Con	37.96 \pm 5.516 a
				Sin	38.77 \pm 2.914 a				Sin	31.73 \pm 0.872 a
Labranza	9.09	1	0.0167	Cero	35.46 \pm 1.861 b	4.23	1	0.0738	Cero	39.32 \pm 3.835 a
				Conv.	42.19 \pm 1.573 a				Conv.	30.37 \pm 3.513 a
Labranza* Cobertura	3.92	1	0.0832	Lconv, con	40.03 \pm 1.557 a	4.23	1	0.0738	Lconv, con	29.00 \pm 7.614 a
				Lcero, con	37.72 \pm 2.470 a				Lcero, con	46.91 \pm 3.744 a
				Lconv, sin	44.38 \pm 2.300 a				Lconv, sin	31.72 \pm 1.378 a
				Lcero, sin	33.20 \pm 2.472 a				Lcero, sin	31.72 \pm 1.378 a

Nota. (Poros) Porosidad total, (RP10cm) resistencia a la penetración a 10 cm de profundidad

Anexo J

Resultado del análisis de varianza para resistencia a la penetración a 20 cm y resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad

Factor	RP20cm					RP30cm				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey		Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	0.9351	1	0.3619	Con	40.56 \pm 2.904 a	1.42	1	0.2672	Con	38.98 \pm 4.982 a
				Sin	44.64 \pm 2.411 a				Sin	45.09 \pm 1.928 a
Labranza	0.003	1	0.9585	Cero	42.72 \pm 2.991 a	1.42	1	0.2672	Cero	38.98 \pm 4.683 a
				Conv.	42.49 \pm 2.637 a				Conv.	45.09 \pm 2.572 a
Labranza* Cobertura	0.003	1	0.9585	Lconv, con	40.34 \pm 3.951 a	1.42	1	0.2672	Lconv, con	45.09 \pm 4.876 a
				Lcero, con	40.79 \pm 5.147 a				Lcero, con	32.86 \pm 7.931 a
				Lconv, sin	44.64 \pm 3.812 a				Lconv, sin	45.09 \pm 3.049 a
				Lcero, sin	44.64 \pm 3.812 a				Lcero, sin	45.09 \pm 3.049 a

Nota. (RP20cm) resistencia a la penetración a 20 cm de profundidad, (RP30cm) resistencia a la penetración a 30 cm de profundidad

Anexo K

Resultado del análisis de varianza para estabilidad estructural estado de agregación de agregados del suelo

Factor	Est. Estruc					Estado de agregacion				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey		Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	2.9444	1	0.1245	Con	0.69 \pm 0.050 a	0.518	1	0.488	Con	46.593 \pm 0.437 a
				Sin	0.85 \pm 0.146 a				Sin	3.24 \pm 0.451 a
Labranza	9.898	1	0.0137	Cero	0.92 \pm 0.110 a	7.68	1	0.0197	Cero	2.51 \pm 0.139 a
				Conv.	0.63 \pm 0.074 b				Conv.	3.99 \pm 0.396 b
Labranza* Cobertura	9.086	1	0.0167	Lconv, con	0.69 \pm 0.109 b	9.17	1	0.0045	Lconv, con	45.3 \pm 3.840 a
				Lcero, con	0.70 \pm 0.027 b				Lcero, con	47.887 \pm 1.932 a
				Lconv, sin	0.56 \pm 0.109 b				Lconv, sin	37.36 \pm 5.274 a
				Lcero, sin	1.14 \pm 0.104 a				Lcero, sin	66.513 \pm 3.891 b

Nota. (Est. Estruct) estabilidad estructural

Anexo L

Resultados de análisis de varianza para crecimiento de maíz: altura de planta y número de hojas

Factor	Altura de la planta 60 días (cm)					Número de hoja 60 días				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey		Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	59.1020	1	<0.0001	Con	166.17 \pm 0.1667 b	3.461	1	0.094	Con	10.166 \pm 0.167 a
				Sin	200.67 \pm 0.211 a				Sin	10.667 \pm 0.211 a
Labranza	0.0002	1	0.989	Cero	183.5 \pm 0.226 a	0.294	1	0.599	Cero	10.5 \pm 0.224 a
				Conv.	183.33 \pm 0.211 a				Conv.	10.333 \pm 0.211 a
Labranza* Cobertura	13.218	1	0.0137	Lconv, con	166.00 \pm 5.033 b	0.286	1	0.766	Lconv, con	10 \pm 0.000 a
				Lcero, con	166.33. \pm 2.667 b				Lcero, con	10.333 \pm 0.333 a
				Lconv, sin	200.67 \pm 5.840 a				Lconv, sin	10.667 \pm 0.333 a
				Lcero, sin	200.67 \pm 5.840 a				Lcero, sin	10.667 \pm 0.333 a

Anexo M

Resultados de análisis de varianza para rendimiento de maíz

Factor	Rendimiento de maíz (t ha-1)				
	Análisis de varianza			Prueba post-hoc Tukey	
	Valor F	Gl	valor - p	Nivel	Media (\pm error estándar)
Cobertura	0.003	1	0.9561	Con	3.26 \pm 0.437 a
				Sin	3.24 \pm 0.451 a
Labranza	9.91	1	0.0136	Cero	2.51 \pm 0.139 b
				Conv.	3.99 \pm 0.396 a
Labranza* Cobertura	1.42	1	0.2672	Lconv, con	3.99 \pm 0.626 a
				Lcero, con	2.54 \pm 0.194 a
				Lconv, sin	3.99 \pm 0.626 a
				Lcero, sin	2.48 \pm 0.242 a