

**Variabilidad espacial de la compactación del suelo (Original)****Spatial variability of soil compaction (Original)**

Luis Delmis Pérez Soto. Ingeniero Agrícola. Doctor en Ciencias Agropecuarias. Profesor Titular.


Universidad de Granma. Bayamo. Granma. Cuba. [lperezs@udg.co.cu](mailto:lperezs@udg.co.cu) 

Yosvel Enrique Olivet Rodríguez. Ingeniero Agrícola. Doctor en Ciencias Técnicas

Agropecuarias. Profesor Titular. Universidad de Granma. Bayamo. Granma. Cuba.

[yolivetr@udg.co.cu](mailto:yolivetr@udg.co.cu) 

Mailín Capote Fajardo. Estudiante de 3er año de la carrera de Ingeniería Agrícola. Universidad

de Granma. Bayamo. Granma. Cuba. [mcapotef@estudiantes.udg.co.cu](mailto:mcapotef@estudiantes.udg.co.cu) 

Recibido: 21-07-2023/Aceptado: 13-10-2023

**Resumen**

La investigación se realizó en la Cooperativa de Producción Agropecuaria “Carlos Manuel de Céspedes” de la Unidad Empresarial de Base Atención a Productores Cañeros, perteneciente a la Empresa Azucarera “Arquímedes Colina Antúnez” del municipio Bayamo, provincia Granma, con la finalidad 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. Se utilizaron dos diseños sistemáticos: en cuadrículas y transectos con diferentes distancias de muestreo, en los cuales se midieron la resistencia a la penetración antes y después de la cosecha de la caña de azúcar. Se tuvo como resultado que el grado de compactación aumentó con el tráfico de la maquinaria agrícola, la distribución lognormal y la variabilidad espacial fue heterogénea en los primeros 10 cm de profundidad. Para las restantes profundidades no se encontró una estructura espacial definida antes del tránsito de la maquinaria. Con el paso

de la maquinaria se evidencia una estructura espacial bien definida y una redistribución de las zonas de compactación en el campo.

**Palabras clave:** compactación del suelo; maquinaria; geoestadística; mapeo

### **Abstract**

The research was carried out in the Agricultural Production Cooperative "Carlos Manuel de Céspedes" of the Basic Business Unit Atención a Productores Cañeros belonging to the Sugar Company "Arquímedes Colina Antúnez" of Bayamo municipality, Granma province, with the purpose of determining the spatial variability of soil compaction caused by the transit of new sugar cane harvesting technologies, by means of the geostatistical methodology. Two systematic designs were used: grids and transects with different sampling distances, in which the resistance to penetration was measured before and after the sugar cane harvest. As a result, the degree of compaction increased with the traffic of agricultural machinery, the lognormal distribution and spatial variability was heterogeneous in the first 10 cm of depth. For the remaining depths, no defined spatial structure was found before machinery traffic. With the passage of the machinery, a well-defined spatial structure and a redistribution of the compaction zones in the field is evident.

**Keywords:** soil compaction; machinery; geostatistic; map

### **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 (Betancourt et al., 2008). Este fenómeno causa cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando la resistencia a la penetración y la densidad aparente, 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 (Martínez et al., 2018).

Álvarez et al. (2009) e Imvinkelried et al. (2019) consideran que la compactación limita el rendimiento potencial de los cultivos, pudiendo disminuirlo entre un 15% y un 25%. En Cuba, García et al. (2010) y Martínez et al. (2021), refieren un gran porcentaje de las mermas en los rendimientos de las socas a la compactación que se producía en los campos de caña. En este sentido, Morejón (2016) señala que la mecanización del corte de la caña puede compactar el 20% del área total del campo, ocasionando pérdidas de hasta tres toneladas de azúcar por hectáreas.

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 en que la heterogeneidad del suelo aumenta, disminuye la precisión de las inferencias que puedan hacerse en relación con sus propiedades, comportamiento y pronósticos respecto al 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. Esta está influenciada fuertemente por la variabilidad de los suelos tanto dentro de las muestras tomadas como entre la ubicación de los puntos de muestreo (Ovalles & Núñez, 1993; González, 2001, citados por Pérez, 2012, p.3).

El reconocimiento de la importancia de la variabilidad espacial sobre el uso de la tierra ha conducido al estudio de esta, desde una escala global hasta el análisis de cambios en la composición física y, en particular, en la impedancia mecánica (Ferrerías et al., 2007; Pérez, 2012). Para ello, el uso de la geoestadística puede ser el método más efectivo para el estudio de esa variabilidad (Webster & Oliver, 1992).

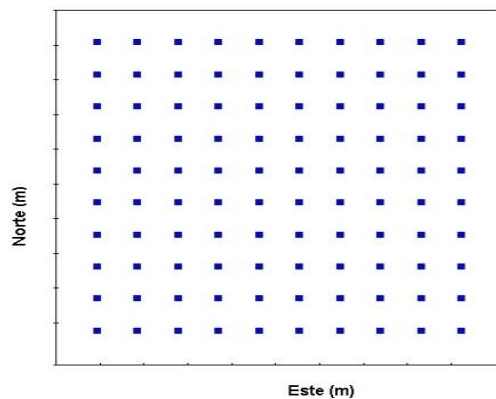
En la provincia Granma existen dificultades con la utilización de los métodos no lineales para el estudio de la compactación del suelo, los cuales sirven a los productores e investigadores a la toma de decisiones. Además, con la introducción de las nuevas tecnologías no se puede afirmar el efecto que estas producen sea igual ya que todas no presentan las mismas características. Se plantea entonces como objetivo del artículo determinar la variabilidad 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.

### **Materiales y métodos**

La investigación se realizó en la Cooperativa de Producción Agropecuaria (CPA) “Carlos Manuel de Céspedes” de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Atención a Productores Cañeros, perteneciente a la Empresa Azucarera “Arquímedes Colina Antúnez” del municipio Bayamo, provincia Granma, Cuba, sobre un *Vertisol* (Hernández et al., 2019) de consistencia media, con un rango de humedad para el tempero corto, cantidad de residuos vegetales medio y sin obstáculos, con topografía relativamente llana, una humedad gravimétrica media de 15,29% antes de la cosecha y de 14,90% después de la cosecha, para el estudio de la variabilidad espacial de compactación del suelo a través de muestreos de Penetrometría durante la cosecha de la caña de azúcar, aplicando los métodos clásico de la estadística y la metodología geoestadística. La variedad de caña de azúcar fue C86-456.

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. 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 (Figura 1). 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 (Webster & Oliver, 1992).

**Figura 1. Distribución de los puntos de muestreo**



**Fuente: Elaboración Propia.**

La cosecha del cultivo de la caña de azúcar se realizó con la cosechadora Case IH A-8800, los medios de transporte fueron el SINOTRUK con remolques, tractor YTO-1604 y remolques auto-vasculantes.

La resistencia a la penetración del suelo se determinó con un penetrómetro electrónico TJSD-750 (Figura 2), con una resolución de la profundidad de 0-450 mm, de medición de 0-100 kg, rango de medición en profundidad 0,05 cm, rango de sensibilidad del cono de 0 a 7 MPa y cono reemplazable de 1,262 cm de diámetro, con un campo de visión de 30° a partir del eje central.

Figura 2. Penetrómetro electrónico TJS-D-750



Fuente: Elaboración Propia.

### Análisis y discusión de los resultados

En la tabla 1 se 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 medida 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 (Domsch et al., 2006).

**Tabla 1. Estadística descriptiva general de la resistencia a la penetración antes de la cosecha**

Prof. (cm)	$\bar{RP}$ (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

Leyenda: (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

Fuente: Elaboración Propia.

Estos resultados superan los valores encontrados por Da Silva et al. (1994), autores que han discutido 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, que están entre 3,30 y 4,60 MPa. Resultados similares fueron encontrados por Pérez et al. (2010), quienes 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 de 2,5 y 5 cm, en las que los valores son del 68 % y 23 %, respectivamente, clasificándose como altamente heterogéneas. Este coeficiente disminuye a medida que aumenta la profundidad, por lo que la variabilidad ha disminuido en la 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), quienes observaron una variabilidad de la resistencia a la penetración superior a la vista en esta investigación.

#### *Estadística descriptiva de la resistencia a la penetración después de la cosecha*

En la tabla 2 se 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 los valores obtenidos antes de la cosecha (Figura 3), por lo que el tránsito aumentó la compactación del suelo. El valor mínimo se localiza a los 2,5 cm de profundidad con valor de 1,01 MPa, y aumenta 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 las de 2,5 y 25 cm, en las que los valores son del 30%, por lo que se puede inferir que la resistencia a la penetración presenta un comportamiento muy heterogéneo (Díaz et al., 2020).

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 (Pérez, 2012). 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.

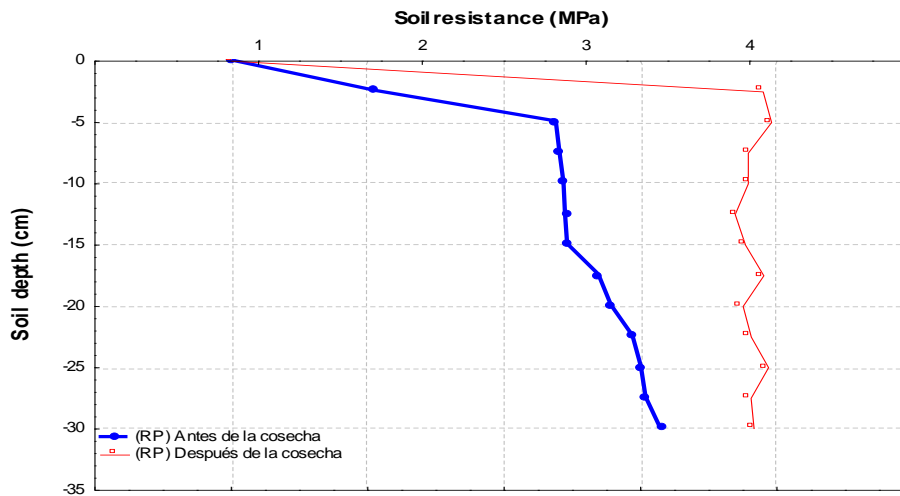
**Tabla 2. Estadística descriptiva general de la resistencia a la penetración después de la cosecha**

Prof. (cm)	$\overline{RP}$ (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

**Leyenda:** (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  
**Fuente:** elaboración propia.



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



Fuente: Elaboración Propia.

#### *Análisis de los parámetros de los semivariogramas antes de la cosecha*

En la tabla 3 se 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, en que existió dependencia lineal entre las observaciones y la distancia de muestreo, demostrada por los parámetros del semivariograma.

**Tabla 3. Parámetros de los semivariogramas antes de la cosecha**

Prof. (cm)	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>t</sub>	A <sub>0</sub>	RMSE	R <sup>2</sup>
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

Leyenda: C<sub>0</sub>, efecto nugget; C<sub>t</sub>, meseta; A<sub>0</sub>, Alcance; RMSE, error cuadrado medio y R<sup>2</sup>, coeficiente de correlación.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4 se muestra los resultados de los parámetros de los semivariogramas después de la cosecha de la caña de azúcar. En el caso particular de la varianza nugget, esta fue inferior después de la cosecha comparada con lo que ocurrió antes de esta. En general, después del paso de la maquinaria se conformó una mejor estructura espacial, demostrada por el alto coeficiente de correlación ( $R^2$ ): superior al 75%.

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 exponencial considerado ( $R^2=0,16$ ). Por otra parte, la varianza nugget se comportó con una alta dependencia espacial comparada con lo encontrado por Cambardella et al. (1994). 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 en esta investigación se observó que la variabilidad espacial se incrementó y el rango de correlación disminuyó.

**Tabla 4. Parámetros de los semivariogramas después de la cosecha**

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

**Leyenda:**  $C_0$ , efecto nugget;  $C_t$ , meseta;  $A_0$ , Alcance; RMSE, error cuadrado medio y  $R^2$ , coeficiente de correlación

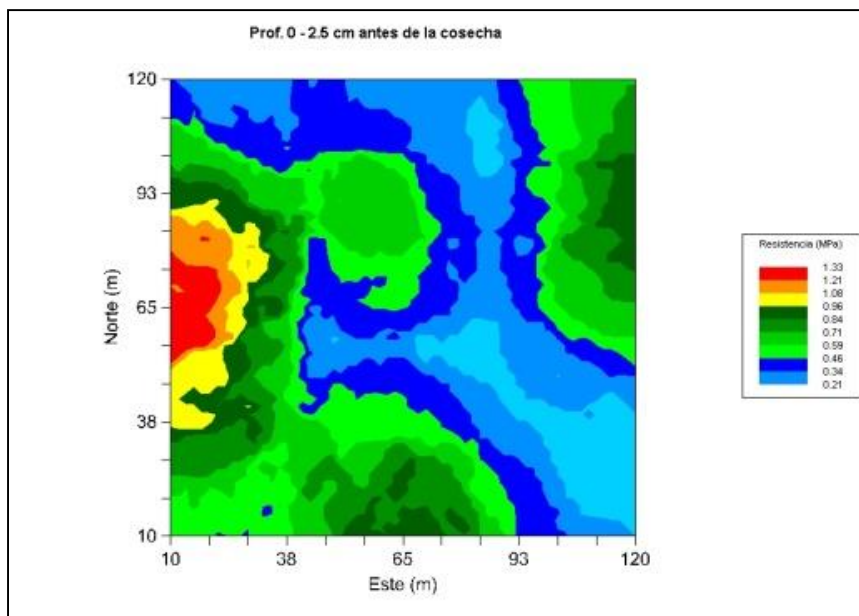
**Fuente:** Elaboración Propia.

*Análisis de los mapas de resistencia a la penetración para antes de la cosecha y después de la cosecha*

En la figura 4 se presentan los mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 2,5 cm antes de la cosecha y después de ella. En la primera figura (4a) no se detectaron valores superiores a 3 MPa, lo 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.

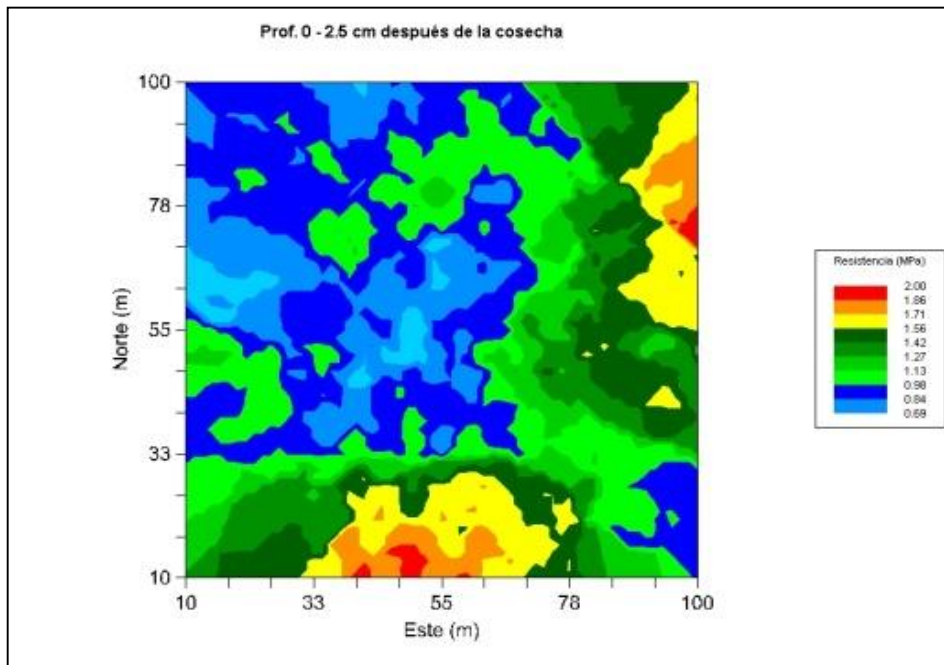
En la segunda figura (4b) se incrementa la distribución de los colores que representan valores hasta los 2 MPa. Se puede observar una ligera compactación en los bordes y otras partes del campo, después de la cosecha, partiendo del color verde oscuro hacia arriba en la escala de colores ubicada en la 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.

**Figura 4. Mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 2,5 cm: a) antes y b) después de la cosecha**  
a) antes de la cosecha



Fuente: elaboración propia.

## b) después de la cosecha

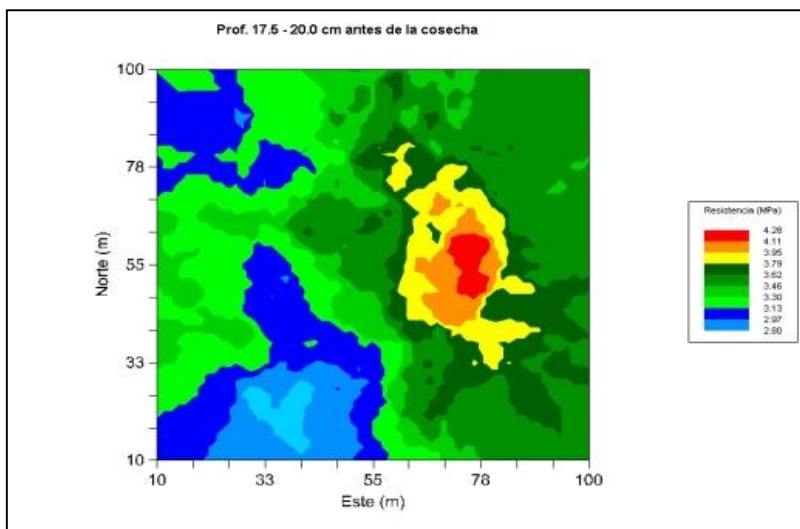


Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 5 se presentan resultados interesantes para la profundidad de 20 cm, pues antes de la cosecha (figura 5a) 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 5b), 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.

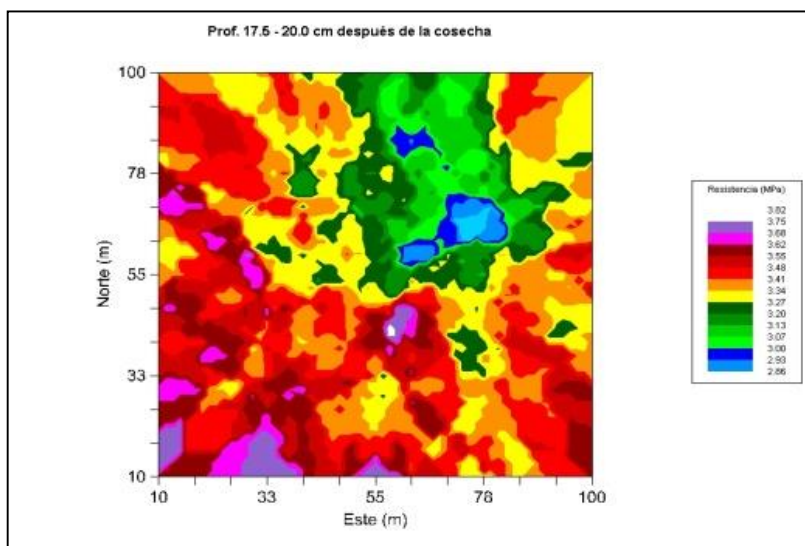
Figura 5. Mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 20 cm: a) antes y b) después de la cosecha.

a) antes de la cosecha



Fuente: Elaboración Propia.

b) después de la cosecha



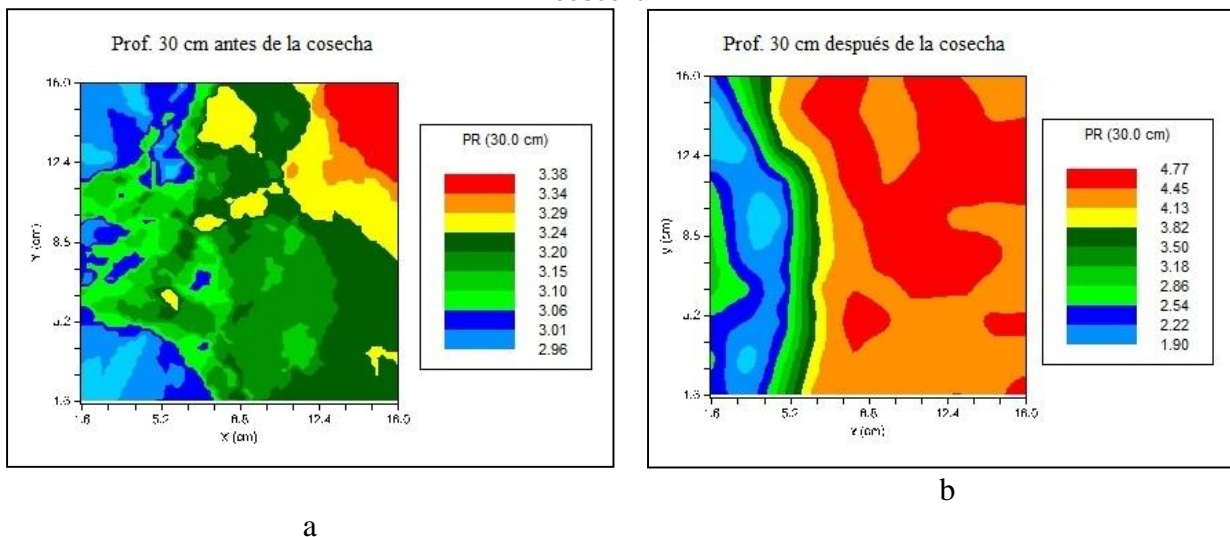
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 6 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 6a). 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 (Pérez, 2012, p.67).

Para evitar esto, algunos autores han sugerido la plantación de césped en los bordes de los campos agrícolas establecidos sobre suelos susceptibles a la compactación (Kılıç et al., 2004).

**Figura 6. Mapas de resistencia a la penetración para la profundidad de 30 cm: a) antes y b) después de la cosecha**



**Fuente: Elaboración Propia.**

En el segundo, (figura 6b), también se muestran una fuerte compactación en toda la 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, en correspondencia con lo señalado por Alakukku et al. (2003) y González et al. (2009).

### **Conclusiones**

1. El grado de compactación aumentó después del tráfico de la maquinaria agrícola con una distribución lognormal y una variabilidad heterogénea moderada en los primeros 10 cm de profundidad.

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 y una redistribución de las zonas de compactación en el campo.

### **Referencias bibliográficas**

- Alakukku, L., Weiskopf, P., Chamen, W. C. T., Tijink, F. G. J., van der Linden, J. P., Pires, Sommer, C. & Spoor, G. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 145-160. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7)
- Álvarez, C. R., Torres, M., Chamorro, E. R., D´Ambrosio, D. & Taboada, M. A. (2009). Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del suelo*, 27(2), 159-169. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672009000200002](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672009000200002)
- Betancourt, Y., García, I., López, D., Cabrera, A. & Rodríguez, M. (2008). Efectos de la tecnología de preparación de suelos pesados sobre la brotación de malezas en caña de azúcar. *Revista*

- Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(2), 78-81.  
<https://www.redalyc.org/pdf/932/93217216.pdf>
- Cambardella, C., Moorman, T., Novak, J., Parkin, T., Karlen, D., Turco, R. & Konopka, A. (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501-1511.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Da Silva, A. P., Kay, B. D. & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- Díaz, L. A., Manrique, Á. & Garzón, L. X. (2020). Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada del depósito lacustre A, ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, (119), 47-55. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2518>
- Domsch, H., Ehlert, D., Giebel, A., Witzke, K. & Boess, J. (2006). Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, 7, 309-326. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-006-9009-6>
- Ferreras, L., Magra, G., Besson, P., Kovalevski, E. & García, F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*, 25(2), 159-172. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v25n2/v25n2a07.pdf>
- García, I., Sánchez, M., Vidal, L., Betancourt, Y., & Rosa, J. (2010). Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 51-56.  
<http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v19n2/rcta09210.pdf>



- González, O., Iglesias, C. E. & Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63.  
<https://www.redalyc.org/pdf/932/93215937011.pdf>
- Hernández, A., Pérez, J. M., Bosch, D. & Castro, N. (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>
- Invinkelried, H. O., Pietrobón, M., Dellaferrera, I. & Imhoff, S. (2019). Efecto de la descompactación del suelo sobre las propiedades físicas y el rendimiento de trigo y soja. *Ciencia del suelo*, 37(1), 01-10. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672019000100001&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672019000100001&script=sci_abstract)
- Kılıç, K., Özgöz, E. & Akbaş, F. (2004). Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76 (1), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.009>
- Martínez, J. A., Rodríguez, A. & Wong, M. (2018). Influencia de dos sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de un suelo Ferralítico rojo. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1), 41-46. <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/850>
- Martínez, R., García, I., Hernández, Y., María, M., Pérez, E., Hernández, O., Concepción, E., Rossi, I. & Labrada, R. (2021). Efectos de tecnologías de descompactación del suelo sobre el rendimiento agrícola de caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(3), 45-50.  
<https://www.redalyc.org/journal/5862/586267422007/586267422007.pdf>
- Morejón, Y. (2016). Influencia de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar en la compactación del suelo. *Ingeniería Agrícola*, 6(1), 33-38.  
<https://ojs.edicionescervantes.com/index.php/IAgric/article/view/727>

- Pérez, L. D. (2012). *Influencia de la maquinaria agrícola sobre la variabilidad espacial de la compactación del suelo. Aplicación de la metodología geoestadística-fractal*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid][https://oa.upm.es/22468/1/LUIS\\_DELMIS\\_PEREZ\\_SOTO.pdf](https://oa.upm.es/22468/1/LUIS_DELMIS_PEREZ_SOTO.pdf)
- 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>
- Webster, R. & Oliver, M. A. (1992). Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *Journal of Soil Science*, 43(1), 177-192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00128.x>