

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Efecto de la cosecha mecanizada y manual
en los suelos bajo el cultivo de caña de azúcar
en el occidente de Nicaragua

Estudiante

Grace Emperatriz Pacheco Jirón

Asesores

Gloria E. Arévalo, Dra.

Ricardo A. Navarro, M.Sc.

Honduras, julio 2021

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA MARGARITA MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ROGEL CASTILLO

Director del Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Materiales y Métodos	13
Ubicación del Estudio.....	13
Tratamientos.....	14
Maquinaria	14
Análisis Físico del Suelo.....	14
Textura	14
Densidad Aparente	14
Espacio Poroso	14
Resistencia a la Penetración	15
Agua del Suelo.....	15
Retención Hídrica.....	15
Agua Drenable del Suelo.....	15
Lámina de Agua Disponible del Suelo (LADS)	16
Análisis de Raíces	16
Densidad Longitudinal de Raíces (DLR).....	16
Análisis Químico del Suelo	17

pH.....	17
Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE).....	17
Materia Orgánica Estabilizada (M.O).....	17
Fósforo Extractable	17
Macronutrientes: K, Ca y Mg	17
Micronutrientes: Cu, Fe, Mn y Zn	18
Diseño Experimental.....	18
Análisis Estadístico	18
Resultados y Discusión.....	19
Análisis Físico de los Suelos.....	19
Agua del Suelo.....	23
Análisis de Raíces	28
Condición Química de los Suelos	31
Conclusiones	36
Recomendaciones.....	37
Referencias.....	38
Anexos.....	41

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Significancia del efecto de los tipos de manejo del suelo a tres profundidades, sobre la densidad aparente (DAP), el espacio poroso y la resistencia a la penetración del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	19
Cuadro 2. Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre la densidad aparente (DAP), el espacio poroso y resistencia a la penetración del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	20
Cuadro 3. Significancia del efecto de los tipos de manejo a tres profundidades, sobre el punto de saturación (SS), la humedad a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), el agua drenable (AD,) la retención hídrica del suelo (RH) y la lámina de agua disponible del suelo(LADs). Chinandega y León, Nicaragua.....	24
Cuadro 4. Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el punto de saturación (SS), la humedad a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), el agua drenable (AD,) la retención hídrica del suelo (RH) del suelo y la lámina de agua disponible (LADs). Chinandega y León, Nicaragua.....	25
Cuadro 5. Efecto de la cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y cultivo de maní sobre la lámina de agua disponible (LADs) del suelo en tres diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.	27
Cuadro 6. Significancia de la densidad longitudinal de raíces (DLR), bajo cuatro condiciones de manejo del suelo a tres profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.....	29
Cuadro 7. Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre la densidad longitudinal de raíces (DLR). Chinandega y León, Nicaragua.....	30
Cuadro 8. Efecto de la profundidad del suelo sobre la densidad longitudinal de raíces (DLR) en diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.....	30

Cuadro 9. Significancia del efecto de los tipos de manejo a tres profundidades, sobre el pH, materia orgánica (MO), macro y micronutrientes en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	31
Cuadro 10. Efecto del tipo de manejo del suelo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el pH, materia orgánica (MO), macro y micronutrientes en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	32
Cuadro 11. Efecto del tipo de manejo de suelos (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el porcentaje de saturación de bases en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	32
Cuadro 12. Efecto del tipo de manejo de suelos (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) sobre el pH, materia orgánica (MO), (Fe) y zinc (Zn) en el suelo a diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.	34

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de las fincas experimentales (de Izq. a der.): Diano Marino (suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada), El naranjal (suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual), San Francisco (suelo bajo producción de maíz) y San Jose de las Marías (suelo sin intervención). Chinandega y León, Nicaragua.....	13
Figura 2. Efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención, suelo manisero) sobre la resistencia a la penetración (RP) del suelo a distintas profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.....	21
Figura 3. Efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades sobre la resistencia a la penetración (RP) del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	23
Figura 4. Curvas de retención de humedad en los suelos bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI) y suelo manisero(SM). Chinandega y León, Nicaragua.	26
Figura 5. <i>Variación de la retención hídrica (RH) por efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.</i>	28
Figura 6. Efecto del tipo de manejo del suelo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades sobre el (a) pH, (b) materia orgánica, (c) hierro y (d) cobre en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.	35

Índice de Anexos

Anexo A Imágenes de las tres calicatas realizadas en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada. Chinandega y León, Nicaragua.....	41
Anexo B Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual. Chinandega y León, Nicaragua.....	42
Anexo C Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo sin intervención. Chinandega y León, Nicaragua.	43
Anexo D Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo bajo producción de maní. Chinandega y León, Nicaragua.	44

Resumen

La caña de azúcar, (híbrido interespecífico de especies del género *Saccharum*) es uno de los cultivos de mayor importancia para la economía nicaragüense. Una de las preocupaciones más relevantes en la producción de caña, es la cosecha, ya que, el sector cañero realiza la cosecha en su mayoría de forma manual, con una quema previa al corte. Una alternativa, es la implementación de cosecha mecanizada en verde. Sin embargo, si no se hace un correcto uso de la maquinaria, se corre el riesgo de ocasionar un alto grado de compactación. En este estudio se analizó el efecto de los dos tipos de cosecha de caña de azúcar, sobre la calidad del suelo mediante el uso indicadores físicos y químicos. Se evaluó la cosecha de caña manual con quema y la cosecha mecanizada en verde en suelos con 15 años bajo este sistema. Ambos manejos se compararon con un suelo sin intervención y con un suelo destinado a la producción de maní. El diseño experimental fue en parcelas divididas y análisis estadístico con separación de medias Duncan. En los suelos con cosecha mecanizada fue mayor la materia orgánica a profundidades hasta 60 cm. No existieron diferencias en los nutrientes del suelo. Los suelos con cosecha manual con quema, presentaron los niveles más altos de resistencia a la penetración. La cosecha mecanizada de caña favorece la calidad del suelo, puesto que se acerca más a las características del suelo sin intervención. La mayor degradación del suelo ocurre bajo la producción de maní.

Palabras clave: Análisis físico-químicos, Calidad de Suelo, Quema de caña.

Abstract

Sugarcane (interspecific hybrid of species of the genus *Saccharum*), is one of the most important crops for the Nicaraguan economy. One of the most relevant concerns in sugarcane production is harvesting, since the sugarcane sector performs the harvest mostly manually, with a burning prior to cutting. An alternative is the implementation of mechanized green harvesting. However, if the machinery is not used correctly, there is a risk of causing a high degree of compaction. In this study, the effect of the two types of sugarcane harvest on soil quality was analyzed through the use of physical and chemical indicators. The manual sugarcane harvest with burning and the mechanized green harvest in soils with 15 years under this system were evaluated. Both operations were compared with a soil without intervention and with a soil destined for peanut production. A split-plot design was used and Duncan means separation for statistical analysis. In soils with mechanized harvesting, organic matter was higher at depths up to 60 cm. There were no differences in soil nutrients. The soils with manual harvest with burning, presented the highest levels of resistance to penetration. The mechanized harvest of sugarcane favors the quality of the soil, since it is closer to the characteristics of the soil without intervention. The greatest soil degradation occurs under peanut production.

Keywords: Physico-chemical analysis, Soil quality, Sugarcane burning.

Introducción

La caña de azúcar (híbrido interespecífico de especies del género *Saccharum*), es uno de los cultivos de mayor importancia para la economía nicaragüense, esto se debe a que de ella se obtienen diversos productos de alto valor comercial como azúcar, etanol y electricidad. Asimismo, genera más de 36 mil empleos directos, más de 136,000 indirectos y representa más del 4% de producto interno bruto del país. En la zafra 2019-2020 se cosecharon 76,422.31 hectáreas, con una producción aproximada de 7.70 millones de toneladas de azúcar, lo que significa un promedio de producción de 100.86 t/ha (CNPA 2020).

Una de las preocupaciones más relevantes en la producción de caña actualmente, es la cosecha, ya que, el sector cañero realiza la cosecha en su mayoría de forma manual, con una quema previa al corte. Este tipo de manejo consiste en incendiar la plantación con la finalidad de evitar heridas a los cortadores con la hoja de la caña o por mordeduras de serpientes. Otro fin es la sanidad de la plantación, la quema elimina nidos de ratas y otros roedores, asimismo mata a las propias plagas del suelo (Díaz y Portocarrero 2002). La mayor preocupación de quemar la caña, es que ocasiona problemas serios a la salud de las personas que viven en zonas aledañas a las tierras de producción, esto se debe principalmente a la contaminación del aire por efecto de la liberación de gases de efecto invernadero y cenizas. Asimismo, provoca una degradación considerable del suelo, puesto que deteriora las propiedades físicas, químicas y biológicas de los mismos. La quema elimina la materia orgánica del suelo, dejándolo expuesto a la erosión, y su impacto en la vida biológica del suelo es significativo (Souza et al. 2012).

Una alternativa de manejo, es la implementación de la cosecha mecanizada en verde. Sin embargo, si no se hace un correcto uso de la maquinaria, se corre el riesgo de ocasionar un alto grado de compactación, lo que conlleva a menor desarrollo de las raíces y a la reducción de la incorporación de la materia orgánica, aun cuando el rastrojo se deja como cobertura (García y Vega 2018). Los pros

y contras de estos dos manejos han creado una disputa entre qué tipo de cosecha tiene un impacto menor en la calidad del suelo.

La calidad del suelo es la base fundamental para la agronomía. Esta se define “como resultado de asociar la condición del suelo a características necesarias para un uso particular (aptitud), implícita en esta definición está la capacidad del suelo para mantener su aptitud en el futuro” (Wilson y Sasal 2017). El suelo tiene muchas funciones de importancia como es el movimiento de agua y su retención, el transporte y retención de solutos, el ciclado de nutrientes, la estabilidad física, su función como filtro y *buffer* de sustancias tóxicas, y la conservación de la biodiversidad. Es por esta razón que el concepto de calidad de suelo se convierte en un término dinámico, que hace referencia al efecto del uso y manejo de los suelos sobre sus funciones (Romaniuk 2010).

Es por eso, que la finalidad de este trabajo de investigación, es hacer un análisis del efecto de los dos tipos de cosecha de caña de azúcar, manual y mecanizada sobre las condiciones del suelo y utilizar indicadores para evaluar la calidad de suelo (químicos y físicos). Con ello se podrá determinar la magnitud del efecto que ambas cosechas tienen en el medio edáfico y de esta manera proporcionar mayor información para tomar mejores decisiones y asegurar a una producción más sostenible. Los objetivos de este estudio fueron Identificar el tipo de cosecha en el cultivo de caña de azúcar más apropiada para la conservación y calidad del suelo; determinar el efecto sobre el suelo de la cosecha y producción de maní; comparar el efecto de la cosecha de caña de azúcar con la del maní y un suelo sin intervención.

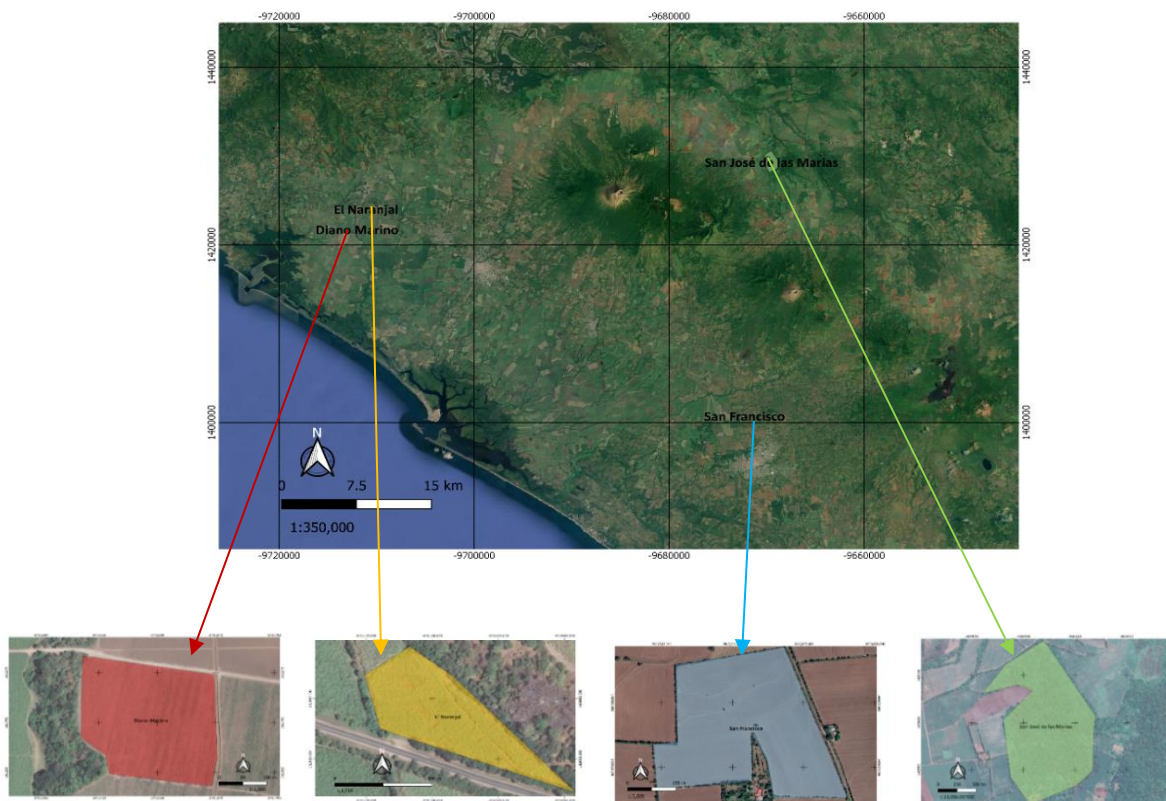
Materiales y Métodos

Ubicación del Estudio

El estudio se realizó durante los meses de diciembre de 2020 y enero de 2021 en tres fincas ubicadas en el departamento de Chinandega y una finca localizada en el departamento de León, Nicaragua (Figura 1). Los suelos en esta región son derivados de ceniza volcánica, son porosos y bien estructurados (Cruz et al. 2008). A pesar de que las fincas se encontraban considerablemente alejadas entre ellas, presentaban textura (Franca), precipitación anual (1900-2000 mm), y temperaturas que oscilan entre los 24 °C a 34 °C (INETER 2021) .

Figura 1

Ubicación de las fincas experimentales (de Izq. a der.): Diano Marino (suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada), El naranjal (suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual), San Francisco (suelo bajo producción de maní) y San Jose de las Marías (suelo sin intervención). Chinandega y León, Nicaragua.



Tratamientos

Se evaluó el efecto sobre el suelo de dos sistemas de cosecha de caña de azúcar: cosecha manual con quema previa al corte y cosecha mecanizada en verde con incorporación de rastrojo post-cosecha, cada uno con 15 años bajo este manejo. Asimismo, se evaluó un suelo sin intervención y un suelo destinado a la producción de *Arachis hypogaea*, maní.

Se tomaron muestras en tres diferentes profundidades, 0-20, 20-40 y de 40-60 centímetros y se hicieron tres repeticiones por tratamiento.

Maquinaria

Se utilizó la cosechadora CH570 de la marca John Deere, para la cosecha mecanizada del cultivo de caña de azúcar (John Deere 2020).

Análisis Físico del Suelo

Textura

Se determinó a través del análisis de tamaño de partícula propuesta por (Bouyoucos 1927) y se expresó cómo % de arena (%A), arcilla (%Ar) y limo (%L).

Densidad Aparente

Mediante el método del cilindro, en el cual se dividió la masa de las muestras secas por el volumen de campo de las muestras (Blake 1965).

Espacio Poroso

Es la porción del volumen total del suelo ocupada por poros, la cual se calculó para cada muestreo por medio de la ecuación 1:

$$\%Ep = 100\% - \left(\frac{D_{ap}}{D_r} \right) \times 100 \quad [1]$$

Donde:

%Ep: Espacio poroso (%)

Dap: Densidad aparente (g/cm³)

Dr: Densidad real (g/cm³) = 2.65

Resistencia a la Penetración

Se estableció utilizando un penetrológico, el cual es un dispositivo especialmente desarrollado para medir la resistencia a la penetración del suelo y guardar los resultados de la medición para procesarlos digitalmente (Eijkelkamp 2017). La variable se midió cada 10 cm hasta los 80 cm de profundidad en Megapascales (MPa).

Agua del Suelo

Retención Hídrica

Se utilizó HYPROP®, un aparato comercial con tensiómetros alineados verticalmente que está optimizado para realizar mediciones de evaporación de manera rápida y sencilla para la determinación de las curvas de retención hídrica de muestras de suelo en anillos contenedores de 250 mL (Schindler et al. 2010). La humedad se expresó en términos logarítmicos como pF, es decir, el punto de saturación de agua en el suelo corresponde a una tensión -1 cm de columna de agua (pF=0), la humedad a capacidad de campo a una tensión de 0.3 atm o -100 cm equivale (pF = 2) y el punto de marchitez permanente a -15 atm o -1.5×10^4 cm (pF de 4.2) (Montenegro y Malagon 1990).

Agua Drenable del Suelo

Es calculada por la diferencia de humedad entre el punto de saturación (SS) a pF 0 o 1 y capacidad de campo (CC) a pF 2. Se determinó mediante la ecuación 2:

$$AD = (\theta_{ss} - \theta_{cc}) \quad [2]$$

Dónde:

AD: Agua dreanable del suelo (%)

θ_{ss} : Humedad a punto de saturación (%)

θ_{cc} : Humedad a capacidad de campo (%)

Lámina de Agua Disponible del Suelo (LADS)

Se determinó por medio del método gravimétrico. La LADS se calculó para cada intervalo de muestreo se utilizó la ecuación 3:

$$LADS = ((\theta_{cc} - \theta_{ppm}) \times \frac{D_{ap}}{d_{agua}})10 \quad [3]$$

Dónde:

LADS: lámina de agua disponible en el suelo (mm/m)

θ_{cc} : Humedad a capacidad de campo

θ_{ppm} : Humedad a punto de marchitez permanente.

D_{ap} : densidad aparente del suelo (g/cm^3).

d_{agua} ; densidad del agua (cm^3).

Análisis de Raíces

Densidad Longitudinal de Raíces (DLR)

Se utilizó una grilla de 100×100 cm con divisiones de 10×10 cm; con la cual se contabilizó la cantidad de raíces gruesas, medias y finas que se encontraban en el suelo a las profundidades de: 0-20, 20-40 y 40-60 cm. La DLR se calculó mediante la ecuación 4:

$$DLR [\text{cm}/\text{cm}^3] = \frac{(P \times N)}{(A \times p)} \quad [4]$$

Dónde:

DLR: densidad de longitud de raíz.

P: longitud de raíz, para cada valor N corresponde 1 cm.

N: nº de raíces observadas.

A: área observada en la grilla = $2\,000 \text{ cm}^2$.

p: profundidad de penetración dentro de la pared de perfil = 1 cm.

Análisis Químico del Suelo

pH

Se efectuó mediante la utilización de un electrodo de vidrio pre-calibrado sobre una suspensión suelo: agua de 1:1 (Mclean 1982).

Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE)

Expresa la concentración máxima (suma) de cationes intercambiables que pueden ser desplazados en un pH no controlado (Porta et al. 2014).

Materia Orgánica Estabilizada (M.O)

Se determinó por el método de oxidación húmeda Walkley y Black (Nelson y Sommers 1996).

Fósforo Extractable

La cuantificación del fósforo extractable se realizó según lo propuesto por y se determinaron mediante el uso de colorimetría azul de molibdeno (Olsen y Sommers 1982)

Macronutrientes: K, Ca y Mg

Para la extracción de potasio (K) se utilizó la solución extractora Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter 1978). Se extrajo el Calcio (Ca) y el Magnesio (Mg) con KCl 1N (Salinas y García 1979). Las concentraciones se midieron con equipo de espectrofotometría de absorción atómica. El porcentaje de bases intercambiables se determinó mediante la ecuación 5:

$$\%SBi = \frac{b}{CICE} \times 100 \quad [5]$$

Dónde:

%SBi: Base intercambiable (%)

b: Base del suelo (K, Ca o Mg) (cmol/kg)

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva (cmol/kg)

Micronutrientes: Cu, Fe, Mn y Zn

Para la cuantificación de micronutrientes asimilables: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn), se realizó la extracción mediante el uso de la solución extractora Olsen modificada (Díaz-Romeu y Hunter 1978). Las concentraciones de micronutrientes se midieron con equipo de espectrofotometría de absorción atómica (SpectrAA-140, Varian Pty Lld. Belrose, Australia).

Diseño Experimental

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en el espacio, con cuatro fincas con diferentes tipos de manejos y tres profundidades (00-20, 20-40 y 40-60 cm). Se hicieron tres repeticiones por tratamiento, dando un total de 12 unidades experimentales.

Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para cada variable con separación de medias utilizando la prueba Duncan con un nivel de significancia $P < 0.05$. Los datos se analizaron con el programa SAS versión 9.4.

Resultados y Discusión

Análisis Físico de los Suelos

Se encontró que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) para las variables densidad aparente, espacio poroso y resistencia a la penetración (Cuadro 1). La primera y segunda variable solo demostraron diferencias en cuanto a los tipos de manejo del suelo (Cuadro 2). Mientras que la resistencia a la penetración tuvo diferencias significativas entre los tipos de manejo (Cuadro 2), la profundidad del suelo (Figura 2) y la interacción del manejo con la profundidad (Figura 3).

Cuadro 1

Significancia del efecto de los tipos de manejo del suelo a tres profundidades, sobre la densidad aparente (DAP), el espacio poroso y la resistencia a la penetración del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.

Factores	DAP	Espacio Poroso	Resistencia a la Penetración
Tipo de Manejo	*	*	***
Profundidad	NS	NS	***
Tipo de Manejo × Profundidad	NS	NS	**

Nota. NS No Significativo ($P > 0.05$), *** Altamente significativo ($P < 0.0001$), ** Muy significativo ($P < 0.01 - 0.0001$) * Significativo ($P < 0.05 - 0.01$)

Existieron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre la densidad aparente por el tipo de manejo al que han sido sometidos (Cuadro 2). El suelo bajo la producción de maní presentó la mayor densidad con 1.09 g/cm^3 . (Blake 1965) explica que la densidad aparente no es una constante para cada suelo, si no que varía con la condición estructural del mismo. (Allochis y Quintana 2016), declaran que la cosecha de maní afecta tanto la estructura como la estabilidad estructural del medio edáfico ya que produce agregados de menor tamaño y menos resistentes, lo que explica la diferencia significativa entre el suelo manisero y el resto de los suelos muestreados. El menor tamaño de los agregados, incrementa la densidad aparente y existe una disminución del porcentaje de poros en el suelo, lo que explica por qué el suelo manisero presentó el menor porcentaje de espacio poroso (57%).

El suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual presentó la mayor resistencia a la penetración de raíces con 2.28 MPa lo que indica que existe restricción para el crecimiento de las raíces, puesto que según (SSDS 1993) dos MPa de resistencia es la referencia para los criterios para las restricciones físicas de las raíces. El suelo sin intervención presentó la menor resistencia a la penetración, la cual no tuvo diferencia significativa con el suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada (Cuadro 2). Esto es acorde con lo investigado por (Villazón-gómez et al. 2017), quienes encontraron que los suelos bajo el cultivo de caña en donde se conserven los residuos de cosecha presentan menor resistencia que aquellos donde se quema la plantación y lo atribuyen a que existe una mejor conservación de la humedad bajo los rastrojos y por el mayor contenido de materia orgánica.

Cuadro 2

Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre la densidad aparente (DAP), el espacio poroso y resistencia a la penetración del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.

Tipo de Manejo ^β	DAP (g/cm ³)	Espacio Poroso (%)	Resistencia a la Penetración (MPa)
Cosecha mecanizada	1.01 a ^α	62.0 a	1.31 a
Cosecha manual	0.99 a	62.4 a	2.28 c
Sin intervención	1.02 ab	61.5 a	1.36 a
Suelo manisero	1.09 b	57.0 b	1.68 b
R ²	0.55	0.45	0.76
CV (%)	6.94	6.125	34.90
P	0.05	0.019	<0.0001

Nota. ^αValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (P ≤ 0.05)

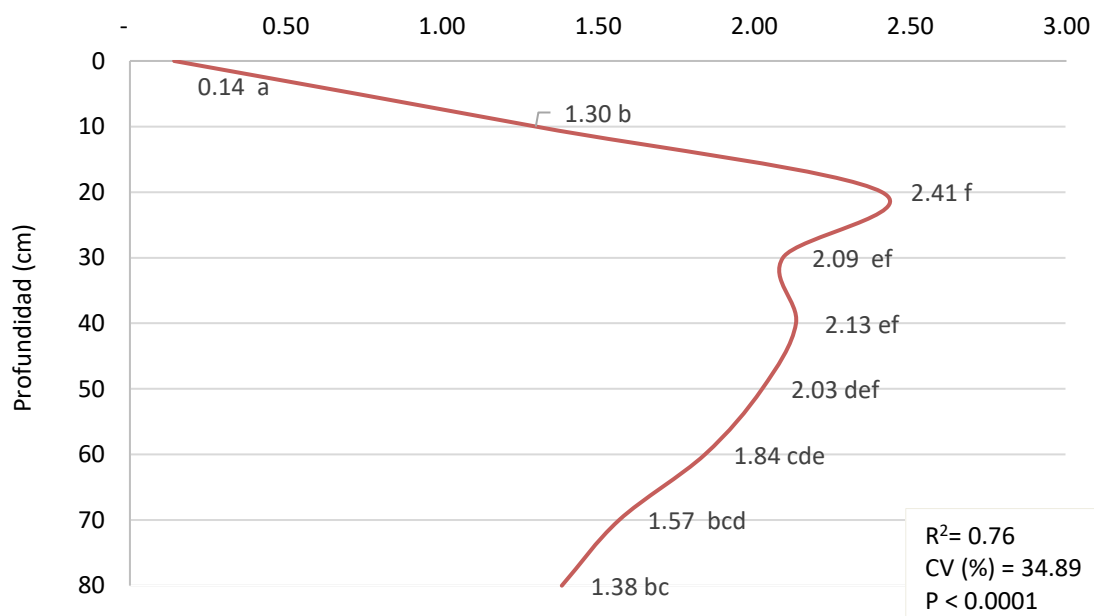
^β Todos los suelos muestreados son de textura franca.

La resistencia a la penetración promedio varió a diferentes profundidades, encontrando que no hay limitación desde la superficie hasta un poco más allá de los 10 cm. La mayor resistencia ocurre

a los 20 cm y se puede asociar a un pie de arado. Por debajo de esta profundidad la resistencia a la penetración disminuye y llega a no ser limitante ($<2\text{MPa}$) según (SSDS 1993) por debajo de los 50 cm; lo que representa una limitación para las raíces, puesto que, aunque las raíces de la caña de azúcar pueden extenderse hasta los 80 cm de profundidad, el 80% de estas se encuentran regularmente en los primeros 35 cm. Las raíces son la principal vía de absorción de agua y nutrientes, igualmente, juegan un papel muy importante en el anclaje de la planta lo cual es muy necesario en plantaciones que son cosechadas mecánicamente, ya que la cosechadora puede remover las raíces cuando son muy superficiales (Díaz y Portocarrero 2002) (Figura 2).

Figura 2

Efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención, suelo manisero) sobre la resistencia a la penetración (RP) del suelo a distintas profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.



Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

Al comparar la resistencia a la penetración a diferentes profundidades bajo los diferentes tipos de manejo, se observó que los datos obtenidos en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual

presentaron la mayor resistencia (3.87 MPa) en los 20 y 30 cm (Figura 3), esto coincide con lo presentado por (Villazón-gómez et al. 2017), quienes en su investigación encontraron que la capa con mayor resistencia apareció entre los 10-20 cm de profundidad en los suelos con quema de residuos de cosecha. El pie de arado que se observa a esta profundidad es probablemente por las temperaturas a las que el suelo es expuesto durante la quema de la plantación. Estos resultados contradicen lo escrito por (Usaborisut y Sukcharoenvipharat 2011), quienes reportaron mayores índices de resistencia a la penetración de raíces (2.8-4.8 MPa) en los suelos mecanizados que en los que se cosechan manualmente en Tailandia. La diferencia entre los resultados puede deberse a que a través de los años existe mejor tecnología y las cosechadoras que usan los ingenios hoy en día tienen neumáticos de alta flotación, los cuales ayudan a minimizar el daño en campo y reducen el efecto de compactación (Rein 2016).

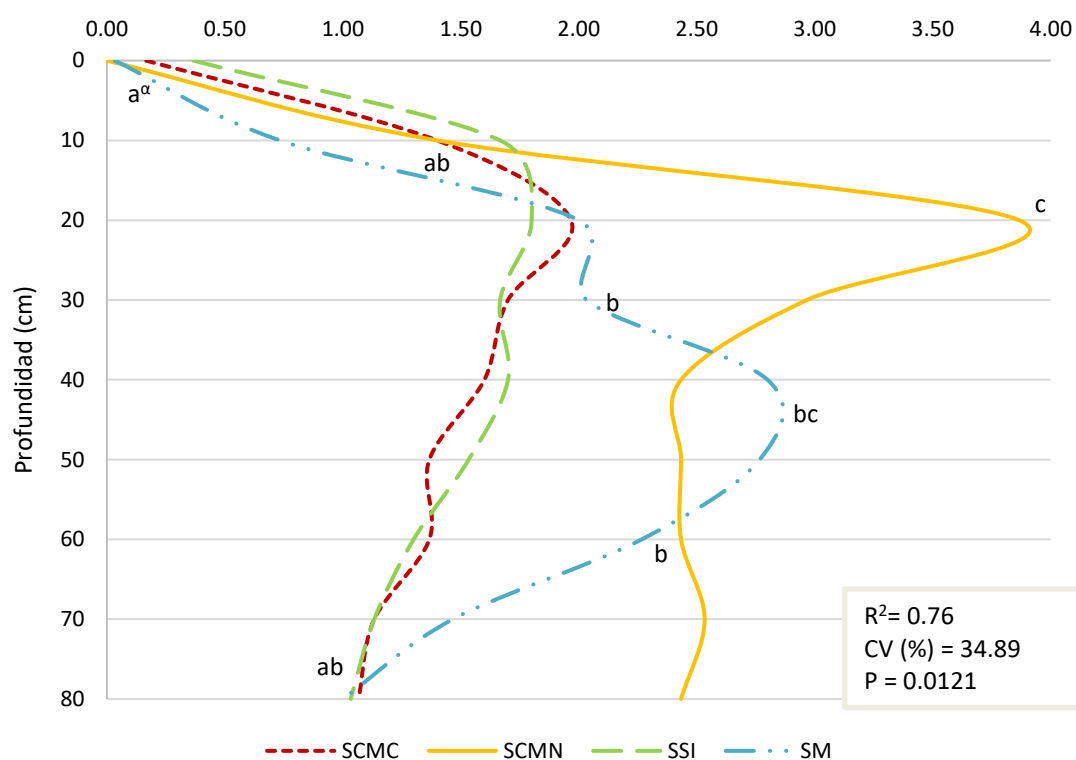
Por otra parte, el suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada presentó un comportamiento estadísticamente igual que el suelo sin intervención. Esto demuestra que el uso de maquinaria para la cosecha de caña en verde no tiene un impacto negativo, por el contrario, tiene un efecto positivo que asemeja las condiciones estructurales del suelo a uno sin intervención. Un factor determinante en este comportamiento puede ser debido a la incorporación del rastrojo en el suelo cosechado mecánicamente y su efecto acumulado a través de los 15 años bajo esta práctica. El dejar una cobertura continua de rastrojo en la superficie el suelo constituye el segundo criterio fundamental de la intensificación sostenible de las producciones agrícolas según lo propuesto por (Friedrich 2014).

No se tiene una razón definitiva por la cual existió una alta resistencia a la penetración (2.80 MPa) en el suelo bajo la producción de maní a los 40 cm (Figura 3). Sin embargo, esta resistencia puede estar relacionada a la naturaleza de la cosecha de maní, ya que, el mayor porcentaje de raíces se desarrollan entre los primeros 20 cm (Vijil et al. 2001) y las vainas se desarrollan entre los 3 - 10 cm

de profundidad (Chasiluisa 2015). Al arrancar las raíces para cosechar las vainas, se altera la estabilidad estructural, y probablemente evita que el suelo en las profundidades superiores se compacte.

Figura 3

Efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades sobre la resistencia a la penetración (RP) del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.



Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

Agua del Suelo

Existieron diferencias significativas ($P < 0.05$) en cuatro de las seis variables para medir el agua del suelo: porcentaje de humedad en el punto de saturación (SS), capacidad de campo (CC), porcentaje de retención hídrica (RH) y lámina de agua disponible (mm/m) (LADs) (Cuadro 3). La humedad a capacidad de campo solo presentó diferencias significativas ($P < 0.0006$) entre los tipos de manejo del suelo (Cuadro 4). La retención hídrica mostró diferencias con respecto a los diferentes manejos del

suelo (Cuadro 4) y no por efecto de la profundidad en el suelo. Además, mostró diferencia significativa ($P < 0.0001$) en la interacción del manejo de la cosecha y la profundidad en el suelo (Figura 4). También, hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en la lámina de agua disponible del suelo en cuanto al manejo del mismo (cuadro 4) y las profundidades muestreadas (Cuadro 5).

Cuadro 3

Significancia del efecto de los tipos de manejo a tres profundidades, sobre el punto de saturación (SS), la humedad a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), el agua drenable (AD,) la retención hídrica del suelo (RH) y la lámina de agua disponible del suelo(LADs). Chinandega y León, Nicaragua.

Factores	SS	CC	PMP	AD	RH	LADs
Tipo de Manejo	***	**	NS	NS	***	**
Profundidad	NS	NS	NS	NS	NS	*
Tipo de Manejo × Profundidad	NS	NS	NS	NS	***	NS

Nota. NS No Significativo ($P > 0.05$), *** Altamente significativo ($P < 0.0001$), ** Muy significativo ($P < 0.01-0.0001$) * Significativo ($P < 0.05-0.01$)

La humedad en el punto de saturación fue altamente significativa entre los diferentes tipos de manejo ($P < 0.0001$), los valores de humedad se empiezan a estabilizar a medida que se van secando los suelos, puesto que el suelo bajo el cultivo de caña con cosecha mecanizada, el suelo sin intervención y el suelo bajo cultivo de maní no presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellos; finalmente, la humedad en el punto de marchitez permanente es estadísticamente similar en todos los suelos (Cuadro 4).

El suelo al no ser intervenido tiene valores más bajos en cuanto al porcentaje de humedad en el punto de saturación, capacidad de campo y su capacidad para retener el agua (Cuadro 4). Este suelo presentó colores grisáceos a mayor profundidad que es un indicador de drenaje pobre (Richardson y Daniels 1993) (Anexo 3), al igual que un pH ligeramente alcalino (7.4) y mayor cantidad de calcio (20 cmol/kg) lo que indica que existe una cantidad considerable de carbonato de calcio en el

mismo. La cantidad de carbonato de calcio presente en el suelo es la razón por la cual el medio edáfico tiene un porcentaje de humedad a capacidad de campo y una retención hídrica baja en comparación a los demás suelos a pesar de tener un alto porcentaje de materia orgánica como lo expresan (Llanes et al. 2020) ya que los datos obtenidos en esta investigación se asemejan a los de ellos en suelos de bosques secundarios en el norte de Nicaragua.

El suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual presentó los niveles más altos de humedad al punto de saturación, retención hídrica y la lámina de agua disponible, lo cual está relacionado a la mayor resistencia a la penetración. Una mayor resistencia a la penetración indica que se disminuye la cantidad de macro y meso poros que existen en el suelo y aumenta el número de micro poros, las fuerzas de atracción en el suelo retienen el agua dentro de los micro poros, lo que puede dar como resultado un suelo anegado y una mala aireación (Miller y Donahue 1995) (Cuadro 4).

Cuadro 4

Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el punto de saturación (SS), la humedad a capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), el agua drenable (AD,) la retención hídrica del suelo (RH) del suelo y la lámina de agua disponible (LADs). Chinandega y León, Nicaragua.

Tipo de Manejo ^β	%					mm/m
	SS	CC	PMP	AD	RH	LADs
Cosecha mecanizada	54.4 b ^α	16.5 a	16.5	9.4	32.7 b	289 b
Cosecha manual	61.0 a	13.2 a	13.2	11.5	33.9 a	358 a
Sin intervención	45.4 c	13.1 b	13.1	11.6	26.6 c	242 c
Suelo manisero	55.9 ab	14.9 a	14.9	8.5	31.5 b	320 ab
R ²	0.68	0.55	0.44	0.36	0.92	0.62
CV (%)	9.82	12.49	22.43	35.96	14.78	17.51
P	<0.0001	0.0006	NS	NS	<0.0001	0.0008

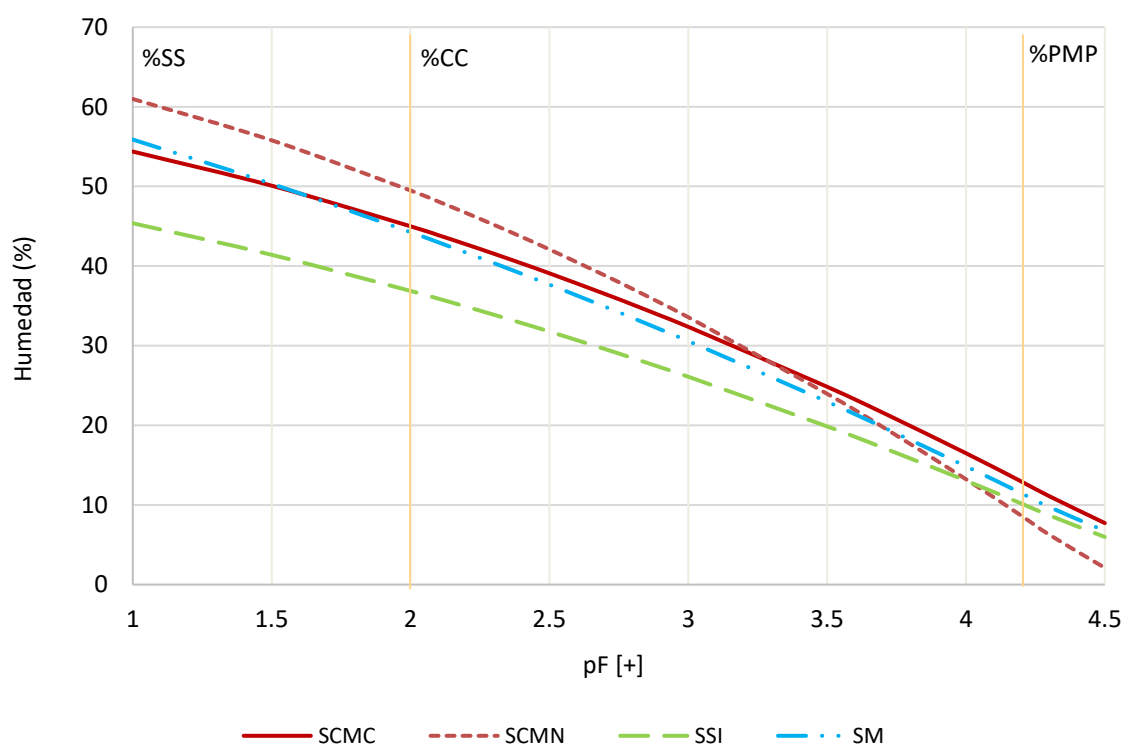
Nota. ^αValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (P ≤ 0.05)

^β Todos los suelos muestreados son de textura franca.

En las curvas de retención de humedad se observa que existe una mayor diferencia entre los diferentes tipos de manejo del suelo en el agua drenable (AD), la cual se encuentra entre el punto de saturación del suelo (SS) y el punto de capacidad de campo (<CC) en pF 1 a 2.0. La curva demuestra que los diferentes tipos de manejo del suelo influyen en la cantidad de agua que necesitan los suelos para llegar al punto de saturación. El suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual presentó una mayor lámina de agua drenable y una mayor lámina de agua aprovechable (Figura 4); sin embargo, el mismo presenta los valores más bajos entre pF 4.2 – 4.5 (PMP), lo cual se asemeja a los valores encontrados por (Boix et al. 1996) quien midió la retención de humedad total de los suelos.

Figura 4

Curvas de retención de humedad en los suelos bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI) y suelo manisero (SM). Chinandega y León, Nicaragua.



Al comparar la lámina de agua disponible promedio en las distintas profundidades se pudo observar que existe una mejor disponibilidad de agua en los primeros 20 cm. La resistencia a la

penetración pudo afectar el comportamiento del agua, puesto que al presentar un pie de arado a los 20 cm o menos, evita que exista un flujo de humedad ideal en el perfil del suelo y provoca que una alta cantidad de agua logre bajar a los 40 – 60 cm. Entre los 20 – 40 cm se presenta una disminución de la lámina de agua disponible en comparación a los primeros 20 cm, sin embargo, los resultados a esta profundidad no fueron significativamente diferentes con las de los primeros (0 a 20 cm) y las últimas profundidades muestreadas (40 a 60 cm), demostrando que existe un movimiento constante de agua. Es ideal para el cultivo de caña y el cultivo de maní, que exista una mayor lámina de agua disponible en los primeros cm de profundidad debido a que las raíces son más abundantes en los primeros centímetros de profundidad (Cuadro 5).

Cuadro 5

Efecto de la cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y cultivo de maní sobre la lámina de agua disponible (LADs) del suelo en tres diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.

Profundidad (cm)	LADs (mm/m)
00-20	333 a ^a
20-40	297 ab
40-60	277 b
R ²	0.62
CV (%)	17.51
P	0.049

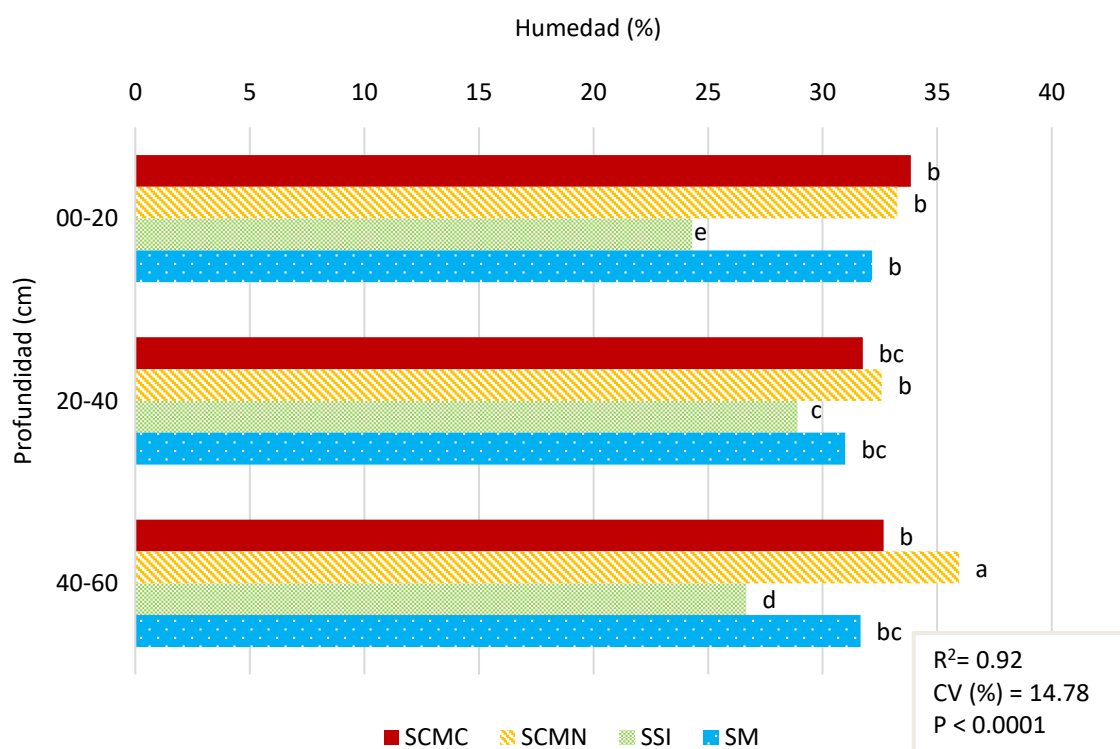
Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (P ≤ 0.05)

Al analizar las interacciones entre la lámina retención hídrica y la profundidad del suelo, se encontró que la mayor retención hídrica sucede entre los 40-60 cm en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual. Esto puede ocurrir puesto que en los primeros 40 cm aún existe una alta resistencia a la penetración, la cual está relacionada a las pérdidas de humedad por evaporación debido a las altas temperaturas durante la quema y a la pérdida de la cobertura protectora del suelo (Villazón-gómez et al. 2017). También se puede observar que la retención hídrica es constante bajo

cada uno de los diferentes manejos de suelo con respecto a la profundidad, lo cual implica que existe un comportamiento homogéneo en del perfil del suelo (Figura 5).

Figura 5

Variación de la retención hídrica (RH) por efecto del tipo de manejo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades del suelo. Chinandega y León, Nicaragua.



Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

Análisis de Raíces

La densidad longitudinal de raíces (DLR) favorece una mejor comprensión del crecimiento que estas tienen en los suelos y se encontró que existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la densidad de raíces en los diferentes tipos de manejo (Cuadro 7) y a las profundidades muestreadas (Cuadros 8), pero sin interacción entre ellas.

Cuadro 6

Significancia de la densidad longitudinal de raíces (DLR), bajo cuatro condiciones de manejo del suelo a tres profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.

Factores	DLR
Tipo de Manejo	***
Profundidad	**
Tipo de Manejo × Profundidad	NS

Nota. NS No Significativo ($P > 0.05$), *** Altamente significativo ($P < 0.0001$), ** Muy significativo ($P < 0.01 - 0.0001$) * Significativo ($P < 0.05 - 0.01$)

Se encontró que, aunque no existen diferencias estadísticamente significativas entre la cosecha mecanizada y la cosecha manual, si se presentaron menos raíces en el suelo que sufre quemadas anuales (Cuadro 7). Se puede atribuir este efecto a la existencia de una mayor resistencia a la penetración en los suelos con cosecha manual.

En el suelo sin intervención se obtuvieron los conteos más bajos de raíces, lo que puede ser causado porque la luz filtrada y reflejada por las hojas del dosel enriquecen en color verde el cual no puede ser absorbido por la clorofila y disminuye la capacidad de las plantas de llevar a cabo la fotosíntesis. Asimismo, el suelo sin intervención tiene la menor capacidad de retención de agua en comparación con los otros suelos muestreados, el estrés hídrico limita la capacidad de las plantas de fotosintetizar la poca luz que absorbe. Por lo que, si una planta crece en condiciones limitantes de agua y luz e invierte mucha biomasa en hojas para captar luz, no podrá tener las raíces necesarias para captar agua y viceversa (Valladares et al. 2004).

El suelo bajo la producción de maní no presentaba raíces ya que al momento de hacer el muestreo estaba recientemente cosechado y las raíces no permanecían presentes, lo que ocurre por la manera en que se cosecha el maní; la planta es arrancada en su totalidad y volteada en la superficie del suelo para que se seque y posteriormente es trillada para poder cosechar el fruto (Allochis y Quintana 2016).

Cuadro 7

Efecto de los tipos de manejo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre la densidad longitudinal de raíces (DLR). Chinandega y León, Nicaragua.

Tipo de Manejo ^β	DLR (cm/cm ³)
Cosecha mecanizada	0.022 a ^α
Cosecha manual	0.017 ab
Sin intervención	0.014 b
Suelo manisero	0 c
R ²	0.83
CV (%)	40.83
P	<0.0001

Nota. ^αValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (P ≤ 0.05)

^β Todos los suelos muestreados son de textura franca.

Se observó una diferencia altamente significativa (P≤0.0001) en la densidad de las raíces promedio en las tres profundidades muestreadas (Cuadro8). La mayor cantidad de raíces se encuentran en los primeros 20 cm de profundidad y van disminuyendo progresivamente a medida que aumenta la profundidad. Este comportamiento de las raíces es normal, ya que, como se explicó anteriormente, el 80% de las raíces de la caña de azúcar, se encuentran en los primeros 35 cm (Díaz y Portocarrero 2002).

Cuadro 8

Efecto de la profundidad del suelo sobre la densidad longitudinal de raíces (DLR) en diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.

Profundidad (cm)	DLR (cm/cm ³)
00-20	0.020 a ^α
20-40	0.013 b
40-60	0.008 c
R ²	0.83
CV (%)	40.83
P	0.0001

Nota. ^αValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa (P ≤ 0.05)

Condición Química de los Suelos

El manejo en los cuatro suelos reflejó un efecto en la composición química de los mismos. Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en todas las variables químicas, exceptuando fósforo y potasio (Cuadro 9). Se observaron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en el pH, la materia orgánica, calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc y manganeso en los diferentes manejos del suelo (Cuadro 10). En cuanto al efecto de la profundidad, solo se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el pH, la materia orgánica, el hierro y el zinc (Cuadro 12). Al analizar la interacción del manejo de los suelos y la profundidad se demostró que existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en tres variables: materia orgánica, hierro y cobre (Figura 6).

Cuadro 9

Significancia del efecto de los tipos de manejo a tres profundidades, sobre el pH, materia orgánica (MO), macro y micronutrientes en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.

Factores	Macro y Micronutrientes									
	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Tipo de Manejo	***	**	NS	NS	***	***	***	**	***	**
Profundidad	***	***	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	**
Tipo de Manejo × Profundidad	NS	**	NS	NS	NS	NS	**	NS	*	NS

Nota. NS No Significativo ($P > 0.05$), *** Altamente significativo ($P < 0.0001$), ** Muy significativo ($P < 0.01-0.0001$) * Significativo ($P < 0.05-0.01$)

No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los suelos que se cosechan de manera mecanizada y los que se cosechan manualmente, con excepción del manganeso, el cual muestra una diferencia de 8.6 unidades (15.0 y 6.4) entre los diferentes tipos de cosecha de caña de azúcar (Cuadro 10). Estos resultados coinciden con lo encontrado por (García y Vega 2018), quienes tampoco encontraron diferencias significativas entre la cosecha en verde y la quemada con respecto a la fertilidad química del suelo.

El suelo sin intervención presentó los niveles de pH, materia orgánica y macro nutrientes más altos en comparación con los suelos intervenidos agrónomicamente, sin embargo, obtuvo resultados bajos de micro nutrientes. La baja cantidad de micro elementos disponibles en el suelo es ocasionada por el pH alcalino. El pH de la solución del suelo es un buen indicador de la disponibilidad de nutrientes y se debe a que la presencia de los iones de aluminio (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$), H^+ y OH^- son determinantes de la solubilidad de los nutrientes en el suelo (hierro, manganeso, cobre, zinc) o son indicadores de la escasez de las formas disponibles de algunos de ellos en el suelo (calcio, magnesio, potasio, sodio) (Osorio 2012).

El suelo bajo el cultivo de maní, presentó los niveles más bajos de materia orgánica, lo que es causado por la poca o inexistente incorporación de rastrojo post cosecha. Puesto que el follaje de este cultivo es comúnmente utilizado en la alimentación animal en la región. También se observaron los niveles más altos de cobre en el suelo, los cuales pueden ser residuos por el uso constante de sulfato de cobre como fungicida (Reuther 1957).

Cuadro 10

Efecto del tipo de manejo del suelo (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el pH, materia orgánica (MO), macro y micronutrientes en el suelo.

Chinandega y León, Nicaragua.

Tipo de Manejo	pH	%		cmol/kg			mg/kg	
		MO	K	Ca	Mg	Mn	Cu	Zn
Cosecha mecanizada	6.1 c ^a	3.0 a	0.77	18 a	3.5 b	15.0 a	7.5 b	2.1 a
Cosecha manual	6.2 bc	2.5 a	0.53	19 a	3.0 bc	6.4 b	9.0 b	1.6 ab
Sin intervención	7.4 a	3.3 a	0.85	23 a	8.5 a	2.5 b	9.2 b	0.3 c
Suelo manisero	6.4 b	1.7 b	1.13	10 b	2.5 c	2.1 b	16.8 a	0.8 b
R ²	0.91	0.78	0.22	0.56	0.93	0.48	0.86	0.7
CV (%)	3.27	31.82	85.67	29.41	18.52	107.64	18.33	69.64
P	<0.0001	0.002	NS	0.0002	<0.0001	0.0022	<0.0001	0.0007

Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

Cuadro 11

Efecto del tipo de manejo de suelos (cosecha de caña mecanizada, manual, suelo sin intervención y suelo manisero) sobre el porcentaje de saturación de bases en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.

Tipo de Manejo	cmol/kg		% de Saturación	
	CICE	SK	SCa	SMg
Cosecha mecanizada	24.1	3.3 a	75.7 ab	15.0 b
Cosecha manual	23.8	2.3 b	78.7 a	12.7 b
Sin intervención	32.7	2.7 b	66.8 c	28.2 a
Suelo manisero	14.2	8.0 c	70.6 bc	17.5 b
Rango Adecuado		3 a 5	50 a 75	15 a 20
R ²	0.67	0.43	0.53	0.64
CV (%)	23.95	85.13	9.26	35.77
P	<0.0001	0.0062	0.0051	0.0002

Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

Los análisis demostraron que existe una muy alta significancia (<0.0001) en las variables de pH, materia orgánica y hierro en las diferentes profundidades del suelo. El pH encontrado a los 40-60 cm de profundidad es ligeramente más neutral que el de los primeros 20 cm. Esto puede ser causado por el alto porcentaje de materia orgánica que se encuentra en la superficie, ya que, al descomponerse la materia orgánica por microorganismos, se produce un constante suplemento de dióxido de carbono, que reacciona con el agua y aporta H⁺ y bicarbonato que se combina con cationes básicos, los que consecutivamente son lavados del perfil, acidificando el suelo (Espinosa y Molina 1999). El pH ligeramente ácido y el elevado contenido de materia orgánica en los 20 cm influyen en que exista mayor disponibilidad de hierro (Fe) y zinc (Zn) a esta profundidad. Los resultados de esta investigación concuerdan con lo encontrado por (Roca et al. 2007).

Cuadro 12

Efecto del tipo de manejo de suelos (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) sobre el pH, materia orgánica (MO), (Fe) y zinc (Zn) en el suelo a diferentes profundidades. Chinandega y León, Nicaragua.

Profundidad (cm)	pH	mg/kg		
		%	Fe	Zn
00-20	6.2 c ^a	3.7 a	129 a	2.2 a
20-40	6.6 b	2.5 b	118 b	0.8 b
40-60	6.8 a	1.7 c	107 c	0.6 b
R ²	0.91	0.78	0.98	0.70
CV (%)	3.27	31.82	8.42	69.64
P	<0.0001	<0.0001	0.0001	0.0002

Nota. ^aValores con letras diferentes en la misma columna indica diferencia significativa ($P \leq 0.05$)

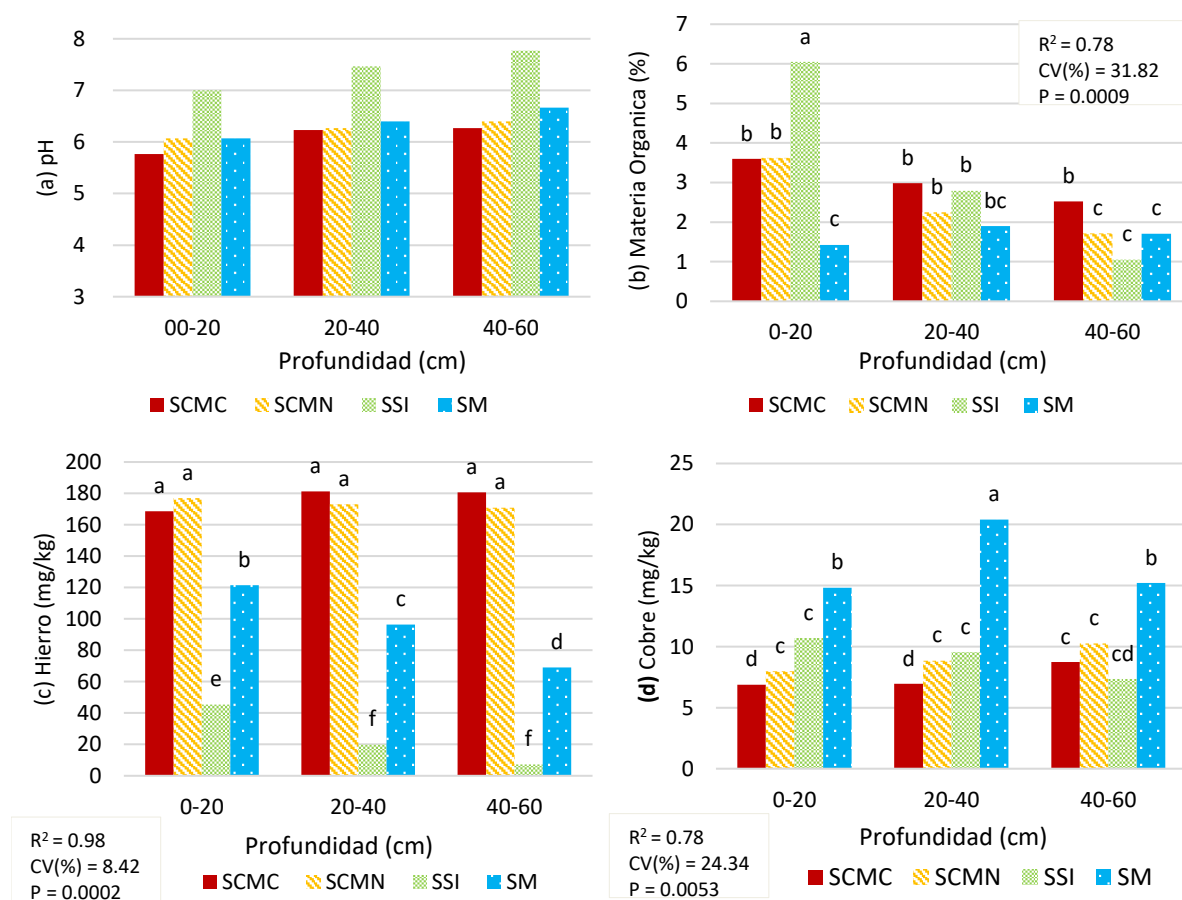
El porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo sin intervención fue considerablemente mayor que en los otros tipos de manejo de suelo. A pesar que, no existen diferencias estadísticamente significativas entre la materia orgánica en los suelos bajo producción de caña, se puede observar un mayor contenido de materia orgánica en las tres profundidades muestreadas del suelo donde se practica la cosecha mecanizada. Existe una disminución constante de 0.5% a medida que se profundiza en el suelo. Mientras que, en el suelo con cosecha manual, existen una disminución de 1.3% y 0.6% entre los 20-40 y 40-60 cm respectivamente. Esto demuestra que, a través de los 15 años de producción, la materia orgánica proveniente de los rastrojos de cosecha se ha ido incorporando en todo el perfil del suelo, no solamente en la superficie (Figura 6a).

Los niveles más altos de hierro se encontraron en los suelos bajo la producción de caña en todas las profundidades muestreadas. El suelo sin intervención presentó los niveles más bajos de este micro elemento. Esto ocurre puesto que el suelo sin intervención tiene un pH alcalino y la abundancia de iones OH⁻ produce la precipitación de compuestos insolubles de hierro, manganeso, cobre y zinc. De esta manera estos micronutrientes se hacen no-disponibles para su absorción por las raíces de las plantas (Osorio 2012) (Figura 6b).

Los niveles de cobre fueron más altos en el suelo bajo la producción de maní causados por la residualidad que deja el sulfato de cobre al estarse utilizando como fungicida por muchos años (Reuther 1957). que Se observa un comportamiento interesante del cobre en relación a la profundidad en los suelos bajo cultivo de caña, ya que se encuentra en menor proporción en las primeras profundidades de estos y va aumentando a medida que aumenta la profundidad. Esto se debe a que el Cu es el metal bioasimilable que se moviliza y desplaza a lo largo del perfil con mayor facilidad (Roca et al. 2007) (Figura 6c).

Figura 6

Efecto del tipo de manejo del suelo (cosecha de caña mecanizada (SCMC), manual (SCMN), suelo sin intervención (SSI), suelo manisero (SM)) a diferentes profundidades sobre el (a) pH, (b) materia orgánica, (c) hierro y (d) cobre en el suelo. Chinandega y León, Nicaragua.



Conclusiones

La cosecha mecanizada como manejo del suelo en caña de azúcar ofrece condiciones que mejoran la calidad del suelo ya que reduce la compactación y acumula materia orgánica mejor distribuida en la profundidad del medio edáfico, respecto a la cosecha manual y se asemeja a los suelos que no han sido intervenidos.

La producción de cultivos caña de azúcar y maní reduce el pH de suelo a niveles bajo la condición ideal para la producción vegetal

El cultivo de maní reduce la calidad de los suelos en comparación con los suelos bajo el cultivo de caña debido a que presentan bajo contenido de materia orgánica y una menor cantidad de espacio poroso. El cultivo de caña impacta menos en la pérdida de la calidad del suelo referente al cultivo de maní, a pesar de ser explotados con intensidad para la producción.

Recomendaciones

Migrar a la cosecha mecanizada sin quema en el cultivo de la caña de azúcar, ya que permite mantener y mejorar la calidad del suelo respecto a la cosecha manual con quema.

En el cultivo de maní deben incorporarse prácticas que fomenten la incorporación y acumulación de materia orgánica y además se disminuya la aplicación de productos cúpricos que se acumulan en el suelo.

Realizar una investigación donde se compare la calidad del suelo bajo el cultivo de caña antes y después de la cosecha (manual y mecanizada).

En futuras investigaciones incluir la medición de la cantidad de micro, meso y macro poros en los suelos y el contenido de materia orgánica total.

Investigar el efecto que tiene la cosecha manual y mecanizada en la población y diversidad de macro y micro organismos del suelo.

Evaluar el efecto de la cosecha mecanizada y manual en suelos con características diferentes a los evaluados en la presente investigación.

Referencias

- Allochis HD, Quintana V. 2016. Efecto del maní sobre las propiedades físicas y la erosión eólica en suelos de texturas contrastantes de la Región Semiárida Pampeana [Tesis]. Argentina: Universidad Nacional de La Pampa.
- Blake GR. 1965. Bulk Density. En: Black CA, editor. *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. 1ª ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc. p. 374–390.
- Boix C, Calvo A, School JM, Soriano MD. 1996. Influencia de la estructura y usos del suelo en las características de retención hídrica de suelos mediterráneos sobre litología caliza. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*; [consultado el 31 de may. de 2021]. 21:587–596. <https://bit.ly/3yDbLkz>.
- Bouyoucos GJ. 1927. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *Soil Science*. 23(5):343–354. doi:10.1097/00010694-192705000-00002.
- Chasiluisa M. 2015. Comportamiento agronómico de maní (*Arachis hypogaea* L.) con abonos orgánicos en la parroquia el Carmen, Cantón la Maná [Tesis de Grado]. Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi. 62 p; [consultado el 6 de mar. de 2021].
- [CNPA] Comité Nacional de Productores de Azúcar. 2020. Datos finales de producción zafra 2019-2020. Nicaragua: [sin editorial]; [actualizado el 26 de may. de 2021; consultado el 26 de may. de 2021]. Datos Finales de Produccion. <https://bit.ly/3ALK0bF>.
- Cruz EA, Arevalo de Gauggel G, Castellanos ME. 2008. Calidad y Manejo de Suelos En la zona de Chinandega y León Nicaragua [Informe]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Díaz L, Portocarrero E. 2002. Manual de Producción de Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.) [Manual]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <http://hdl.handle.net/11036/2247>.
- Díaz-Romeu R, Hunter A. 1978. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Turrialba, Costa Rica: CATIE (Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza). 70 p. <http://hdl.handle.net/11554/3115>.
- Eijkelkamp. 2017. Penetrologger User Manual. Giesbeek, the Netherlands: [sin editorial]. 41 p.
- Espinosa J, Molina E. 1999. Acidez y Encalado de los Suelos. 1ª ed. [sin lugar]: Intenational Plant Nitrition Institute. 42 p.
- Friedrich T. 2014. La seguridad alimentaria: Retos actuales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*; [consultado el 6 de mar. de 2021]. 48(4):319–322.
- García Y, Vega A. 2018. Efecto de dos sistemas de cosecha de la caña de azúcar sobre la calidad del suelo en Cantón Milagro, Ecuador. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 4(2):60–68. doi:10.30973/aap/2018.4.2/5.
- [INETER] Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. 2020. Meteorología. Nicaragua: [sin editorial]; [actualizado el 26 de abr. de 2021; consultado el 3 de jun. de 2021]. <https://bit.ly/3xGBdG5>.

- John Deere. 2020. CH570: Cosechadora de Caña John Deere. [sin lugar]: [sin editorial]; [actualizado el 22 de jul. de 2021; consultado el 22 de jul. de 2021]. <https://www.deere.com/latin-america/es/magazines/publication.html?id=376ba96c>.
- Llanes GM, Rizo Bermúdez DO, Mendoza Corrales RB, Avilés Silva EA, Duarte Canales HA. 2020. Agricultura de conservación de suelos y su efecto en la erosión hídrica y propiedades hidrofísicas en la unidad hidrográfica Quebrada Arriba, Yalagüina, 2017. *La Calera*. 20(34):57–63. doi:10.5377/calera.v20i34.9773.
- Mclean EO. 1982. Soil pH and Lime Requirement. En: Page AL, editor. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9.2.2, Second Edition. Vol. 9. 2ª ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc. p. 199–224.
- Miller R, Donahue R. 1995. *Soils in Our Environment*. 7ª ed. United States of America: Prentice Hall. ISBN: 0-13-095803-4.
- Montenegro H, Malagon D. 1990. *Propiedades físicas de los suelos*. Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Nelson DW, Sommers LE. 1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. En: Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME, editores. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5.3. 1ª ed. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. p. 961–1010.
- Olsen SR, Sommers LE. 1982. Phosphorus. En: Page AL, editor. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9.2.2, Second Edition. Vol. 9. 2ª ed. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy, Inc. p. 403–430.
- Osorio NW. 2012. pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*; [consultado el 4 de jun. de 2021]. 1(4):1–4. <https://bit.ly/36m3Ps7>.
- Porta J, López-Acevedo M, Poch R. 2014. *Edafología: Uso y protección de suelos*. 3ª ed. España: Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 978-84-8476-661-2.
- Rein P. 2016. *Cane sugar engineering*. 2ª ed. Alemania: Verlag Dr. Albert Bartens KG. ISBN: 978-3870401672. English.
- Reuther W. 1957. Copper and Soil Fertility. *Soil, the yearbook of agriculture*; [consultado el 6 de oct. de 2021]. 128–134. <https://bit.ly/2VnqqIM>.
- Richardson JL, Daniels RB. 1993. Stratigraphic and Hydraulic Influences on Soil Color Development. En: Bigham JM, Ciolkosz EJ, Luxmoore RJ, editores. *Soil color: Proceedings of a symposium sponsored by Divisions S-5 and S-9 of the Soil Science Society of America in San Antonio, Texas, 21-26 Oct. 1990*. Madison, Wis, USA: Soils Science Society of America. p. 109–125 (SSSA special publication; no. 31).
- Roca N, Pazos MS, Bech J. 2007. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del noroeste argentino. *Ciencia del Suelo*. 25(1):31–42. <https://bit.ly/3qVrdGl>.
- Romaniuk RI. 2010. *Índices de calidad de suelos: Evaluación en sistemas extensivos e intensivos de producción agrícola [Tesis]*. Argentina: Universidad de Buenos Aires. 243 p.
- Salinas JG, García R. 1979. *Métodos analíticos para suelos ácidos y plantas*. Cali, Colombia: CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 62 p. <https://bit.ly/3jVAbBS>.

- Schindler U, Durner W, Unold G von, Mueller L, Wieland R. 2010. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 173(4):563–572. doi:10.1002/jpln.200900201.
- Souza RA, Telles TS, Machado W, Hungria M, Filho JT, Guimarães MdF. 2012. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 155(1):1–6. doi:10.1016/j.agee.2012.03.012.
- [SSDS] Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. Washington D.C. United States of America: [sin editorial]. 18 vol. ; [consultado el 30 de may. de 2021]. <https://bit.ly/3wwo1lg>.
- Usaborisut P, Sukcharoenpharat W. 2011. Soil compaction in sugarcane fields induced by mechanization. *American Journal of Agricultural and Biological Science*. 6(3):418–422. doi:10.3844/ajabssp.2011.418.422.
- Valladares F, Aranda I, Sánchez-Gómez D. 2004. La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. En: Valladares F, editor. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. España: EGRAF, S. A. p. 335–369 (Naturaleza y Parques Nacionales). <https://bit.ly/3dZPZjc>.
- Vijil J, Villaseca WE, Mena P. 2001. *El Cultivo del Maní* [Tesis]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 44 p; [consultado el 6 de mar. de 2021].
- Villazón-gómez JA, Morales-Menéndez AM, Martín-gutiérrez G. 2017. Effect of Sugarcane Management over Compaction on a Vertisol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 26(2):31–37. <https://www.redalyc.org/pdf/932/93250841004.pdf>.
- Wilson M, Sasal M. 2017. Aplicación de indicadores de calidad de suelo para el monitoreo agroambiental. En: Wilson MG, editor. *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. Vol. 1. 1ª ed. Argentina: Ediciones INTA. p. 23–26 ; [consultado el 25 de may. de 2021]. https://inta.gob.ar/sites/default/files/manual_ics_final.pdf.

Anexos**Anexo A**

Imágenes de las tres calicatas realizadas en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha mecanizada.

Chinandega y León, Nicaragua.

Coordenadas

12°40'3.27"N
87°14'40.18"O



12°40'2.33"N
87°14'40.09"O

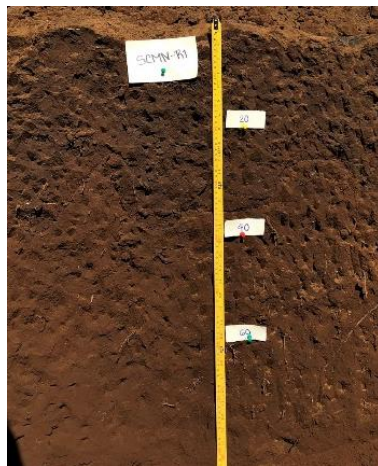


12°40'2.93"N
87°14'39.33"O

Anexo B

Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo bajo cultivo de caña con cosecha manual.

Chinandega y León, Nicaragua.

Coordenadas

12°41'15.92"N
87°14'11.32"O



12°41'15.73"N
87°14'10.99"O



12°41'15.49"N
87°14'11.34"O

Anexo C

Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo sin intervención. Chinandega y León, Nicaragua.

Coordenadas

12°43'57.94"N
86°51'46.14"O



12°43'55.79"N
86°51'46.51"O



12°43'56.36"N
86°51'44.22"O

Anexo D

Imágenes de las tres calicatas realizada en el suelo bajo producción de maní. Chinandega y León, Nicaragua.

Coordenadas

12°28'56.87"N
86°53'16.74"O



12°29'0.30"N
86°53'17.31"O



12°28'57.90"N
86°53'10.04"O