

# Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum spp.* y su relación con propiedades estructurales del suelo

## Induced Compaction During Mechanical Harvesting of *Saccharum spp.* and its Relationship with Structural Soil Properties

Sebastian Saavedra-Rincón\* [orcid.org/0000-0001-6911-2818](https://orcid.org/0000-0001-6911-2818)

Óscar Chaparro-Anaya [orcid.org/0000-0001-5834-0786](https://orcid.org/0000-0001-5834-0786)

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

\*Autor de correspondencia: [ssaavedrar@unal.edu.co](mailto:ssaavedrar@unal.edu.co)

### Resumen

**Objetivo.** Caracterizar la compactación inducida durante la cosecha *Saccharum spp.* con vagones autovoltteo, en términos de resistencia mecánica a la penetración y densidad aparente en húmedo considerando su variabilidad espacial. **Materiales y métodos.** En dos lotes de cultivo de caña de azúcar, localizados en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, se realizó el seguimiento a los cambios en las variables físicas del suelo ocasionados por diferentes intensidades de tráfico de maquinaria durante la cosecha mecanizada; las variables de interés se sometieron a análisis estadísticos y geoestadísticos. **Resultados.** La densidad aparente en húmedo inicial influyó en la compactación de los suelos sujetos de estudio, en tanto que, cuando su magnitud fue mayor ( $1.67 \text{ Mg/m}^3$ ), la susceptibilidad a la compactación fue menor, encontrando una resistencia mecánica a la penetración promedio máxima de 1.83 MPa; frente a lo ocurrido, cuando su magnitud fue menor ( $1.56 \text{ Mg/m}^3$ ) la compactación fue mayor, encontrando una resistencia mecánica a la penetración promedio máxima de 2.46 MPa. **Conclusión.** Intensidades de tráfico iguales o

### Abstract

**Objective.** Characterize the compaction induced during the harvest *Saccharum spp.* with self-turning wagons, in terms of mechanical resistance to penetration and wet bulk density considering their spatial variability. **Material and methods.** In two sugarcane cultivation lots, located in the department of Valle del Cauca, Colombia, changes in the physical variables of the soil caused by different intensities of machinery traffic during the mechanized harvest were monitored; the variables of interest were subjected to statistical and geostatistical analysis. **Results.** The initial wet bulk density influenced the compaction of the soils subject to study, while, when its magnitude was greater ( $1.67 \text{ Mg/m}^3$ ), the susceptibility to compaction was lower, finding a mechanical resistance to maximum average penetration of 1.83 MPa; compared to what happened when its magnitude was lower ( $1.56 \text{ Mg/m}^3$ ), compaction was greater, finding a maximum mechanical resistance to penetration of 2.46 MPa. **Conclusion.** Traffic intensities equal to or greater than  $612.12 \text{ Mg.km/ha}$  favored compaction at surface levels ( $<30 \text{ cm}$  deep), bringing the

superiores a los 612.12 Mg.km/ha favorecieron la compactación en los niveles superficiales (<30 cm de profundidad), llevando los valores de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración a valores críticos. La propagación horizontal de la compactación aumentó (18.77 m) con menores valores de densidad aparente en húmedo (1.56 Mg/m<sup>3</sup>) y se revirtió en el caso contrario (4.55 m con 1.67 Mg/m<sup>3</sup>). Se aportó un modelo matemático que explicó el 50% de la variabilidad del fenómeno de compactación inducida con 95% de confianza.

### Palabras clave

Densidad aparente, penetrabilidad, caña de azúcar, tráfico.

values of soil density and mechanical resistance to penetration to critical values. The horizontal propagation of compaction increased (18.77 m) with lower wet bulk density values (1.56 Mg/m<sup>3</sup>) and reversed in the opposite case (4.55 m with 1.67 Mg/m<sup>3</sup>). A mathematical model was provided that explained 50% of the variability of the induced compaction phenomenon with 95% confidence.

### Keywords

Bulk density, penetrability, sugar cane, traffic.

## Introducción

El fenómeno de la compactación en los suelos, ocasiona una reducción importante de la productividad en los sistemas agrícolas, especialmente aquellos donde el tráfico agrícola transfiere al suelo una alta carga mecánica, causando aumento en la resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente (en húmedo y seco), situación que a su vez disminuye la porosidad, la conductividad hidráulica y la disponibilidad de nutrientes; se afecta la calidad de los suelos y se reduce el rendimiento de los cultivos a través del crecimiento atrofiado de las plantas sobre las superficie y un crecimiento reducido de sus raíces (Shah *et al.*, 2017; Antille *et al.*, 2019).

En Colombia la producción de *Saccharum* spp. (caña de azúcar), se realiza de manera intensiva en el valle geográfico del río Cauca, se emplea para las operaciones de cosecha mecánica una flota de maquinaria compuesta generalmente por una cosechadora, dos tractores y vagones de autovolteo para la carga y transporte del material recolectado, que transitan sobre el suelo durante la ejecución de la operación.

Las cosechadoras mecánicas suelen emplear motores con potencias máximas de 262.5 kW (352 HP) a 2 100/min y una velocidad de avance cercana a los 9 km/h, su peso sin carga esta alrededor de los 184.42 kN (que corresponde a una masa de 18.50 Mg); los tractores empleados para el arrastre de los vagones autovolteo tienen potencias cercanas a los 136 kW (182 HP) y un peso aproximado de 127.49 kN (una masa de 13 Mg); por su parte, los vagones autovolteo para el cargue y transporte del material tienen un peso sin carga aproximado de 68.64 kN (equivalente a una masa de 7 Mg) y una capacidad de carga de 107.87 kN (equivalente a una masa de 11 Mg).

La presión sobre el suelo ocasionado por la tracción de la maquinaria sobre, dentro y cerca de la superficie de contacto de sus sistema de rodamiento en el suelo, se distribuye

de forma parabólica y son proporcionales a su peso, con variaciones que dependen del diámetro y ancho de los neumáticos, la configuración del sistema de rodado del vehículo (llantas únicas o duales), superficie de contacto del área rectangular de la oruga (cosechadoras), la construcción y banda de rodadura, la velocidad de avance del vehículo y el número de veces que transiten sobre una misma superficie de suelo (Koolen y Kuipers, 1983; Keller *et al.*, 2019).

La intensidad de tráfico (IT) en las operaciones de mecanización, es un parámetro que se asocia a el peso de la maquinaria e implementos agrícolas (vinculado con la presión que se trasmite al suelo) y la permanencia sobre o cerca del suelo y se usa para caracterizar la distribución del tránsito de maquinaria e implementos sobre el suelo, tránsito que afecta las condiciones físicas estructurales de los mismos.

Rodríguez y Valencia (2012) en un experimento en el valle del río Cauca, Colombia, con diferentes sistemas de cosecha de caña de azúcar en términos de vagones de carga: pesados de alta capacidad (11 Mg e IT de 317 Mg.km/ha) y livianos de menor capacidad (6 Mg e IT de 241 Mg.km/ha), encontraron que se causó menor compactación superficial y subsuperficial cuando se hizo la cosecha con vagones livianos y de menor capacidad, encontrando en el suelo valores de resistencia mecánica a la penetración de menor magnitud comparados con el sistema de vagones pesados de alta capacidad.

Por otro lado; Panziera *et al.* (2020) determinaron el impacto del tráfico en la operación de cosecha mecánica de caña de azúcar al evaluar la variabilidad espacial de la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración de dos suelos sometidos a dos diferentes sistemas de siembra (una fila de siembra por surco y doble fila de siembra por surco) en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil; asimismo mostraron que el sistema de doble fila de siembra por surco disminuyó el tráfico sobre el suelo durante la operación de cosecha mecánica; lo que mitigó el problema de compactación, pisoteo de las plantas y promovió mejores condiciones físicas estructurales, encontrando valores medios de densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración menores (1.40 Mg/m<sup>3</sup> y 2.49 MPa, respectivamente), comparados con el sistema de una fila de siembra por surco (1.44 Mg/m<sup>3</sup> y 2.68 MPa, respectivamente).

En los procesos de mecanización agrícola, el movimiento y la permanencia de las máquinas e implementos sobre el suelo afecta sus condiciones físicas y consecuentemente la producción de los cultivos para su adecuada comprensión y búsqueda de soluciones que mitiguen el impacto negativo de la compactación, se requiere, además de los conceptos aportados por disciplinas como la terramecánica y la dinámica de suelos, el uso de nuevas técnicas (como la geoestadística) y tecnologías (como los sistemas de navegación asistida y los sistemas de información geográfica), así como el apoyo en las tecnologías emergentes innovadoras, propias de la denominada cuarta revolución industrial (agricultura digital). De esta forma se podrá disponer de estrategias de gestión para recopilar, procesar y analizar datos de los agroecosistemas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agraria, que se originan desde el esfuerzo de la multidisciplinariedad (Gill y Vanden-Berg, 1980; Hillel, 2013; Liu *et al.*, 2020).

El objetivo de la presente investigación fue caracterizar desde el punto de vista de la estadística y la geoestadística el fenómeno de compactación inducida en términos de resistencia mecánica a la penetración (RP) y densidad aparente en húmedo (DaH); generado por el sistema de cosecha mecánica de caña de azúcar.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se localizó en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, y comprendió dos porciones de suelo de aproximadamente 6 930 m<sup>2</sup> sembrados con caña de azúcar para producción orgánica (lote A) con la variedad CC 05-430 y producción convencional (lote B) con la CC 09-066. Cada lote albergó un total de 35 surcos, con una separación de 1.65 m y una longitud promedio de 120 m entre surcos. Según las coordenadas geográficas WGS84 el lote A se ubicó en 3°35'17.56"N - 76°18'52.98"O y el lote B en 3°29'55.87"N - 76°18'45.77"O.

El lote A de suelo está ubicado en un área con propiedades biofísicas relativamente homogéneas, que se puede caracterizar por cobijar suelos de textura franca fina y franca fina sobre arcillosa y con contenido de arcilla menor de 35%, moderadamente bien drenados y bien drenados, moderadamente profundos y profundos; se encuentran ubicados en un relieve plano (pendientes de 0-1%) con permeabilidad alta, moderada y baja; dentro de una región con déficit de humedad y rendimientos promedios de 130 Mg de caña de azúcar por hectárea. El lote B, por su parte está ubicado en un área con suelos de texturas finas y contenidos de arcilla entre 35 y 60%, moderadamente drenados y bien drenados, moderadamente profundos y bien profundos; con permeabilidades altas, moderadas y bajas; dentro de una región con humedades menores a 200 mm/año y rendimientos promedios de 142 Mg de caña de azúcar por hectárea (Carbonell-González *et al.*, 2011).

### Operación de cosecha

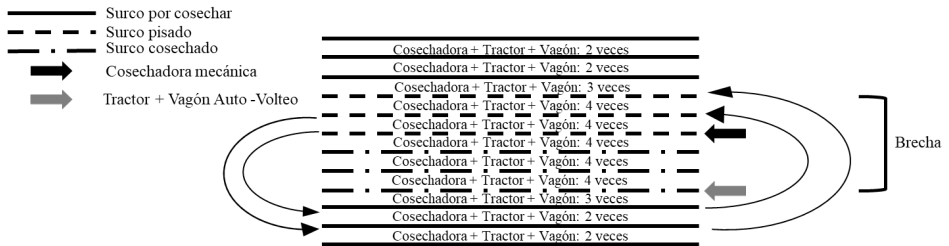
En la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar se planificó que la máquina cosechadora (presión estimada de contacto 156.9 kPa oruga-suelo) fuese acompañada por el tractor (presión de inflado llantas delanteras 103.4 kPa y traseras 158.6 kPa) y el vagón autovolteo (presión de inflado llantas delanteras y traseras 296.5 kPa) con una separación entre sí de dos surcos; y se inició con la cosecha de tres surcos sucesivos ubicados en la mitad de las superficies de los lotes, acción que dio lugar a una brecha de seis surcos (tres cosechados y tres pisados por la combinación tractor-vagón autovolteo); una vez culminada la acción de cosechar los tres surcos iniciales, la operación continuó con la cosecha de los surcos pisados con un patrón de navegación abierto que finalizó hasta que se alcanzó todo el conjunto de 35 surcos; lo anterior garantizó que la combinación tractor – vagón autovolteo siempre transitó sobre surcos cosechados, una vez que se hizo la brecha (figura 1).

La navegación de cosecha mecanizada anterior tiene como característica que sobre los seis surcos de la brecha transitan dos veces la combinación tractor-vagón autovolteo

y sobre los contiguos una sola vez, arrojando tres intensidades de tráfico (IT) diferentes sobre el suelo de las entrecalles del conjunto de surcos cosechados, teniendo en cuenta la cantidad de veces que pasa el sistema de rodado de la maquinaria utilizada.

Figura 1

Patrón de navegación abierto en cosecha mecánica



Muestreo y variables de interés

Del conjunto de treinta y cinco surcos se seleccionaron doce: seis pertenecientes a la brecha y seis más contiguos; los sujetos de estudio fueron las entrecalles contenidas entre los doce surcos (un total de once); los tratamientos correspondieron a las tres IT que se generaron durante la operación de cosecha y un testigo correspondiente a las condiciones del suelo antes de iniciar la operación de cosecha mecanizada (cuadro 1); las variables de respuesta fueron RP estimada hasta los 50 cm de profundidad y DaH estimada hasta los 15 cm de profundidad; configurando el diseño del experimento como completamente al azar.

Cuadro 1

Condiciones e intensidad de tráfico por tratamiento durante el experimento

Tratamientos	Descripción
Testigo	Condiciones iniciales antes de cosecha mecanizada
IT1	Dos pasadas de cosechadora, tractor y vagón autovolteo
IT2	Dos pasadas de cosechadora y tres pasadas de tractor y vagón autovolteo
IT3	Dos pasadas de cosechadora y cuatro pasadas de tractor y vagón autovolteo

IT = Intensidad de tráfico.

Se tuvo en cuenta la falta de una distribución normal por las características del estudio y, de acuerdo con lo expresado por Montiel-Torres y Blanco-Sepúlveda (2001), se estableció un diseño experimental completamente al azar y una selección aleatoria sistemática para los sitios de muestreo del experimento; se tomó una primera entrecalle como referencia y asignando zonas de muestreo a lo largo cada 15 m, para un total de ocho sitios de muestro por entrecalle; así pues, para las entrecalles restantes los sitios de muestreo fueron determinados a partir de la posición relativa de los sitios de la de referencia (figura 2);

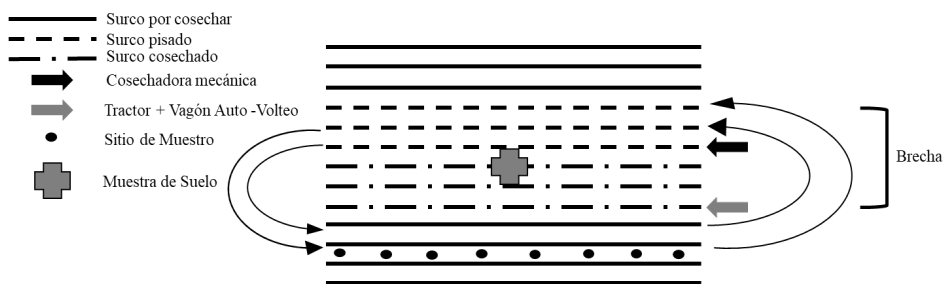
a cada sitio de muestro se le capturaron sus coordenadas proyectadas en un sistema de referencia plano: Magna Colombia-Zona Oeste, de tal forma que a los datos asociados a las variables de interés se les pudo hacer un análisis espacial.

Para propósitos de caracterización, se tomó en cada lote una muestra de suelo dentro de las fronteras espaciales de los surcos seleccionados (figura 2) antes de la operación de cosecha mecánica con vagones autovolteo y después de la operación de cosecha mecanizada, para conocer en términos generales: los contenidos de humedad, por unidad de masa de suelo (%W) en los momentos mencionados acorde al método planteado por Lucero-Vega *et al.* (2017); los límites de los estados de consistencia plástico y líquido, acorde al método planteado por Hernández-Sánchez *et al.* (2019); y su distribución de tamaño de partículas siguiendo el método de Bouyoucos.

Para la medición de RP se usó un sensor penetrómetro electrónico para mediciones *in situ* con las siguientes especificaciones técnicas: ángulo de cono de 60° y 1 cm<sup>2</sup> de superficie de cono (Davidson, 1965); para la estimación de la DaH se usó un cilindro de acero inoxidable con puntas afiladas con las siguientes dimensiones: diámetro de 13 cm, altura de 15 cm y volumen aproximado de 1991 cm<sup>3</sup>, determinadas a partir de lo expresado por de-Moraes *et al.* (2014) para obtener una mejor correlación con los valores de RP; para la determinación de la IT se usó el método planteado por Rodríguez y Valencia (2012) y se consideró la masa del vagón autovolteo como el promedio de la masa sin carga y su capacidad de carga; la captura de las coordenadas en los sitios de muestro se realizó con un dispositivo para navegación de mano con receptor de alta sensibilidad y compatibilidad con varios sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).

Figura 2

Distribución sitios de muestro y muestra de suelo



Análisis de la información

Las variables de interés se sometieron a pruebas de la estadística descriptiva para el total de los datos, discriminados por tratamiento; la prueba Shapiro-Wilk de distribución normal ( $\alpha = 0.05$ ) para el total de los datos y el análisis de varianza para determinar la significatividad estadística ( $\alpha = 0.05$ ) de las diferencias observadas entre los tratamientos. Cuando existieron diferencias significativas, se utilizó la prueba Post Hoc de diferencia honesta significativa de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) para perfilar cuál o cuáles tratamientos fueron

diferentes entre sí, para cada una de las variables de interés. Para la variable RP se complementó el análisis de varianza con un estudio Post Hoc de diferencia honesta significativa de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) por estratos de 10 cm hasta alcanzar la profundidad evaluada.

Para relacionar las variables de interés con la IT se usaron los métodos estadísticos de regresión y correlación lineales de Pearson, sobre la base de datos que evidenció de mejor forma las diferencias significativas entre los tratamientos, perteneciente a uno de los suelos seleccionados; la combinación para encontrar la ecuación lineal fue: RP, DaH *versus* IT. La potencia del modelo se comprobó a través de la desviación estándar de los valores residuales (RMSE), indicador construido con información de DaH y RP promedio de dos entrecalles que fueron sometidas a intensidades de tráfico de 212.12 Mg.km/ha y 345.45, respectivamente; de una porción de suelo cultivado con caña de azúcar en condiciones de humedad y factores biofísicos de largo plazo, generalmente estables y similares al suelo seleccionado, pero con distribución de partículas diferente (37% arcilla, 34% limo y 29% arena).

Posteriormente, los valores de DaH y los promedios de RP en la profundidad evaluada asociados a covariables espaciales de cada uno de los sitios de muestreo en cada sujeto de estudio fueron sometidos a un análisis geoestadístico para generar superficies continuas univariadas mediante el método Kriging ordinario bajo el supuesto de isotropía, cumpliendo con los requerimientos expresados por Matheron (2019) y discriminando la información en dos momentos: antes de la operación de cosecha mecanizada (datos testigo) y después de la operación de cosecha mecanizada (datos IT1, IT2 e IT3), lo que permitió conocer y caracterizar el comportamiento espacial de DaH y el promedio de la RP en la profundidad evaluada, debido a los tratamientos aplicados sobre los sujetos de estudio.

Las pruebas de la estadística descriptiva y normalidad, los análisis estadísticos para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y los métodos para relacionar la RP y la DaH con la IT se programaron con los módulos especializados del ecosistema Python (Python 3.9.5): pandas v1.2.4, SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0, statsmodels v0.12.2 y scikit-learn v1.1.1. Para los análisis geoestadísticos se usó el programa GeoStatLiteUN v2021.6.1 (Saavedra-Rincón y Chaparro-Anaya, 2022).

## Resultados

### *Análisis de la información – Lote A*

Los resultados mostraron un comportamiento ascendente de la IT en correspondencia con el incremento de la frecuencia de tránsito y carga por unidad de área asociado a la maquinaria de cosecha (cuadro 2). La cosechadora combinada aportó una IT de 106.1 Mg.km/ha, el tractor de 78.8 Mg.km/ha y el vagón autovolteo de 54.5 Mg.km/ha.

Cuadro 2  
Valores de IT por tratamiento

Tratamientos	Valor (Mg.km/ha)
Testigo	0
IT 1	478.79
IT 2	612.12
IT 3	745.45

El suelo contó con un %W de 38.4 antes de iniciar la operación de cosecha y un %W de 33.7 inmediatamente después de culminar la operación.

Cuadro 3  
Caracterización del suelo en el lote A

Partículas	Distribución (%)
Arcillas	21.6
Limo	46.0
Arena	32.4
Consistencia	W(%)
Limite plástico	25.0
Limite líquido	41.0

### DaH Lote A

La base de datos para la variable DaH estuvo conformada por 176 datos, a los cuales se les asocio número de entrecalle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: testigo 88 datos, IT1 32 datos, IT2 16 datos e IT3 40 datos. La estadística descriptiva (cuadro 4) arrojó valores de media, mediana y moda similares; y aunque no se evidenció simetría y comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

El análisis de varianza para la variable DaH (cuadro 5) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (tabla 6) que se manifestaron entre el testigo, IT1 e IT3; la usencia de diferencia estadística entre el testigo e IT2 pudo deberse a la cantidad de datos registrados de este último, aunque el valor de la media de IT2 fue mayor.

Frente a los niveles de intensidad de tráfico; IT1, IT2 e IT3 se encontró que la DaH no tuvo diferencias significativas (cuadro 6), pese a la variación en términos de IT que poseen.



**Cuadro 4**  
**Datos DaH y RP – estadística descriptiva**

DaH		RP	
Media (Mg/m <sup>3</sup> )	1.62	Media (MPa)	2.15
Mediana (Mg/m <sup>3</sup> )	1.63	Mediana (MPa)	2.12
Moda (Mg/m <sup>3</sup> )	1.32	Moda (MPa)	2.33
Desviación estándar (Mg/m <sup>3</sup> )	0.16	Desviación estándar (MPa)	0.69
Varianza de la muestra (Mg <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> )	0.03	Varianza de la muestra (MPa <sup>2</sup> )	0.47
Simetría	4.25	Simetría	0.29
Normalidad P-Valor	< 0.001	Normalidad P-Valor	0.01
Mínimo (Mg/m <sup>3</sup> )	1.32	Mínimo (MPa)	0.33
Máximo (Mg/m <sup>3</sup> )	1.79	Máximo (MPa)	4.42

P-Valor prueba de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0.05$ ).

**Cuadro 5**  
**Análisis de varianza – Datos DaH y RP**

Tratamientos	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.76	0.250	< 0.001
Residual DaH	172	3.87	0.022	
RP	3	50.93	16.98	< 0.001
Residual RP	514	192.95	0.37	

( $\alpha = 0.05$ ).

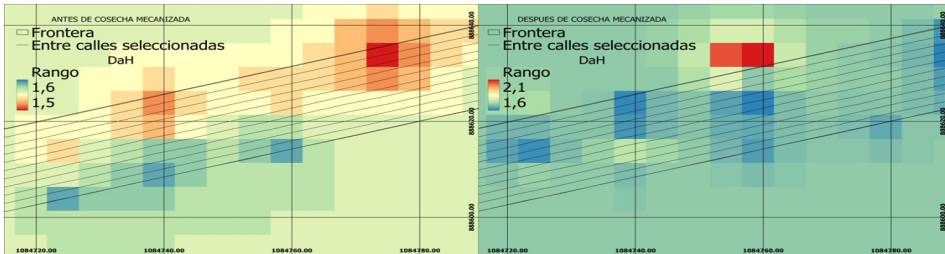
**Cuadro 6**  
**Datos DaH y RP – Descriptivos por tratamiento**

Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3
<b>DaH</b>				
Media (Mg/m <sup>3</sup> )	1.56A	1.73B	1.63AB	1.66B
Desviación estándar (Mg/m <sup>3</sup> )	0.12	0.27	0.09	0.10
Varianza de la muestra (Mg <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> )	0.01	0.07	0.01	0.01
<b>RP</b>				
Media (MPa)	1.43A	2.20B	2.46C	2.26BC
Desviación estándar (MPa)	0.42	0.66	0.53	0.64
Varianza de la muestra (MPa <sup>2</sup> )	0.18	0.44	0.28	0.41

Media con letras diferentes indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Las mejores superficies continuas de DaH correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 3), resultaron de un modelo de variograma exponencial con débil (nugget > 75% del Sill) y fuerte (nugget < 25% del Sill) dependencia espacial. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 18.77 m (antes) y 8.76 m (después), observándose mayor variación de DaH después de la cosecha mecanizada (entre 1.6 Mg/m<sup>3</sup> y 2.1 Mg/m<sup>3</sup>) frente a la DaH antes de la operación (entre 1.5 Mg/m<sup>3</sup> y 1.6 Mg/m<sup>3</sup>).

Figura 3  
Modelos Kriging de superficie continua para DaH



### RP Lote A

La base de datos para la variable RP estuvo conformada por 518 datos, a los cuales se les asoció número de entrecalle, sitio de muestreo y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: testigo 78 datos, IT1 160 datos, IT2 80 datos e IT3 200 datos. La estadística descriptiva (cuadro 4) evidenció simetría y aunque no se observó comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

El análisis de varianza para la variable RP (cuadro 5) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (cuadro 6) que se manifestaron entre el testigo, IT1, IT2 e IT3 (cuadro 7).

Cuadro 7

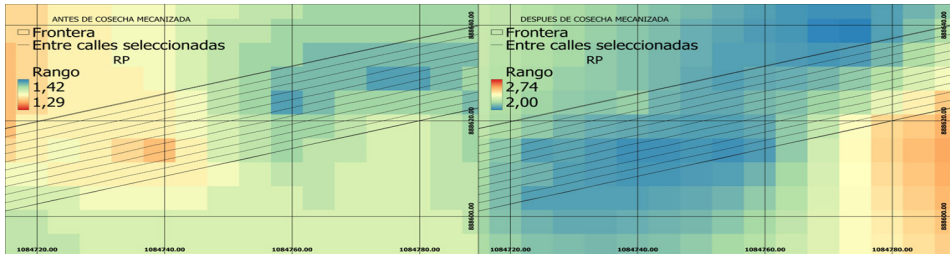
Datos RP – valores medios estratificados por tratamiento

Estadísticos (Mpa)	Testigo	IT1	IT2	IT3
Media 0 – 10 cm	0.78Aa	1.60Ba	1.93Ba	1.81Ba
Media 10 – 20 cm	1.30Ab	1.97Ba	2.45Cb	2.18Bcab
Media 20 – 30 cm	1.55Abc	2.53Bb	2.75Bb	2.45Bb
Media 30 – 40 cm	1.66Abcd	2.53Bb	2.86Bb	2.43Bb
Media 40 – 50 cm	1.80Abcd	2.40Bb	2.53Bb	2.26Bb

Media en filas con letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas y media en columnas con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Las mejores superficies continuas de RP correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 4), resultaron de un modelo de variograma esférico con fuerte (nugget < 25% del Sill) y moderada (nugget 25 - 50% del Sill) dependencia espacial, respectivamente. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 30.32 m (antes) y 18.30 m (después); observándose mayor variación de la RP después de la cosecha mecanizada (entre 2.00 MPa y 2.74 MPa) frente a la RP antes de la operación (entre 1.29 MPa y 1.42 MPa).

Figura 4  
Modelos Kriging de superficie continua RP promedio



### Análisis de la información – Lote B

Debido al patrón de navegación durante la cosecha mecanizada en el lote B, se tuvo una IT ascendente desde el testigo hasta el tratamiento IT3 (pasando por IT1 e IT2) igual a la presentada en el cuadro 2; apreciándose que a mayor IT aumenta la frecuencia de tránsito y carga por unidad de área asociado a la maquinaria de cosecha; la máquina cosechadora combinada aportó una IT de 106.1 Mg.km/ha, el tractor una IT de 78.8 Mg.km/ha y el vagón autovolteo una IT de 54.5 Mg.km/ha (cuadro 8).

Cuadro 8  
Caracterización suelo lote B

Partículas	Distribución (%)
Arcillas	48.0
Limo	26.0
Arena	26.0
Consistencia	%W
Limite plástico	16.5
Limite líquido	39.8

El suelo contó con un %W de 35.7 antes de iniciar la operación de cosecha y un %W de 33.8 inmediatamente después de culminar la operación.

## DaH Lote B

La base de datos para la variable DaH estuvo conformada por 176 datos, a los cuales se les asocio número de entrecalle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: testigo 88 datos, IT1 32 datos, IT2 16 datos e IT3 40 datos.

La estadística descriptiva (cuadro 9) arrojó valores de media, mediana y moda similares, con un comportamiento simétrico sin evidencia de normalidad; invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal.

Cuadro 9  
Datos DaH y RP - estadística descriptiva

DaH		RP	
Media (Mg/m <sup>3</sup> )	1.68	Media (MPa)	1.76
Mediana (Mg/m <sup>3</sup> )	1.70	Mediana (MPa)	1.67
Moda (Mg/m <sup>3</sup> )	1.79	Moda (MPa)	1.96
Desviación estándar (Mg/m <sup>3</sup> )	0.10	Desviación estándar (MPa)	0.85
Varianza de la muestra (Mg <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> )	0.01	Varianza de la muestra (MPa <sup>2</sup> )	0.72
Simetría	-1.14	Simetría	1.39
Normalidad P-Valor	< 0.001	Normalidad P-Valor	< 0.001
Mínimo (Mg/m <sup>3</sup> )	1.23	Mínimo (MPa)	0.29
Máximo (Mg/m <sup>3</sup> )	1.81	Máximo (MPa)	5.44

P-Valor prueba de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0.05$ ).

El análisis de varianza para la variable DaH (cuadro 10) no estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar; pese a la variación en términos de IT que poseen (cuadro 11).

Cuadro 10  
Análisis de varianza – datos DaH y RP

Tratamientos	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.026	0.009	0.491
Residual DaH	172	1.862	0.011	
RP	3	11.36	3.78	0.001
Residual RP	516	363.85	0.71	

( $\alpha = 0.05$ ).

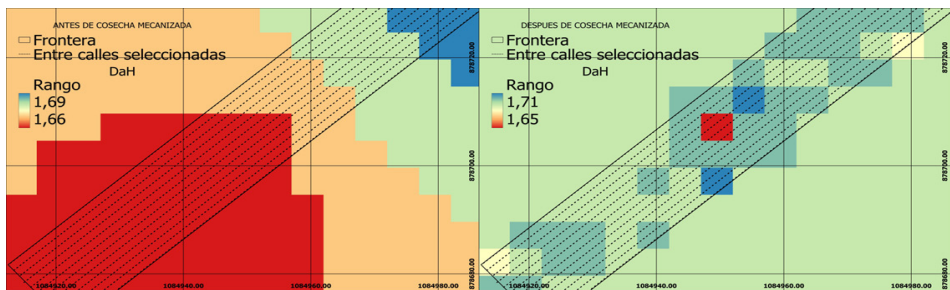
Cuadro 11  
 Datos DaH – descriptivos por tratamiento

Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3
<b>DaH</b>				
Media (Mg/m <sup>3</sup> )	1.67A	1.70A	1.70A	1.69A
Desviación estándar (Mg/m <sup>3</sup> )	0.09	0.10	0.12	0.13
Varianza de la muestra (Mg <sup>2</sup> /m <sup>6</sup> )	0.01	0.01	0.01	0.02
<b>RP</b>				
Media (MPa)	1.41A	1.83B	1.79B	1.83B
Desviación estándar (MPa)	0.66	0.88	0.74	0.91
Varianza de la muestra (MPa <sup>2</sup> )	0.43	0.77	0.54	0.83

Media con letras diferentes indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Las mejores superficies continuas de DaH correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 5), resultaron de un modelo de variograma esférico con débil (nugget > 75% del Sill) dependencia espacial. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 88.70 m (antes) y 4.16 m (después); observándose mayor variación de DaH después de la cosecha mecanizada (entre 1.65 Mg/m<sup>3</sup> y 1.71 Mg/m<sup>3</sup>) frente a la DaH antes de la operación (entre 1.66 Mg/m<sup>3</sup> y 1.69 Mg/m<sup>3</sup>).

Figura 5  
 Modelos Kriging de superficie continua para DaH



### RP Lote B

La base de datos para la variable RP estuvo conformada por 518 datos a los cuales se les asocio número de entrecalle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: testigo 78 datos, IT1 160 datos, IT2 80 datos e IT3 200 datos. La estadística descriptiva (cuadro 9) evidenció simetría y aunque no se observó comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

El análisis de varianza para la variable RP (cuadro 10) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (cuadro 11) que se manifestaron entre el testigo, IT1, IT2 e IT3. Lo anterior denota una relación manifiesta entre la IT y RP.

Cuadro 12

Datos RP – valores medios estratificados por tratamiento

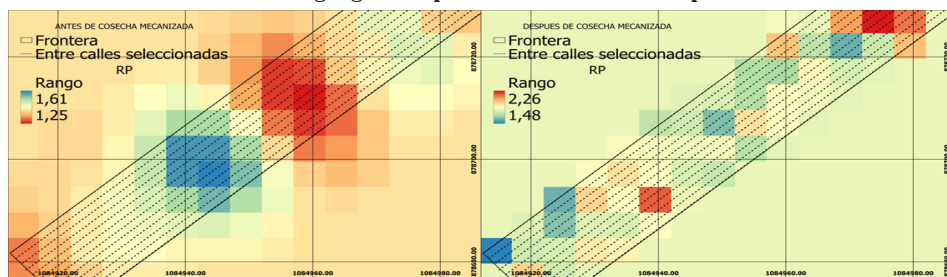
Estadísticos (Mpa)	Testigo	IT1	IT2	IT3
Media 0 – 10 cm	0.66Aa	1.06Ba	1.11Ba	1.04Ba
Media 10 – 20 cm	1.03Aa	1.47Bab	1.59Bab	1.41Bab
Media 20 – 30 cm	1.33Ab	1.84Bbc	2.02Bb	1.82Bb
Media 30 – 40 cm	1.86Abc	2.28Abcd	2.10Ab	2.38Abc
Media 40 – 50 cm	2.05Abc	2.5Abcd	2.15Ab	2.48Abc

Media en filas con letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas y media en columnas con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas, según prueba de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

Las mejores superficies continuas de RP correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 6), resultaron de un modelo de variograma esférico con moderada (nugget 25% - 50% del Sill) dependencia espacial. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 18.89 m (antes) y 4.55 m (después); observándose mayor variación de la RP después de la cosecha mecanizada (entre 1.48 MPa y 2.26 MPa) frente a la RP antes de la operación (entre 1.25 MPa y 1.61 MPa).

Figura 6

Modelos Kriging de superficie continua RP promedio



### Relación IT, DaH y RP

La base de datos que se usó para construir el modelo de regresión lineal tuvo un total de 528 datos con información de las variables de interés agrupadas por tratamiento y perteneció al lote A. El análisis de varianza (cuadro 13) indicó que el modelo tiene validez para ajustar los datos suministrados, alcanzando un coeficiente de determinación  $R^2$  de

0.5; es decir, el modelo de regresión a lo sumo explica la mitad de la variabilidad de IT a través de DaH y RP.

Cuadro 13

Análisis de varianza – modelo de regresión lineal

	Grados de libertad	Valor-P
Modelo	2	< 0.001
Residual	283	

( $\alpha = 0.05$ ).

Dentro del modelo de regresión lineal, los estadísticos sugieren (cuadro 14) que los cambios en RP y DaH están asociados con cambios en IT; para las condiciones particulares del suelo sujeto de estudio en el momento de la operación de cosecha mecanizada con vagones autovolteo y las condiciones biofísicas de largo plazo generalmente estables donde se enmarcó el lote A.

Cuadro 14

Estadísticos – modelo de regresión lineal

	Coeficiente	Desviación estándar	P-Valor	Intervalo de Confianza	
				Límite inferior	Límite superior
Intercepto	-767.9	178.0	< 0.001	-1119.4	-416.6
RP	353.4	29.8	< 0.001	294.5	412.3
DaH	262.9	111.4	0.019	43.0	482.8

P-Valor prueba de T - Student ( $\alpha = 0.05$ ).

La base de datos que se usó para probar el modelo de regresión lineal (ecuación 1) tuvo un total de 54 datos con información de las variables de interés (dentro del dominio de la función) agrupadas por intensidades de tráfico (una entrecalle sometida a 212.12 Mg.km/ha y una entrecalle sometida a 345.45 Mg.km/ha). La RMSE del modelo para la base de datos de prueba fue de 124.7 Mg.km/ha; es decir, las predicciones se alejaron en promedio 124.7 Mg.km/ha del valor real de la base de datos de prueba, lo que corresponde aproximadamente a una IT de una máquina cosechadora (peso de 184.42 kN) con características similares a los usados durante a cosecha mecanizada de caña de azúcar en el lote A y lote B. Usando los valores de RP y DaH críticos mencionados para el cultivo de caña de azúcar, en la ecuación 1 se obtiene una IT de 483.66 Mg.km/ha, magnitud similar a la obtenida con IT1; es decir, la aproximación teórica sugirió que con el transito sucesivo de una cosechadora, un tractor y un vagón autovolteo (con las características de la maquinaria usada durante el experimento) sobre una misma superficie de suelo, se logran valores de RP y DaH restrictivos para el cultivo de caña de azúcar.

$$IT = (353.4 \pm 58.9) * RP + (262.9 \pm 219.9) * DaH - (767.9 \pm 351.5);$$

$$Dom[IT] = \{RP, DaH \mid 1.41 < RP < 2.46, 1.56 < DaH < 1.73\} \quad (1)$$

IT en unidades de Mg.km/ha, RP en MPa y DaH en Mg/m<sup>3</sup>.

## Discusión

Las intensidades de tráfico (cuadro 2) fueron similares a lo reportado por Rodríguez y Valencia (2012) referidos a la intensidad de tráfico en cosecha mecanizada con vagones autovolteo.

El suelo de lote A en términos generales se pudo clasificar como franco, debido a su distribución de tamaño de partículas (cuadro 3); por su parte, el suelo del lote B se pudo clasificar como arcilloso debido a su distribución de tamaño de partículas (cuadro 8) (Hillel, 2013).

Los contenidos de humedad del suelo en los lotes A y B (cuadros 3 y 8) reflejaron que el suelo no estuvo en condiciones apropiadas de humedad para transitar con maquinaria agrícola, de acuerdo con lo explicado por Cueto *et al.* (2009).

Todas las bases de datos cumplieron con los supuestos para ser sometida a pruebas de la estadística y la geoestadística (Armstrong, 1998; Diez *et al.*, 2019).

Los análisis de varianza de DaH para los lotes A y B (cuadros 5 y 10) denotan una relación manifiesta entre la IT y DaH, estuvo en consonancia a lo reportado por Draghi *et al.* (2015) en cuanto la densidad aparente, estimada a los 10 cm de un suelo sometido a cinco pases de dos diferentes sistemas de siembra mecanizada (con labranza y siembra directa) e incremento frente a un testigo (cero pasadas), pasando de 1.17 Mg/m<sup>3</sup> a 1.25 Mg/m<sup>3</sup> y 1.28 Mg/m<sup>3</sup>, respectivamente; aunque no lograron establecer diferencias significativas entre los valores encontrados.

Se conjeturó que la DaH no es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación después de aplicar esfuerzos externos, ya que, únicamente señaló diferencias significativas cuando hubo cambios mayúsculos en los valores de DaH (testigo, IT1 e IT3), debido a que 75% del cambio en la densidad aparente es contribución del primer pase con máquina sobre el suelo y el 25% restante es contribución de los pases con máquina siguientes (Cueto *et al.*, 2009; Draghi *et al.*, 2015).

El comportamiento espacial de DaH para los lotes A y B (figuras 3 y 5) reflejó el efecto de los tratamientos y soportó que DaH no es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación, en términos estadísticos y geoestadísticos; si bien se expresan diferencias entre el testigo, IT1 e IT3, no permite percibir cambios pequeños (colores similares en la escala entre las entrecalles de la brecha y las contiguas) en la densidad del suelo por la aplicación de diferentes IT; lo anterior, con valores y comportamiento espacial similares a lo mostrado por Panziera *et al.* (2020) que no permiten evidenciar fácilmente las diferencias entre diferentes IT.

Los análisis de varianza de RP para los lotes A y B (cuadros 5 y 10) denota una relación manifiesta entre la IT y RP, y estuvo en consonancia con García-Rodríguez *et*



al. (2020) e Hidalgo *et al.* (2020) respecta a incrementos en la RP, debido a diferentes IT, e incrementos por encima de lo mostrado por un testigo.

Para el lote A, frente a IT1 e IT2, se encontró que la RP tuvo diferencias significativas con media superior en este último; IT3 no marco diferencia significativa con las demás IT; por otro lado, se percibió propensión al incremento de la RP en la medida que se incrementó la IT, resultados que guardan semejanza con lo reportado por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012), respecto a que pasadas sobre el suelo de un cultivo con maquinaria agrícola de diferentes pesos incrementaron la RP en las capas superficiales y subsuperficiales; por ejemplo, entre los 15 a 30 cm de profundidad en un suelo, encontraron que la RP con un tractor pesado fue de 2.54 MPa y con un tractor liviano fue de 2.49 MPa.

Por profundidad, los datos de RP (cuadro 7) mostraron diferencias significativas entre el testigo y todas las IT, entre IT1 e T2 entre los 10-20 cm de profundidad; y entre, los dos primeros estratos (0-20 cm de profundidad) y los tres últimos (30-50 cm de profundidad) por tratamiento; con valores y comportamientos de RP similares a los expresados por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012) debido al tránsito de tractores pesados, medianos y livianos. Acerca de RP como parámetro para el estudio de la compactación por diferentes IT resultó conveniente, porque al menos exhibió de forma clara diferencias significativas entre IT1, IT2 e IT3 y el testigo; IT1, IT2 e IT3 entre los 10-20 cm; y los estratos superficiales con los subsuperficiales.

Para el lote B, frente a IT1, IT2 e IT3 no se encontraron diferencias significativas; lo anterior pudo deberse a los valores de DaH (elevados desde un principio, sin evidenciar diferencias significativas entre tratamientos) bajo la condición de humedad particular que limitaron la compactación, se pudieron alcanzar los valores máximos de RP en los primeros momentos del tránsito de la maquinaria para operación de cosecha mecanizada; semejante a lo reportado por Quiroga *et al.* (2016), quienes encontraron el máximo valor de densidad (aproximadamente 1.40 Mg/m<sup>3</sup>) de un suelo agrícola en un rango de humedad entre 20 y 30%, y que este decrece en la medida que la proporción de las partículas de arena y limo aumentan.

Se estratificaron por profundidad los datos de RP (cuadro 12) y se mostraron diferencias significativas entre el testigo y todas las IT, y entre los dos primeros estratos (0-20 cm de profundidad) y los tres últimos (30-50 cm de profundidad) por tratamiento, con valores y comportamiento de RP similares a los expresados por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012) debido al tránsito de tractores pesados, medianos y livianos. Acerca de RP como parámetro para el estudio de la compactación por diferentes IT se sostiene su conveniencia, porque al menos exhibió de forma clara las diferencias significativas entre IT1, IT2 e IT3 y el testigo, y los estratos superficiales con los subsuperficiales.

La clasificación de la dependencia espacial de todos los modelos de superficie continua se realizó con base en lo expresado por Jaramillo (2012).

El comportamiento espacial de RP para los lotes A y B (figura 4 y 6) reflejó el efecto de los tratamientos, las diferencias significativas encontradas entre los dos momentos y soportando que la RP es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación en

términos estadísticos y geoestadísticos, porque permite percibir cambios pequeños (colores diferentes en la escala entre las entrecalles de la brecha y las contiguas) en la resistencia mecánica a la penetración por la aplicación de diferentes IT; similar a lo expresado por Panziera *et al.* (2020), quienes presentaron mejores condiciones en el suelo cuando el suelo se sometió a menores IT, advirtiéndose valores de RP menores en las entrecalles contiguas a la brecha.

La densidad, cuando se estima con base en masa de suelo seco ( $D_a$ ), es diferente a la densidad en húmedo ( $D_{aH}$ , esta última mayor), su cálculo puede ser engorroso para la cantidad de muestras que se manejan cuando se habla de agricultura digital porque implica transportar masas de suelo a una instalación provista de horno para su secado y de un tiempo considerable para obtener los datos; y los dos valores se pueden relacionar a través de la ecuación:  $D_a = D_{aH} / (1 + \%W)$  (Davidson, 1965).

Para los valores promedios máximos encontrados de  $D_{aH}$  en los lotes A y B después de la cosecha mecanizada, la  $D_a$  fue de aproximadamente  $1.30 \text{ Mg/m}^3$  en ambos casos, pudiendo ser un valor crítico para el crecimiento de las raíces de gran parte de los cultivos anuales sembrados en suelos francos y arcillosos, según Suzuki *et al.* (2022). Por lo que, en aras de que la experiencia pueda ser puesta en práctica, se permitió trabajar con  $D_{aH}$  como un parámetro análogo a  $D_a$  y así aportar al estudio de la compactación en suelos agrícolas; lo que requiere confianza en los métodos estocásticos y deterministas (Hillel, 2013).

Valores de densidad del suelo superiores a  $1.45 \text{ Mg/m}^3$  y de resistencia mecánica a la penetración superiores a  $2.50 \text{ MPa}$  son restrictivos para el crecimiento de las raíces en cultivos de caña de azúcar (Panziera *et al.*, 2020); por tanto, todos los valores promedios encontrados de  $D_{aH}$  y RP debido a IT1, IT2 e IT3 bajo las condiciones particulares de los suelos sujetos de estudio, podrían considerarse como restrictivos y muestran el efecto del tránsito de maquinaria pesada sobre el fenómeno de la compactación; reconociendo la propensión al incremento de la RP en la medida que se incrementó la IT.

La  $D_{aH}$  inicial influyó en la compactación de los suelos sujetos de estudio, en tanto que, cuando su magnitud fue mayor ( $1.67 \text{ Mg/m}^3$  testigo lote B) la susceptibilidad a la compactación fue menor, encontrando un RP promedio máximo de  $1.83 \text{ MPa}$ ; frente a lo ocurrido cuando su magnitud fue menor ( $1.56 \text{ Mg/m}^3$  testigo lote A) la compactación fue mayor, encontrando un RP promedio máximo de  $2.46 \text{ MPa}$ ; lo anterior en concordancia con Silva *et al.* (2018) y Masola (2020) quienes expresan que la susceptibilidad a la compactación del suelo decrece con el aumento de densidad del suelo.

Cuando se discriminó por estratos, se encontró que IT2 e IT3 favorecieron más la compactación al llevar la RP a valores cercanos y superiores a  $2.00 \text{ MPa}$  a partir de los 20 o 30 cm de profundidad; en contraste con IT1, que llevó la RP a esos valores a partir de los 30 o 40 cm de profundidad, influenciado por la susceptibilidad a la compactación y en el mismo sentido de lo expresado por Rodríguez y Valencia (2012), respecto a la menor compactación que se causa por operaciones de cosecha mecanizada de caña de azúcar con IT bajas.

Se advirtió que la transferencia de carga por el tránsito de maquinaria durante la cosecha mecanizada fue similar a la suma de las presiones de contacto de las áreas cubiertas con las llantas u orugas (1.01 MPa), teniendo incrementos en RP promedio (testigo frente a IT1, IT2 e IT3) de alrededor de 1.03 MPa (lote A) cuando el suelo fue más susceptible a la compactación y de 0.42 MPa (lote B) cuando fue menos susceptible a la compactación; en conformidad con la teoría de la dinámica del suelo con relación a la maquinaria (Kuiper y van De Zande, 1994).

En cuanto a la distribución espacial de RP en la vertical: el suelo del lote A, cuyas condiciones favorecieron la compactación (menor DaH testigo frente a lote B), mostró una distribución cuasiparabólica; es decir, la propagación de la compactación (diferencia entre Testigo e IT1, IT2 e IT3) tendió a ser mayor en los estratos superficiales y menor en los subsuperficiales; y el suelo de lote B menos susceptible a la compactación (mayor DaH testigo frente a lote A) exhibió una distribución uniforme, esto es que la propagación de la compactación fue igual en los estratos superficiales y subsuperficiales; dos tipos distribuciones que coinciden con lo reportado por Koolen y Kuipers (1983), Keller *et al.* (2019) y Seehusen *et al.* (2019).

Por otro lado, la distribución espacial de DaH y RP en la horizontal, en los suelos de los lotes A y B reflejaron una continuidad; es decir, las diferentes IT experimentadas influyeron en la compactación de las áreas contiguas, razón por la cual fueron tacitas las diferencias de DaH y RP entre IT1, IT2 e IT3. La propagación de la compactación debido al tránsito de maquinaria con diferentes niveles de IT alcanzó un valor mínimo de 4.55 m en el lote B cuando el suelo fue menos susceptible y un valor máximo de 18.77 m en el lote A cuando el suelo fue más susceptible; propagación que tuvo coincidencias con el modelamiento numérico de la compactación realizado por Silva *et al.* (2018) a través del método de elementos finitos, quienes mostraron una influencia horizontal de cuatro metros de las tensiones provocadas por el paso de un tractor sobre el suelo.

Por último, la ecuación 1, más allá de ser usada para la estimación puntual de IT, RP o DaH (que es posible), se propone como una herramienta de gestión de la mecanización agrícola con la que se pueden construir, a partir de un modelo simple (porque es una ecuación que involucra variables a la primera potencia, sumas y restas), escenarios de compactación en término de DaH y RP causados por el tránsito de maquinaria, y seleccionar el que arroje valores aceptables, reconociendo las condiciones particulares que se puedan presentar y realizando los ajustes necesarios a los coeficientes del modelo para tener mejores aproximaciones, como expresaron Silva *et al.* (2018): “La gestión del tráfico es una herramienta importante para controlar la compactación del suelo”.

Se recomienda rediseñar los campos de cultivo de caña de azúcar para que al momento de la cosecha mecánica no se haga una brecha que origine diferentes intensidades de tráfico y provoque que porciones del suelo cosechado alcancen valores críticos de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración por la propagación horizontal de la compactación. Lo anterior se puede extender a los campos de sistemas productivos agrícolas que puedan tener prácticas similares.

Se recomienda para estudios futuros hacer ensayos que permitan profundizar sobre la distribución de la carga inducida por maquinaria sobre suelos agrícolas con diferentes susceptibilidades a la compactación.

## Conclusiones

La compactación del suelo muestra relación con la intensidad del tráfico durante la cosecha mecánica y con la densidad del suelo, además de que se propaga en menor proporción sobre la dirección horizontal que sobre la dirección vertical, en la que alcanza las mayores magnitudes en los estratos subsuperficiales ( $> 30$  cm de profundidad) con intensidades de tráfico iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha. La propagación horizontal de la compactación aumenta (18.77 m) con menores valores de densidad aparente en húmedo ( $1.56 \text{ Mg/m}^3$ ) y se revierte en el caso contrario ( $1.67 \text{ Mg/m}^3$ ).

La transferencia de carga al suelo susceptible a la compactación fue similar en el total de las presiones de contacto ejercidas sobre el suelo por un tránsito simultáneo de las llantas y orugas de la maquinaria usada para la cosecha mecánica (1.01 MPa), y se redujo en 58% cuando el suelo fue menos susceptible a la compactación.

La cosecha mecánica de caña de azúcar con intensidad de tráfico alta (iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha) favoreció la compactación a partir de los niveles superficiales ( $< 30$  cm de profundidad), llevando los valores de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración a valores críticos. La cosecha mecánica de caña de azúcar con intensidad de tráfico baja (hasta 478.79 Mg.km/ha) logró valores críticos de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración a partir de los niveles subsuperficiales ( $> 30$  cm de profundidad).

El método empleado para el estudio de la compactación inducida fue adecuado para exponer el efecto de la intensidad de tráfico sobre la densidad aparente del suelo en húmedo, la resistencia mecánica a la penetración y su relación, aportando un modelo matemático que explicó hasta 50% de la variabilidad del fenómeno de compactación inducida por el tránsito de maquinaria sobre el suelo.

## Literatura citada

- Antille, D.L.; Peets, S., Galambošová, J.; Botta, G.F.; Rataj, V.; Macak, M.; Tullberg, J.N.; Chamen, W.C.T.; White, D.R.; Misiewicz, P.A.; Hargreaves, P.R.; Bienvenido, J.F. y Godwin, R.J. (2019). Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 17(3): 653-682. <https://doi.org/10.15159/ar.19.133> (Consultada 4 julio 2022).
- Armstrong, M. (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Estados Unidos. 154 p. <https://www.springer.com/gp/book/9783540618454>. (Consultada 23 octubre 2022).
- Carbonell-González, J.; Quintero-Durán, R.; Torres-Aguas, J.S.; Osorio-Murillo, C.A.; Isaacs-Echeverri, C.H. y Victoria-Kafure, J.I. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación): principios metodológicos y aplicaciones (Serie Técnica No. 38). Cenicana, Colombia. 119p. [https://www.cenicana.org/pdf\\_privado/serie\\_tecnica/st\\_38/st\\_38.pdf](https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_38/st_38.pdf) (Consultada 4 Julio 2022).
- Cueto, O.G.; Coronel, C.E.I. y Suárez, M.H. (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> (Consultada 4 Julio 2022).

- Davidson, D.T. (1965). Penetrometer measurements. En: C.A. Black 47. (ed.). *Methods of soil analysis*, part I. *Agronomy*. 9: 472-484. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c37> (Consultada 12 julio 2022).
- de-Moraes, M.T.D.; Silva, V.R.D.; Zwirter, A.L., y Carlesso, R. (2014). Use of penetrometers in agriculture: a review. *Engenharia Agrícola*, 34, 179-193. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100019> (Consultada 23 octubre 2022).
- Diez, D.; Barr, C. y Cetinkaya-Rundel, M. (2019). One-Sample Means with the T-Distribution. In: D. Diez, M. Cetinkaya-Rundel y C. Barr (Eds), *OpenIntro Statistics Fourth Edition* (pp. 251-261). Estados Unidos: OpenIntro Ed. <https://www.openintro.org/os> (Consultada 5 julio 2022).
- Draghi, L.; Jorajuria Collazo, D.; Sarena, D.; Bailleres, M.; Melani, E.; Castillo, J.M. y Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia*. 19(2): 59-67. <http://www.scielo.edu.u/pdf/agro/v19n2/v19n2a08.pdf> (Consultada 5 julio 2022).
- García-Rodríguez, E.; Gutiérrez-Rodríguez, F.; Ramírez Dávila, J.F.; González-Huerta, A.; Pérez López, D.D.J. y Serrato-Cuevas, R. (2020). Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 11(4): 753-766. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2133> (Consultada 5 julio 2022).
- Gill, W. y Vanderberg, G.E. (1967). Soil dynamics in tillage and traction. USDA, Agricultural Research Services, Washington, D.C. 511 p. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT10309639/PDF> (Consultada 5 Julio 2022).
- Gutiérrez-Rodríguez, F.; González-Huerta, A.; Pérez-López, D.D.J.; Franco-Mora, O.; Morales-Rosales, E.J.; Saldívar-Iglesias, P. y Martínez-Rueda, C.G. (2012). Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un Vertisol. *Terra Latinoamericana*. 30(1): 1-7. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792012000100001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000100001) (Consultada 6 Julio 2022).
- Hernández-Sánchez, J.M. de los D.; Figueroa-Sandoval, B. y Martínez Menes, M.R. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (22): 53–61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858> (Consultada 10 agosto 2022).
- Hidalgo, R.J.; Pozzolo, O.R.; Domínguez, J.F.; Giménez, L. y Botta, G.F. (2020). Compactación del suelo causado por el tránsito de maquinarias en la cosecha de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 52(1): 161-174. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-86652020000100013&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-86652020000100013&script=sci_arttext&tlng=en) (Consultada 6 de julio 2022).
- Hillel, D. (2013). *Fundamentals of soil physics*. Academic press. Estados Unidos de América. 413 p. (Consultada 10 agosto 2022).
- Jaramillo, D.F. (2012). variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1(1): 73-87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004> (Consultada 6 julio 2022).
- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R. y Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293> (Consultada 6 julio 2022).
- Koolen, A. y Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Springer Science & Business Media. 244 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5> (Consultada 7 julio 2022).
- Kuipers, H. y van De Zande, J.C. (1994). Quantification of traffic systems in crop production. *Developments in Agricultural Engineering*. 11: 417-445. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50026-X> (Consultada 1 Julio 2022).
- Liu, Y.; Ma, X.; Shu, L.; Hancke, G.P. y Abu-Mahfouz, A.M. (2020). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6): 4322-4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910> (Consultada 7 julio 2022).
- Lucero-Vega, G.; Troyo-Diéguez, E.; Murillo-Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Ruíz-Espinoza, F.H.; Beltrán-Morañes, F.A. y Zamora-Salgado, S. (2017). Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia*. 51(5): 487-505. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000500487&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000500487&script=sci_arttext) (Consultada 10 agosto 2022).