

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA COMPACTACIÓN DEL SUELO  
DURANTE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR (*SACCHARUM OFFICINARUM SP.*)

STUDY OF SPATIAL VARIABILITY IN SOIL COMPACTION DURING SUGARCANE  
HARVEST (*SACCHARUM OFFICINARUM SP.*)

1

**Leandro Vázquez Sevilla, Luis Delmis Pérez Soto, Yosvel Enrique Olivet Rodríguez**

*Ing. Leandro Vázquez Sevilla, Ing. Aspirante a Investigador, Especialista de Maquinaria, Delegación de la Agricultura.*  
<https://orcid.org/0000-0002-9623-6215>

*Luis Delmis Pérez Soto, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuaria, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Granma, Cuba. Email: [lperezs@udg.co.cu](mailto:lperezs@udg.co.cu), <https://orcid.org/000-0002-4640-2932>*

*Yosvel Enrique Olivet Rodríguez, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuaria, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad de Granma, Cuba. Email [yeolivetr@gmail.com](mailto:yeolivetr@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3257-8790>*

## Resumen

El trabajo fue realizado en la CPA "Carlos Manuel de Céspedes", perteneciente a la Empresa Azucarera "Arquímedes Colina Antúnez " del municipio de Bayamo, provincia de Granma. El mismo tuvo el objetivo de determinar la variabilidad espacial de la compactación del suelo provocada por el tránsito de las nuevas tecnologías de cosecha de caña de azúcar mediante la metodología geoestadística. La investigación se llevó a cabo en la campaña 2023-2024. Se evaluó la resistencia a la penetración en dos momentos, antes y después de la cosecha, donde se utilizó un penetrómetro electrónico TJSD-750. El muestreo se hizo sistemáticamente en cuadrículas, realizando 100 observaciones antes y después, respectivamente. Se determinaron los parámetros estadísticos por el software Statistica 8.0 y para el análisis geoestadístico se utilizó el GS+ Geostatistics Software. Los principales resultados demostraron que el tráfico de las nuevas tecnologías de cosecha definió gran variabilidad espacial en la escala de muestreo y provocó una redistribución de las zonas de compactación.

Palabras claves: suelo, compactación, tráfico, cosecha, penetrómetro.

## Abstract

The work was carried out at the CPA "Carlos Manuel de Céspedes", belonging to the Sugar Company "Arquímedes Colina Antúnez" in the municipality of Bayamo, province of Granma. The objective of the study was to determine the spatial variability of soil compaction caused by the transit of new sugarcane harvesting technologies using geostatistical methodology. The research was carried out in the 2023-2024 campaign. The resistance to penetration was evaluated at two times, before and after the harvest, where a TJSD-750 electronic penetrometer was used. Sampling was done systematically in grids, making 100 observations before and after, respectively. The statistical parameters were determined by the Statistica 8.0 software and the GS+ Geostatistics Software was used for the geostatistical analysis. The main results showed that the traffic of new harvesting technologies defined great spatial variability in the sampling scale and caused a redistribution of the compaction zones.

Key words: soil, compaction, traffic, harvest, penetrometer.

## 1. Introducción

La compactación del suelo es una de las causas principales de los bajos niveles de productividad del cultivo de la caña de azúcar, originada fundamentalmente cuando se emplean métodos tradicionales en la preparación de los suelos para la siembra y durante la zafra (Delmond et al., 2024; González et al., 2024). Según de Andrade Bonetti et al. (2023), este fenómeno causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración, en la densidad aparente y reduciendo la porosidad. La compactación además reduce la velocidad de infiltración de agua, causa disminución en el drenaje, reduce la disponibilidad de agua y abastecimiento de aire y oxígeno utilizado por las raíces. Al incrementarse la densidad del suelo se crea una barrera física que no permite que las raíces penetren adecuadamente. Estas pueden modificar el crecimiento radicular y pueden experimentarse simultáneamente en la compactación del suelo, siendo difícil diferenciar entre sus efectos.

Muchas investigaciones realizadas en varios países, indican que la compactación limita el rendimiento potencial de los cultivos, pudiendo disminuirlo entre un 15 y 25 % (Merani

et al., 2024). En Cuba, Reynoso atribuyó un gran porcentaje en los rendimientos de los campos de caña de azúcar con una reducción de la compactación (Suárez et al., 2024). En este sentido Solano et al. (2023) y (Saavedra & Chaparro, 2022), señalan que la mecanización del corte de la caña puede compactar el 20 % del área total del campo, ocasionando pérdidas de hasta tres t de azúcar por ha.

3

La precisión de las afirmaciones que pueden hacerse en relación con la compactación del suelo en un determinado lugar, depende en gran medida de la magnitud de su variación dentro del área muestreada. En la medida que la heterogeneidad del suelo aumenta, disminuye a su vez la precisión de las inferencias que puedan hacerse en relación con sus propiedades, comportamiento y pronósticos en relación con el uso de la tierra. En los estudios de suelos, el investigador generalmente dispone de un número limitado de observaciones, por lo que le es necesaria la extrapolación de las propiedades del suelo de lugares donde son conocidas hacia otros donde no lo son. La misma está influenciada fuertemente por la variabilidad de los suelos tanto dentro de las muestras tomadas como entre la ubicación de los puntos de muestreo. El reconocimiento de la importancia de la variabilidad espacial sobre el uso de la tierra ha conducido al estudio de la misma, desde una escala global hasta el análisis de cambios en la composición física y en particular en la impedancia mecánica (Villazón et al., 2024). Para ello el uso de la geoestadística puede ser el método más efectivo para el estudio de esa variabilidad (Saavedra-Rincón & Chaparro-Anaya, 2022).

En la provincia Granma existen dificultades con la utilización de los métodos no lineales para el estudio de la compactación del suelo. Los cuales sirven a los productores e investigadores a la toma de decisiones. Además, con la introducción de las nuevas tecnologías no podemos afirmar el efecto que producen las mismas sea el mismo, ya que todas no presentan las mismas características y distribución espacial que produce la tecnología de cosecha de alta humedad en la Empresa Arquímedes Colina. Planteando como objetivo fundamental, determinar la distribución espacial de la compactación del suelo en la Empresa Arquímedes Colina provocada por el tránsito de las nuevas tecnologías de cosecha de caña de azúcar mediante la metodología geoestadística.

## 2. Materiales y métodos

Este trabajo se realizó en la parcela 5 del bloque 164 de la CPA “Carlos Manuel de Céspedes” de la UEB Atención a productores cañeros perteneciente a la Empresa Azucarera “Arquímedes Colina Antúnez” del municipio de Bayamo, en la provincia Granma, con el objetivo de conocer la variabilidad espacial de compactación del suelo a través de muestreos de Penetrometría, aplicando los métodos clásicos de la Estadística y la metodología geoestadística, durante la campaña 2023-2024. Sobre un *Vertisol* (Hernández et al., 2019) de consistencia media, con poca cantidad de residuos vegetales medio, sin obstáculos con topografía relativamente llana y humedad gravimétrica media de 15,29 % antes de la cosecha y de 14,90 % después de la cosecha (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Contenido de Humedad Gravimétrica (Hg) antes y después de la cosecha

Prof. (cm)	Antes de la cosecha	Hg	Después de la cosecha	Hg
0 - 10	Media (%)	14,18	Media (%)	13,68
	Mínimo (%)	12,56	Mínimo (%)	10,04
	Máximo (%)	16,87	Máximo (%)	16,13
	Rango	4,31	Rango	6,09
10 - 20	Media (%)	15,23	Media (%)	15,04
	Mínimo (%)	13,58	Mínimo (%)	13,52
	Máximo (%)	16,90	Máximo (%)	16,45
	Rango	3,32	Rango	2,93
20 - 30	Media (%)	16,48	Media (%)	16,0
	Mínimo (%)	14,01	Mínimo (%)	13,81
	Máximo (%)	17,84	Máximo (%)	18,84
	Rango	3,83	Rango	5,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Características del suelo en textura, pH y materia orgánica (MO) para un número de muestra n = 15 a la profundidad de 0 – 10 cm

Características del suelo	Media	CV (%)
Arcilla (%)	51,90	3,32
Limo (%)	26,51	4,11
Arena (%)	21,59	2,56

pH (-) (H <sub>2</sub> O)	7,1	2,21
Materia orgánica (%)	3,31	5,81

Fuente: Elaboración propia.

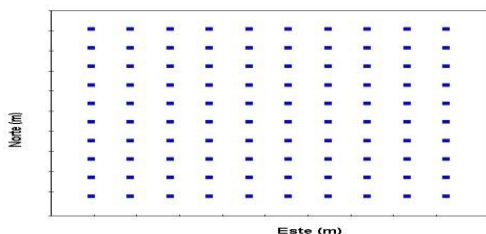
5

El campo de caña es de 4,5 ha (150 m de ancho x 400 m de largo). El cultivo se cosechó en abril de 2016. La distancia entre hileras es de 1,6 m. La orientación de las mismas coincide con los puntos cardinales (sur a norte). Variedad de caña de azúcar: C86-456. Labor realizada antes de la cosecha: cultivo.

### 3. Diseño experimental

Los valores de resistencia a la penetración (RP) fueron obtenidos en los vértices de cuadrículas con un intervalo de muestreo de 1,6 m en las direcciones Norte y Este (Figura 1 y 2). Antes de la cosecha se diseñó una cuadrícula de 100 puntos (10 x 10 puntos). Después de la cosecha la cuadrícula constó de la misma cantidad de observaciones, 100 puntos (10 x 10 puntos) con el mismo intervalo de muestreo. La distancia entre surcos es de 1,6 m. Por esta razón todos los puntos coincidieron con el área de tránsito de la maquinaria. En ambos casos, el utilizar entre 100 y 150 puntos es aceptable para los análisis de variabilidad espacial (Villazón Gómez et al., 2022).

Figura 1. Representación esquemática del diseño del experimento: 100 puntos de muestreo antes y después de la cosecha en cuadrícula.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Penetrómetro electrónico TJSD-75



Fuente: Elaboración propia.

### Maquinaria empleada en el proceso de cosecha del cultivo

La maquinaria empleada en el proceso de cosecha fue la siguiente:

- **Cosechadora:** Case IH A-8800
- **Medios de Transporte:** SINOTRUK con remolques
- **Tractor:** YTO-1604
- **Remolques Auto-vasculantes:** Vaculadores

#### 4. Determinación de la resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración del suelo se determinó con un penetrómetro electrónico TJSD-750 (Figura 2). Las características más importantes de este instrumento de medición son: resolución de la profundidad de 0-450 mm, resolución de la medición de 0-100 kg, rango de medición en profundidad 0.05 cm, el rango de sensibilidad del cono de 0 a 7 MPa y cono reemplazable de 1,262 cm de diámetro. Como partes fundamentales para su funcionamiento cuenta con un sensor de presión (interior) y un sensor de ultrasonido (exterior) ubicado en la base del instrumento, con un campo de visión de 30° a partir del eje central.

#### 5. Análisis y discusión de los resultados

##### 5.1. Estadística descriptiva de la resistencia a la penetración

La Tabla 3 muestra el resumen estadístico descriptivo de los valores de la resistencia a la penetración antes de la cosecha. Se observa que la media varía desde 1,06 a 3,15 MPa en las profundidades de 2,5 a 30 cm, respectivamente, a medidas que aumentó la profundidad aumentaron las medias de resistencia a la penetración. Se destaca que a partir de los 22,5 a 30 cm de profundidad la resistencia a la penetración alcanzó y superó los 3 MPa, valor restrictivo para el crecimiento de las raíces de cualquier cultivo (Villazón Gómez et al., 2022).

Tabla 3. Estadística descriptiva general de la resistencia a la penetración antes de la cosecha (n=100):  $\overline{RP}$ , media;  $RP_{Min}$ , mínimo;  $RP_{Max}$ , máximo;  $S^2$ , varianza muestral; CV, coeficiente de variación; Ca, coeficiente de asimetría y Ku, Kurtosis

Prof. (cm)	$\overline{RP}$ (MPa)	$RP_{Min}$ (MPa)	$RP_{Max}$ (MPa)	$S^2$	CV (%)	Ca	Ku
0-2,5	1,06	0,02	3,30	0,53	68,40	0,54	0,51
2,5-5	2,39	0,80	3,50	0,31	23,55	-0,24	0,44
5-7,5	2,42	0,90	3,40	0,24	20,30	-0,38	1,00

7,5-10	2,45	0,40	3,56	0,23	19,96	-0,28	2,53
10-12,5	2,46	0,90	3,87	0,23	19,78	0,32	1,12
12,5-15	2,47	0,57	3,80	0,32	22,91	-0,48	1,36
15-17,5	2,70	0,55	3,95	0,33	21,47	-0,39	0,44
17,5-20	2,79	1,25	4,10	0,34	21,03	-0,21	-0,33
20-22,5	2,95	1,25	4,30	0,35	20,26	-0,43	0,07
22,5-25	3,01	1,15	4,30	0,26	17,14	-0,92	2,14
25-27,5	3,05	1,25	4,60	0,26	16,99	-0,74	2,17
27,5-30	3,15	2,06	4,50	0,17	13,21	-0,76	2,03

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados están por debajo de los valores encontrados por Villazón et al. (2024) en la cosecha mecanizada del cultivo de la caña de azúcar. Estos han señalado la dificultad que presenta el desarrollo del sistema radical de los cultivos a partir 0,9 a 3 MPa. Los valores mínimos de la RP fueron aumentando paulatinamente a medida que aumentó la profundidad, estos se encontraron entre 0,02 y 2,06 MPa. De igual manera sucede con los valores máximos en cada profundidad, donde estos están entre 3,30 y 4,60 MPa. Resultados similares fueron encontrados por Pérez et al. (2010), donde realizaron el estudio de la variabilidad de resistencia a la penetración en el mismo tipo de suelo.

La estadística descriptiva también resalta la variabilidad de la RP para las distintas profundidades. Las profundidades con mayor variabilidad, expresada en términos del CV, fueron la de 2,5 y 5 cm, en la que los valores son del 68 % y 23 %, respectivamente, clasificándose como altamente heterogéneas. Este coeficiente disminuye a medidas que aumenta la profundidad (Tabla 3), por lo que la variabilidad ha disminuido en las profundidades estudiadas. Esa alta variabilidad puede deberse a la interacción directa del horizonte superior con los agentes externos que actúan sobre el suelo (por ejemplo, la maquinaria agrícola). Resultados similares fueron alcanzados por Pérez et al. (2010), los cuales observaron una variabilidad de la resistencia a la penetración superior a la vista en esta investigación.



## 5.2. Estadística descriptiva de la resistencia a la penetración después de la cosecha

La Tabla 4 muestra el resumen estadístico descriptivo de los valores de la resistencia a la penetración después de la cosecha. Se observa que la media varía desde 3,89 a 3,95 MPa, superior en todos los momentos a antes de la cosecha, por lo que el tránsito aumentó la compactación del suelo (Figura 3). El valor mínimo se localiza a los 2,5 cm de profundidad con valor de 1,01 MPa, y aumentan a medida que aumenta la profundidad hasta llegar a 1,15 MPa, siendo así con los valores máximos, los cuales están entre 1,41 y 4,99 MPa. La estadística descriptiva también resalta la alta variabilidad de la RP para las distintas profundidades. Las profundidades con mayor variabilidad, expresada en términos del CV, fueron la de 2,5 y 25 cm, en la que los valores son del 30 %, por lo que se puede inferir que la resistencia a la penetración presenta un comportamiento muy heterogéneo (Saavedra & Chaparro, 2022). Estos valores disminuyeron después del paso de la maquinaria, exceptuando las profundidades de 17,5 cm y 25 cm, en las cuales aumentó CV. En sentido general, la estadística tradicional es una buena opción si las observaciones son espacialmente independientes, pero no es conveniente para interpretar los resultados debido a la hipótesis latente de que exista dependencia espacial de la variable. Otro elemento importante es que en la mayoría de los casos la Kurtosis y el coeficiente de asimetría dan muestra de que no existe normalidad de los datos, por lo que la geoestadística puede ser efectiva en este estudio.

Tabla 4. Estadística descriptiva general de la resistencia a la penetración después de la cosecha (n=100):  $\bar{RP}$ , media;  $RP_{Min}$ , mínimo;  $RP_{Max}$ , máximo;  $S^2$ , varianza muestral; CV, coeficiente de variación; Ca, coeficiente de asimetría y Ku, Kurtosis

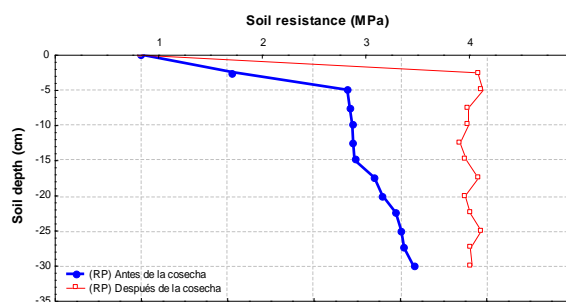
Prof. (cm)	$\bar{RP}$ (MPa)	$RP_{Min}$ (MPa)	$RP_{Max}$ (MPa)	$S^2$	CV (%)	Ca	Ku
0-2,5	3,89	1,01	1,41	2,31	39,01	2,43	19,93
2,5-5	3,95	1,02	4,94	1,25	28,23	-1,43	0,66
5-7,5	3,78	1,06	4,97	1,38	31,03	-1,30	0,24
7,5-10	3,78	1,15	4,94	1,45	31,86	-1,23	0,01
10-12,5	3,69	1,05	4,95	1,45	32,70	-1,09	-0,33
12,5-15	3,76	1,05	4,99	1,43	31,79	-1,07	-0,33
15-17,5	3,90	1,02	1,41	2,31	38,95	2,53	19,64
17,5-20	3,75	1,01	4,95	1,29	30,35	-1,28	0,35
20-22,5	3,81	1,1	4,95	1,22	29,09	-1,31	0,45
22,5-25	3,93	1,02	1,41	2,40	39,41	2,25	17,80
25-27,5	3,81	1,03	4,98	1,26	29,47	-1,26	0,30



27,5-30 3,83 1,02 4,97 1,27 29,42 -1,28 0,37

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Gráfico de perfiles de resistencia a la penetración para antes y después de la cosecha



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Análisis estructural de los semivariogramas

La Tabla 5 muestra los parámetros de los modelos teóricos que se ajustaron a los 12 semivariogramas de RP antes de la cosecha a las 12 profundidades consideradas. Se puede observar que en general no existió estructura espacial de la compactación del suelo en la escala de muestreo evaluada, excepto en los primeros 10 cm; donde existió dependencia lineal entre las observaciones y la distancia de muestreo, demostrada por los parámetros del semivariograma.

Tabla 5. Parámetros de los semivariogramas antes de la cosecha:  $C_0$ , efecto nugget;  $C_t$ , meseta;  $A_0$ , Alcance; RMSE, error cuadrado medio y  $R^2$ , coeficiente de correlación

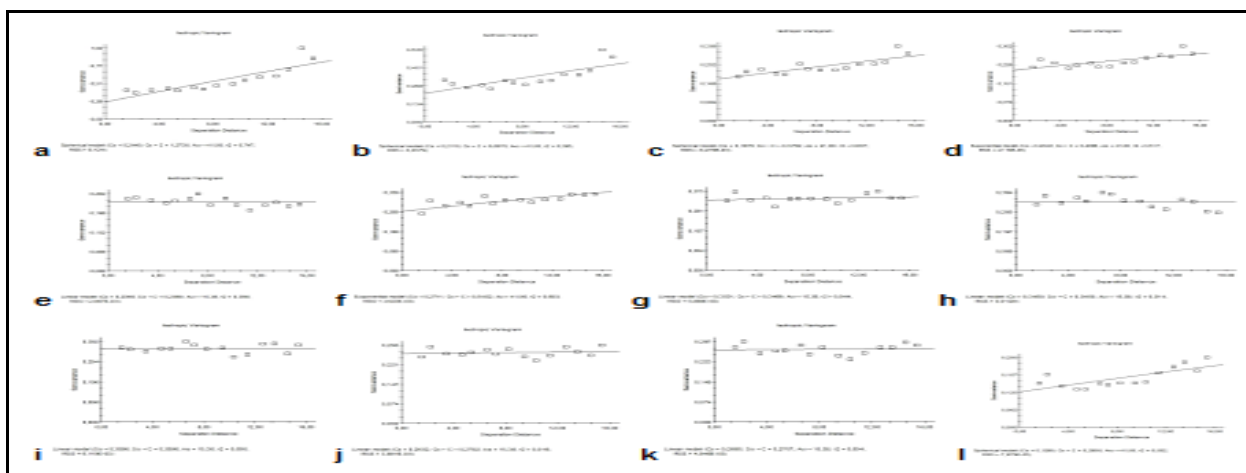
Prof. (cm)	Modelo	$C_0$	$C_t$	$A_0$	RMSE	$R^2$
0-2,5	Esférico	0,24	1,27	41,00	0,12	0,74
2,5-5	Esférico	0,21	0,60	41,00	0,03	0,59
5-7,5	Esférico	0,18	0,37	41,00	6,278e-03	0,65

7,5-10	Exponencial	0,20	0,40	41,00	4,119e-03	0,51
10-12,5	Sin estructura	-	-	-	-	-
12,5-15	Exponencial	0,27	0,54	41,00	3,82	0,60
15-17,5	Sin estructura	-	-	-	-	-
17,5-20	Sin estructura	-	-	-	-	-
20-22,5	Sin estructura	-	-	-	-	-
22,5-25	Sin estructura	-	-	-	-	-
25-27,5	Sin estructura	-	-	-	-	-
27,5-30	Esférico	0,12	0,29	41,00	7,97	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Además, todos los modelos presentaron meseta, lo que indica que cumplen con la hipótesis de estacionaridad. El mayor rango de correlación espacial (Figura 4) se presentó para la profundidad de 0 a 2,5 cm ( $A_0 = 41,0$  m) con el menor error cuadrado medio en cuanto a la selección del modelo esférico considerado ( $R^2=0,74$ ). Por otra parte, la varianza nugget se comportó con una débil dependencia espacial (Wani et al., 2024). Se obtuvo un comportamiento aleatorio, efecto nugget puro, a la profundidad de 10-12,5; 15-17,5; 17,5-20; 20-22,5; 22,5-25 y 25-27,5 cm. Es probable que esta profundidad esté asociada a una zona de transición entre horizontes del suelo, donde pueden existir cambios de algunas propiedades reológicas del suelo.

Figura 4. Semivariogramas de RP antes de la cosecha: a (2,5 cm); b (5 cm); c (7,5 cm); d (10 cm); e (12,5 cm); f (15 cm); g (17,5 cm); h (20 cm); i (22,5 cm); j (25 cm); k (27,5 cm); l (30 cm)



Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4. Parámetros de los semivariogramas después de la cosecha

La Tabla 6 muestra los resultados de los parámetros de los semivariogramas después de la cosecha del cultivo. En el caso particular de la varianza nugget, esta fue muy inferior después de la cosecha comparada con lo que ocurrió antes de esta (Figura. 5). Después del paso de la maquinaria se conformó una mejor estructura espacial, demostrada por el alto coeficiente de correlación ( $R^2$ ): superior al 75 %.

Esta evidencia se puede observar en la Figura 5, donde el mayor rango de correlación espacial se presentó para la profundidad de 0-2,5 cm ( $A_0 = 34,5$  m) con el menor grado de error, en cuanto a la selección del modelo esférico considerado ( $R^2=0,16$ ). Por otra parte, la varianza nugget se comportó con una alta dependencia espacial. El menor rango de correlación espacial se presentó a la profundidad 20-22,5 cm (Pérez et al., 2010), demostraron que el paso de la maquinaria en la cosecha de caña de azúcar incrementa la variabilidad espacial a escalas menores, o sea, la dependencia disminuye a menor

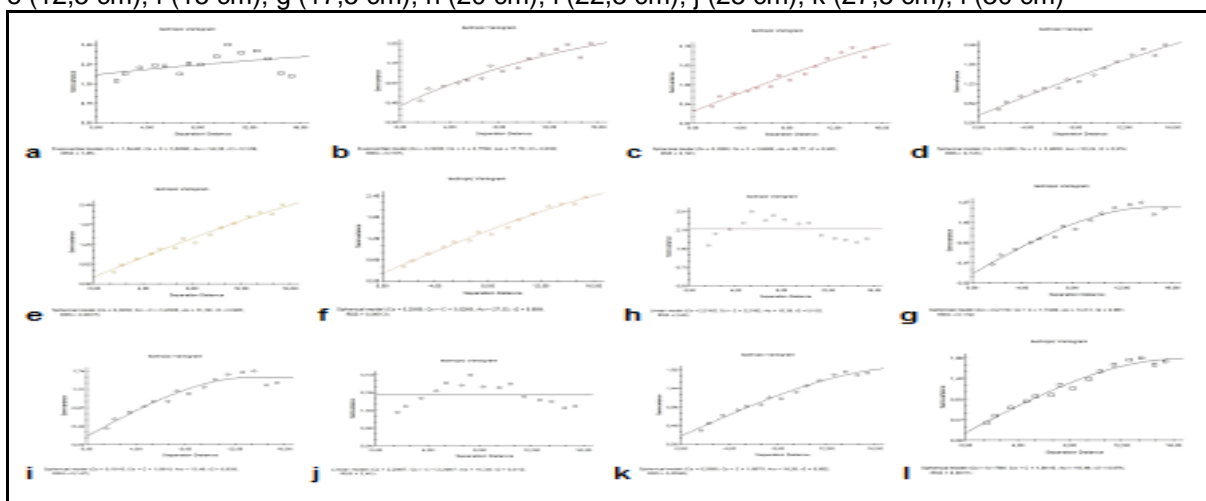
distancia. Es por ello que esta investigación se observó que la variabilidad espacial se incrementó y el rango de correlación disminuyó.

Tabla 6 Parámetros de los semivariogramas después de la cosecha:  $C_0$ , efecto nugget;  $C_t$ , meseta;  $A_0$ , Alcance; RMSE, error cuadrado medio y  $R^2$ , coeficiente de correlación

Prof. (cm)	Modelo	$C_0$	$C_t$	$A_0$	RMSE	$R^2$
0-2,5	Exponencial	1,84	3,68	34,50	1,85	0,16
2,5-5	Exponencial	0,38	2,77	17,70	0,15	0,93
5-7,5	Esférico	0,32	2,66	26,77	0,19	0,95
7,5-10	Esférico	0,24	3,49	32,24	0,14	0,97
10-12,5	Esférico	0,22	3,45	31,36	0,09	0,96
12,5-15	Esférico	0,20	3,02	27,33	0,06	0,98
15-17,5	Sin estructura	-	-	-	-	-
17,5-20	Esférico	0,21	1,74	14,51	0,11	0,96
20-22,5	Esférico	0,19	1,59	13,40	0,14	0,93
22,5-25	Sin estructura	-	-	-	-	-
25-27,5	Esférico	0,20	1,99	19,26	0,05	0,98
27,5-30	Esférico	0,17	1,84	16,46	0,08	0,97

Fuente: Elaboración propia.

Figura. 5 Semivariogramas de RP después de la cosecha: a (2,5 cm); b (5 cm); c (7,5 cm); d (10 cm); e (12,5 cm); f (15 cm); g (17,5 cm); h (20 cm); i (22,5 cm); j (25 cm); k (27,5 cm); l (30 cm)

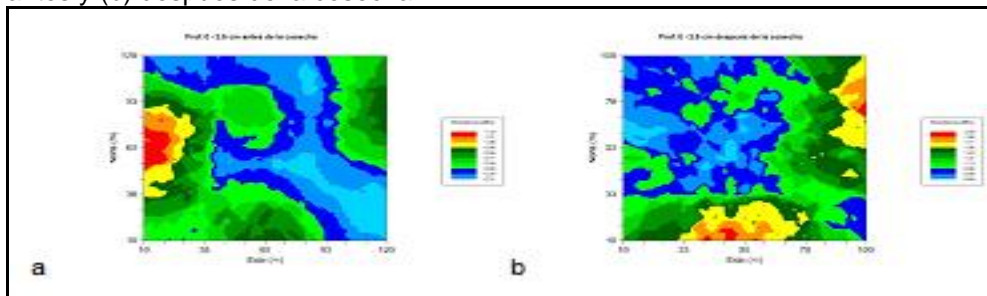


Fuente: Elaboración propia.

### 5.5. Análisis de los mapas de resistencia a la penetración para antes de la cosecha y después de la cosecha

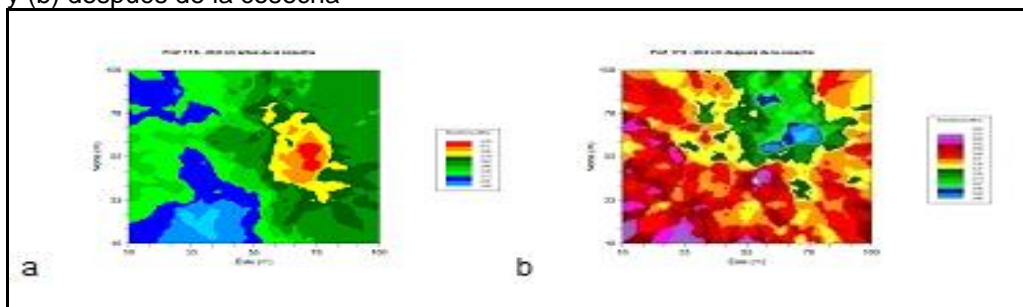
La Figura 6 presenta los mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 2,5 cm antes de la cosecha y después de la cosecha. En el primero (Figura 6a) no se detectaron valores superiores a 3 MPa, valor que constituye un impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces. Se puede observar una ligera compactación en los bordes de la parcela partiendo del color naranja hacia arriba, en la escala de colores ubicada en la parte derecha del mapa.

Figura 6. Mapas de Resistencia a la penetración para la profundidad de 2,5 cm, (a) antes y (b) después de la cosecha



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Mapas de Resistencia a la penetración para la profundidad de 20 cm, (a) antes y (b) después de la cosecha



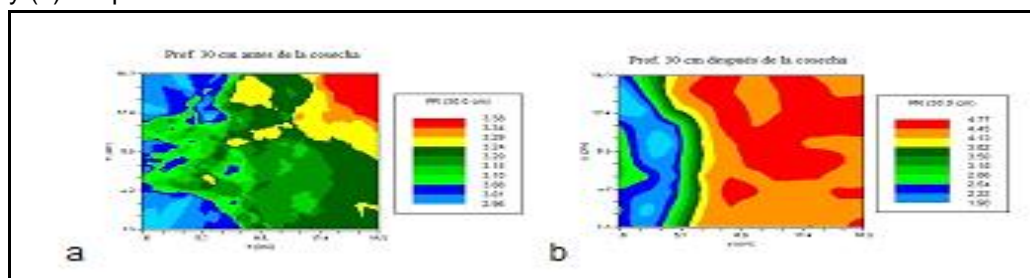
Fuente: Elaboración propia.

En el segundo (Figura 6b), se incrementa la distribución de los colores que representan valores hasta los 2 MPa. Se puede observar una ligera compactación en los bordes y otras partes del campo, después de la cosecha, partiendo del color verde oscuro hacia arriba en la escala de colores ubicada en la parte derecha del mapa. En particular, el

borde derecho del campo colinda con la vía que usualmente se utiliza para el movimiento durante la zafra azucarera.

En la Figura 7 se presentan resultados interesantes para la profundidad de 20 cm, pues antes de la cosecha (Figura 7a) se pueden apreciar zonas muy bien definidas dentro de las cuales la resistencia a la penetración toma valores determinados. En particular, las zonas de más compactación se han desplazado hacia la parte izquierda del campo, lo que puede deberse a la influencia de las labores previas de cultivo de la caña de azúcar. Después de la cosecha (Figura 7b), también se pueden apreciar valores superiores a 3 MPa en todo el campo (color azul claro hacia arriba). En todo caso, el denominador común en ambas profundidades es la presencia de áreas de alta resistencia a la penetración en los bordes del campo.

Figura 8 Mapas de Resistencia a la penetración para la profundidad de 30 cm, (a) antes y (b) después de la cosecha



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se muestran los mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 30 cm, el campo de estudio antes de la cosecha presenta una fuerte compactación en su totalidad con valores superiores a 3 MPa de resistencia a la penetración (Figura 8a). Esto puede estar asociado con el efecto acumulativo que producen las capas superiores del suelo. Es justo señalar que aparte de la influencia de la maquinaria y su paso durante la cosecha, así como el uso de los bordes de los campos para las operaciones, otros factores pueden contribuir a la elevación de la compactación del suelo. Por ejemplo, si el campo no tiene un drenaje adecuado, hay una tendencia hacia la formación de costras duras durante los períodos secos en aquellos sitios que se encharcan durante los períodos lluviosos. En cuanto a los bordes, si estos están desnudos se forman depresiones durante la escorrentía tras los eventos lluviosos, también son propensos a

que se formen costras duras superficiales. Para evitar esto, muchos autores han sugerido la plantación de césped en los bordes de los campos agrícolas establecidos sobre suelos susceptibles a la compactación (González et al., 2024; Solano et al., 2023).

En el segundo (Figura 8b), también se muestran una fuerte compactación en toda su totalidad del campo (color azul claro hacia arriba) con valores superiores a 3 MPa de resistencia a la penetración. Esto puede estar asociado con el efecto acumulativo que producen las capas superiores del suelo valor que constituye un impedimento mecánico para el crecimiento de las raíces y que debe reflejarse en el rendimiento del cultivo debido a un incremento del número de pases de las máquinas, lo que provoca el aumento de la compactación (Merani et al., 2024; Saavedra & Chaparro, 2022; Zhang et al., 2024).

## 6. Conclusiones

1. El grado de compactación aumentó después del tráfico de la maquinaria agrícola.
2. Se observó que en general no existió una estructura espacial bien definida, excepto en los primeros 10 cm de profundidad, antes del tránsito de la maquinaria.
3. La maquinaria provocó una estructura espacial bien definida a la escala de muestreo utilizada. Además de provocar una redistribución de las zonas de compactación en el campo.

## 7. Referencia bibliográfica

- de Andrade Bonetti, J., Nunes, M. R., Fink, J. R., Tuzzin de Moraes, M., Tormena, C. A., & de Oliveira, S. M. (2023). Effect of soil compaction and cover crop management on soil physical quality, biomass production and corn and soybean yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(15), 3502-3513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2247995>
- Delmond, J. G., Junnyor, W. d. S. G., de Brito, M. F., Rossoni, D. F., Araujo-Junior, C. F., da Costa Severiano, E., & Severiano, E. (2024). Which operation in mechanized sugarcane harvesting is most responsible for soil compaction? *Geoderma*, 448, 116979. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116979>



- González, O., López, E., Betancourt, Y., Cevallos, R. X., & Herrera, M. (2024). Predicción de la compactación provocada por el tránsito en la cosecha de caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 33(3). <https://cu-id.com/2177/v33n3e04>
- Hernández, A., Pérez, J. M., Bosch, D., & Speck, C. (2019). La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015. *Cultivos Tropicales*, 40(1). <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v40n1/1819-4087-ctr-40-01-e15.pdf>
- Merani, V. H., Mur, M., Larrieu, L., Ferro, D., Guilino, F., Vazquez, J. M., . . . Donadelli, M. C. (2024). Compactación de suelos post-cosecha mecanizada de un monte de eucaliptus en el partido de San Cayetano, Buenos Aires, Argentina. *Revista do Instituto Florestal*, 36, 1-13. <https://doi.org/http://doi.org/10.24278/rif.2024.36e926>
- Pérez, L. D., Millán, H., & González-Posada, M. (2010). Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A prefractal approach. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 77-86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2010.06.011>
- Saavedra-Rincón, S., & Chaparro-Anaya, Ó. (2022). Desarrollo de una aplicación en Python para mapeo de variabilidad espacial en la agricultura digital. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 26(1), 7-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.01>
- Saavedra, S., & Chaparro, Ó. (2022). Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum* spp. y su relación con propiedades estructurales del suelo. *AIA avances en investigación agropecuaria*, 26(1), 155-176. <https://doi.org/https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.23>
- Solano, A. H., Reyes, M. H., Lara, R. A. V., Garrido, C. J. R., & Morán, A. C. (2023). Cosecha de la caña de azúcar y su impacto social en Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 11(1), 13-20. <https://doi.org/doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i1.456>
- Suárez, H. J., Benítez, O. S., Cabrera, L. A., Figuero, S. C., Isaacc, F. C., & Isbert, J. A. D. (2024). Evaluación de diferentes métodos de propagación y plantación en semilla categorizada de caña de azúcar. *Cuba & Caña*, 25(1). <https://www.cuba-cane.inica.azcuba.cu/index.php/cyc/article/view/32/96>

- Villazón Gómez, J. A., Martín Gutiérrez, G., Cobo Vidal, Y., Núñez Tablada, R. C., & García Reyes, R. A. (2022). Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un haplustert crómico bajo pasto natural. *Idesia (Arica)*, 40(1), 7-14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100007>
- Villazón, J. A., G., M. G., & Cobo, Y. (2024). Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un vertisol con caña de azúcar bajo diferentes prácticas de manejo. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 40(2), 376-386. <https://doi.org/https://doi.org/10.29393/CHJAAS40-32VMJY30032>
- Wani, O. A., Sharma, V., Kumar, S. S., Malik, A. R., Pandey, A., Devi, K., . . . Valente, D. (2024). Geostatistical modelling of soil properties towards long-term ecological sustainability of agroecosystems. *Ecological Indicators*, 166, 112540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112540>
- Zhang, B., Jia, Y., Fan, H., Guo, C., Fu, J., Li, S., . . . Ma, R. (2024). Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation & Development*, 35(10), 3256-3273.