

DIGITALIZACIÓN DE HUELLAS INDUCIDAS POR UN NEUMÁTICO SOBRE SUELO AGRÍCOLA

Emilia Itzel Soto Morales¹, Jonathan Duarte Jasso², María Guadalupe Salmeron Melechor¹, Joani Rafael Rodríguez Medrano¹, Noé Saldaña Robles³, Alberto Saldaña Robles³

¹Licenciatura en ingeniería Agrónoma. División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

²Licenciatura en ingeniería Mecatrónica. División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

³Departamento de Ingeniería Agrícola. División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

Resumen

En la actualidad, la compactación del suelo agrícola es un problema a nivel mundial en la agricultura moderna, afectando el crecimiento de las plantas y con ello el rendimiento de los cultivos. Uno de los principales factores que induce una severa compactación de suelo en la agricultura es el uso intensivo de maquinaria agrícola pesada. Una alternativa al estudio experimental de la compactación de suelo agrícola es el desarrollo de modelos numéricos de la interacción neumático-suelo, la simulación del fenómeno permite reducir tiempos de experimentación. Sin embargo, una validación de los modelos debe llevarse a cabo, la cual se realiza generalmente por medio de un análisis entre diversas características geométricas de la huella inducida por el neumático sobre el suelo (área de contacto, volumen de contacto, profundidad de la huella, longitud del eje menor de huella, longitud del eje mayor de huella, etc.), obtenidas del modelo numérico en comparación con las experimentales. Por lo anterior, en la presente investigación se utilizó escaneo 3D para digitalizar las huellas inducidas por un neumático agrícola a dos estados de carga vertical cíclica (1962 N y 3924 N) en combinación con dos presiones de inflado del neumático (0.124 MPa y 0.193 MPa), sobre un suelo Vertisol pélico con humedad del 20 % y una densidad aparente de 1200 kg/m³, para estudiar la influencia del número de pases, el peso de la maquinaria agrícola (carga vertical) y la presión de inflado del neumático en la huella inducida sobre el suelo, la cual está relacionada directamente con la compactación de suelo. La información obtenida podrá emplearse en un futuro para la validación de un modelo numérico de la interacción neumático-suelo.

Palabras clave: Escaneo 3D; área de contacto; presión de inflado; Vertisol pélico.

Introducción

La compactación es una de las causas más importantes de la degradación del suelo agrícola, la cual provoca una disminución en el rendimiento de los cultivos debido a la reducción de oxígeno, agua y nutrientes del suelo. Una de las principales causas de la compactación en los suelos agrícolas es el uso de máquinas agrícolas que generan niveles de esfuerzo por encima de la capacidad del suelo (Hamza y Anderson, 2005). En la actualidad, las máquinas agrícolas modernas cada vez son más pesadas transmitiendo con sus ejes una carga más grande al suelo agrícola, lo que aumenta también el grado de compactación a capas más profundas. Un suelo con una excesiva compactación también aumenta la resistencia mecánica del suelo, que induce un incremento de la fuerza de corte del suelo, la abrasión de los implementos, el consumo de combustible y el tiempo de laboreo (Farhadi *et al.*, 2019).

La compactación del suelo se ha convertido en un problema a nivel mundial en la agricultura moderna, que además del estudio experimental se han utilizado diversas técnicas de modelado para predecir la respuesta del suelo al tráfico de vehículos agrícolas (González *et al.*, 2013). Los modelos desarrollados para predecir la respuesta del suelo agrícola a la interacción de los neumáticos deben validarse, para después emplearse en el estudio y predicción de la compactación. Una manera de validar estos modelos es por medio de diversas características de la huella inducida por el neumático, tales como el área de contacto, el volumen de contacto, la profundidad de la huella, la longitud del eje menor de la huella y la longitud del eje mayor de la huella. Por mencionar, Farhadi *et al.* (2019) validó un modelo numérico de la interacción de un neumático agrícola 12.4-28 sobre un bloque de suelo franco-arcilloso, comparando el área y el volumen de contacto obtenidos de un molde de yeso de la huella por medio de un escáner, además para la validación también utilizaron los valores medidos de la resistencia a la rodadura. Sin embargo, el obtener la huella mediante esta técnica de yeso para su posterior escaneo, puede llegar limitar el estudio de carga cíclica a un solo ciclo (pase del equipo agrícola)

o incrementar los tiempos de experimentación, ya que la extracción de la huella de yeso puede modificar o destruir la huella generada en el suelo.

Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo emplear un escáner portátil 3D para digitalizar directamente sobre un suelo Vertisol pélico, sin invasión y destrucción, las huellas inducidas por un neumático agrícola bajo diferentes cargas verticales de compactación y presiones de inflado del neumático, eliminando la etapa de la generación de la huella mediante un molde de yeso y permitiendo la obtención de las huellas por medio de carga cíclica (carga-descarga), simulando el número de pases de los equipos agrícolas por la misma región del suelo. La investigación se realizó empleando un prototipo de banco experimental diseñado para compactación de suelo agrícola, el cual se encuentra en el Laboratorio de Sistemas Hidráulicos de Potencia de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato. El suelo agrícola de estudio es el Vertisol pélico, suelo con alto potencial para la producción en México y uno de los suelos predominantes en el estado de Guanajuato. La información obtenida del análisis de las huellas digitalizadas podrá emplearse en un futuro para validar un modelo numérico de la interacción neumático-suelo para el estudio y predicción de la compactación del suelo Vertisol pélico. Además, se realizó un análisis de la influencia del número de pases (carga-descarga), la carga vertical de compactación y la presión de inflado del neumático sobre las diversas características de la huella inducida por el neumático.

Materiales y Métodos

La investigación se realizó en el Laboratorio de Sistemas Hidráulicos de Potencia de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato. En la Figura 1a se muestra el prototipo de banco hidráulico para pruebas experimentales de compactación de suelo, el cual cuenta con los siguientes elementos: depósito de aceite, motor eléctrico, bomba hidráulica, válvulas de alivio, válvulas de control de flujo, actuador hidráulico, manómetros, marco de soporte del neumático agrícola, contenedor de suelo, dinamómetro digital y rin con neumático agrícola 6.70-5SL (neumático agrícola empleado en diversos implementos). El banco hidráulico se empleó para estudiar el efecto del número de pases de la maquinaria, el peso de la maquinaria (carga vertical de compresión) y la presión de inflado del neumático sobre diversas características de la huella inducida del neumático sobre el suelo agrícola Vertisol pélico (área de contacto, profundidad de huella, longitud del eje menor y longitud del eje mayor de la huella), que están relacionadas con la compactación del suelo. Las características mencionadas de las huellas se obtuvieron al digitalizar las mismas por medio de escaneo 3D, lo que además permitirá en un futuro validar un modelo de la interacción neumático-suelo.

Preparación del bloque de suelo

El suelo agrícola se recolectó del campo experimental de la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato (20°44'43" N, 101°19'40" W). Se extrajeron alrededor de 500 kg de suelo clasificado como Vertisol pélico (suelo considerado de los más productivos del país de acuerdo con Torres *et al.*, 2016), los cuales se llevaron al Laboratorio de Sistemas Hidráulicos de Potencia. El suelo se disgregó en el laboratorio empleando un mazo de acero, posteriormente se tamizó empleando una malla del número 4 para obtener un tamaño de partícula estándar de la muestra de suelo, ya homogenizado el suelo se introdujo en 25 bolsas de plástico con 20 kg de suelo por bolsa y se determinó el contenido de humedad gravimétrica, resultando una humedad promedio de 5 muestras tomadas al azar de alrededor del 6.0 %, enseguida se incorporó la cantidad de agua necesaria para llevar el suelo a una humedad del 20 % (humedad de trabajo), aproximadamente 2.6 L en cada bolsa, la cual se selló y almacenó durante un periodo de 72 horas con el objetivo de uniformizar el contenido de humedad en el suelo agrícola. El contenedor del suelo del banco hidráulico para pruebas de compactación tiene dimensiones de largo, ancho y longitud de 0.38 m x 0.45 m x 1.45 m, respectivamente (volumen de cerca de 0.25 m³). El suelo se estableció con una densidad aparente de 1200 kg/m³, para lograr esta densidad, el bloque de suelo se trabajó agregando dos capas de 150 kg de suelo compactando cada una hasta alcanzar el volumen establecido (Figura 1a). El mismo procedimiento se empleó para todos los bloques de suelo utilizados en la investigación.

Generación de huellas inducidas por el neumático

El estudio experimental consistió en evaluar dos cargas verticales del neumático sobre el bloque de suelo 1962 N (200 kgf) y 3924 N (400 kgf) en combinación con dos presiones de inflado del neumático 0.124 MPa (18 psi, presión baja) y 0.193 MPa (28 psi, presión recomendada), lo que resultó en 4 pruebas experimentales. Así mismo, cada prueba se realizó de manera cíclica, que consistió en aplicar una secuencia de carga-descarga para simular el tráfico agrícola o el número de pases de un implemento agrícola sobre la misma

zona del suelo, lo que se realizó hasta verificar que las dimensiones de la huella no presentaran un cambio importante. Por lo anterior, la metodología por cada prueba experimental fue la siguiente: a) acorde al número de prueba, se estableció la presión de inflado del neumático (0.124 MPa o 0.193 MPa) y la carga vertical de compresión (1962 N o 3924 N); b), se activó el actuador hidráulico para desplazar verticalmente en dirección negativa el neumático agrícola sobre el suelo comprimiéndolo hasta alcanzar la carga vertical establecida, una vez alcanzada la carga, el actuador se desplazó verticalmente en dirección positiva alejando el neumático del suelo y dejando la huella inducida visible (Figura 1b), empleando una cinta métrica se registra la longitud del eje menor y eje mayor de la huella; c) se realizó un escaneo 3D de la huella inducida para su digitalización, la cual se empleó posteriormente para extraer el área de contacto, la profundidad de huella, la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor de la huella generada y d) se realizó el procedimiento anterior (carga-descarga-escaneo) para simular el número de pases del neumático de un equipo agrícola en la misma zona de suelo, lo anterior hasta que la huella de contacto no presentará un cambio significativo.

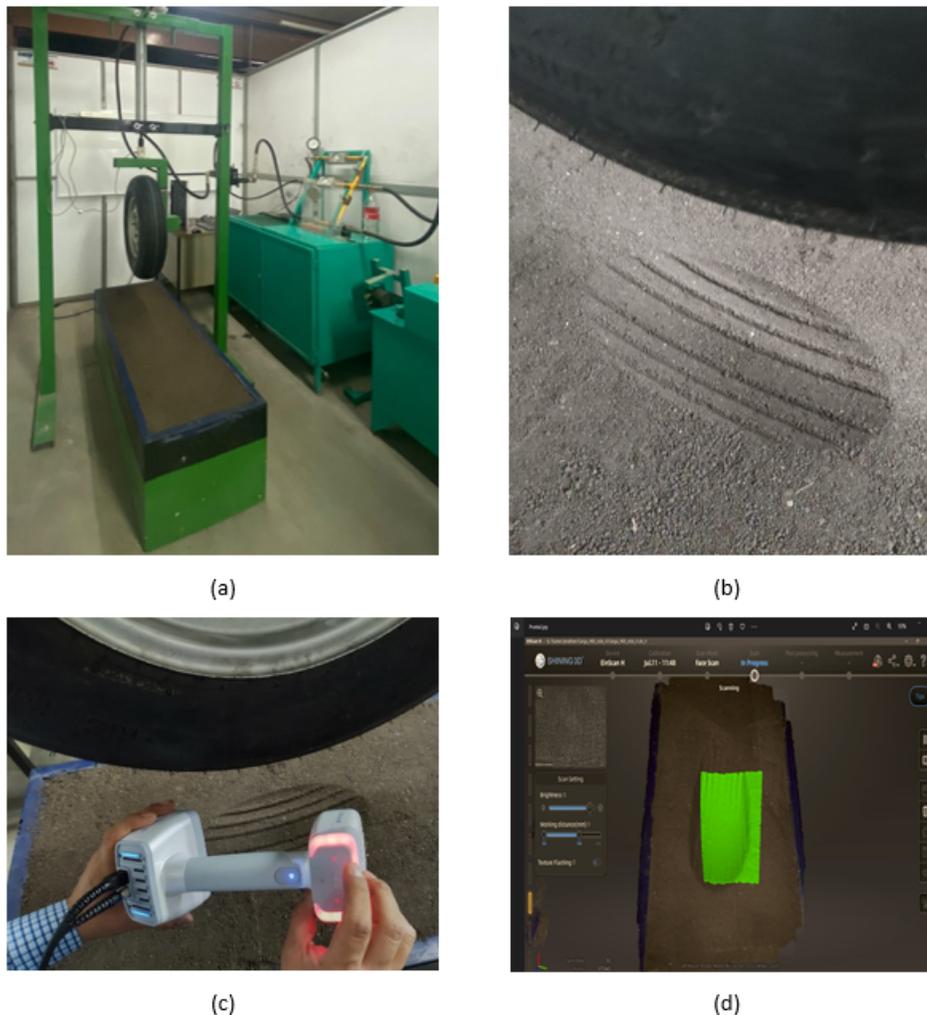


Figura 1. Digitalización de huellas inducidas por un neumático sobre suelo Vertisol pélico, (a) banco hidráulico para pruebas de compactación de suelo, (b) huella inducida del neumático agrícola sobre el suelo, (c) escaneo de la huella y (d) proceso de digitalización de la huella.

Digitalización de las huellas

Se empleó el escáner portátil EinScan H Shining para la digitalización 3D de las huellas inducidas por el neumático agrícola, el cual tiene exactitud de escaneo de hasta 0.05 mm, velocidad de escaneo de 1,200,000 puntos/s, 20 FPS, profundidad de campo de 200 a 700 mm, formatos de salida BJ, STL, ASC, CAPA, P3 y 3MF, entre otras características. Inicialmente, el escáner se calibró empleando el programa EXScan H v1.0.5.3 tomando en cuenta la iluminación del espacio de trabajo y el área disponible. El escaneo se realiza

mediante una trayectoria continua alrededor de la huella con un movimiento lento (Figura 1c), al mismo tiempo se va observando en tiempo real el área o región escaneada por el equipo (Figura 1d), una vez digitalizada la huella satisfactoriamente, se eliminan secciones o áreas que no son de interés de estudio reduciendo el tamaño del archivo para finalmente exportarlo en un archivo STL (Figura 2a). Una vez exportada la huella en 3D, se utilizan los programas de Autodesk AutoCAD e Inventor para estimar el área de la huella, la profundidad de la huella y las longitudes del eje menor y el eje mayor de la huella (Figura 2d). El modelo de la huella se construye mediante una malla triangular de áreas seleccionando en el programa el número de elementos triangulares deseado, una mayor densidad define mejor el área de la huella (figuras 2b y c) pero aumenta el tamaño del archivo dificultando su análisis posteriormente. Por lo anterior, para estudiar la densidad de la malla en función de la precisión del área de contacto, un análisis del área de la huella considerando 500, 1000, 5000, 10000, 20000, 30000 y 40000 elementos se llevó a cabo.

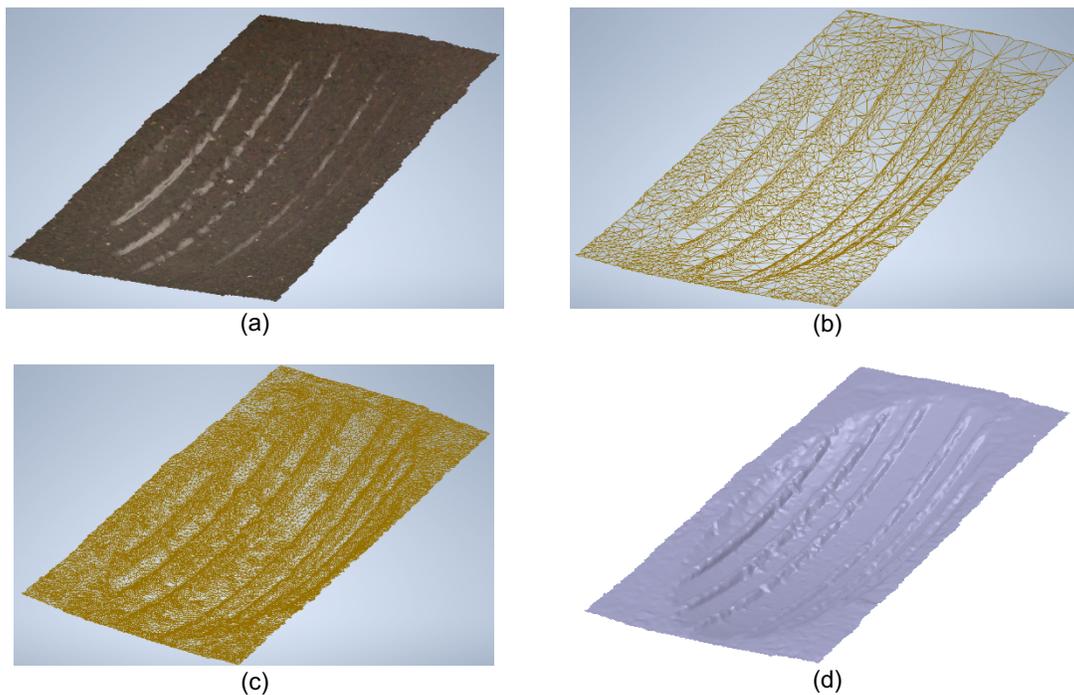


Figura 2. Huellas ilustrativas de la digitalización, (a) modelo obtenido con textura, (b) malla del modelo con un bajo número de elementos, (c) malla del modelo con un alto número de elementos y (d) modelo final de la huella para análisis.

Finalmente, un análisis de la influencia del número de pases del neumático (carga cíclica), el peso del equipo agrícola sobre el neumático (carga vertical) y la presión de inflado del neumático en la huella inducida se llevó a cabo. Además, es importante mencionar que los resultados de las huellas experimentales obtenidos en esta investigación pueden ser empleados en un futuro para la validación de un modelo numérico de la interacción neumático-suelo agrícola Vertisol pélico.

Resultados y Discusión

El análisis de densidad de malla mostró que a partir de 10000 elementos el área de contacto presenta una diferencia insignificante, por mencionar, si se consideran 10000 y 40000 elementos para el modelo de la huella inducida por el neumático en el primer ciclo de carga-descarga, con una carga vertical de 1962 N y una presión de inflado de 0.193 MPa, las áreas resultantes son 418.53 cm² y 418.80 cm², respectivamente (error inferior al 0.1 %). Por lo anterior, todos los modelos de huellas se obtuvieron con esta cantidad de elementos para el tipo de neumático utilizado en este estudio, es importante mencionar que mientras más elementos tenga el modelo, el tamaño del archivo STL es mayor, lo que puede llegar a dificultar el análisis de la huella en el mismo equipo de cómputo. La Tabla 1 muestra los resultados experimentales de las mediciones con el

flexómetro de las longitudes del eje menor y mayor de las huellas inducidas por el neumático agrícola a las diversas cargas verticales de compresión y presiones de inflado del neumático. Se puede observar que para todas las combinaciones de presión de inflado y carga vertical, a partir del primer pase o ciclo carga-descarga, ambas longitudes de los ejes de la huella permanecen constantes, por lo que solo se realizaron cuatro ciclos de carga-descarga para cada tratamiento experimental. Lo anterior, sugiere que para las condiciones de suelo Vertisol pélico establecidas (20 % de humedad y densidad aparente de 1200 kg/m³), así mismo para las presiones de inflado del neumático agrícola (0.124 MPa y 0.193 MPa) y cargas verticales seleccionadas (1962 N y 3924 N), una vez que se ha realizado el primer pase con el equipo sobre la misma región del suelo se logra el mayor incremento de compactación. Sin embargo, esta compactación puede incrementar si la carga de la maquinaria es más grande o si el suelo se encuentra a un contenido de humedad mayor.

Tabla 1. Longitud del eje menor y eje mayor de las huellas inducidas por el neumático agrícola a diversas condiciones.

| Presión de inflado del neumático (MPa) | 0.193 | | | | 0.124 | | | |
|---|-------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | 1962 | | 3924 | | 1962 | | 3924 | |
| Carga vertical de compresión (N) | | | | | | | | |
| Longitud de los ejes de la huella (cm) | m | M | m | M | m | M | m | M |
| Número de pases (ciclos carga-descarga) | | | | | | | | |
| 1 | 12.0 | 24.0 | 17.0 | 37.5 | 29.5 | 15.0 | 40.0 | 19.0 |
| 2 | 12.5 | 26.0 | 18.0 | 38.0 | 30.0 | 15.0 | 41.0 | 19.0 |
| 3 | 12.5 | 26.0 | 18.0 | 38.0 | 30.0 | 15.0 | 41.0 | 19.0 |
| 4 | 12.5 | 26.0 | 18.0 | 38.0 | 30.0 | 15.0 | 41.0 | 19.5 |

M – longitud del eje mayor de la huella y m – longitud del eje menor de la huella.

Una vez analizadas las huellas digitalizadas, en la Figura 3 se muestran los resultados de la longitud del eje menor, la longitud del eje mayor, la profundidad de huella y el área de contacto para todas las combinaciones de presión de inflado, carga vertical de compresión y número de pases (ciclos carga-descarga). Las figuras 3a y b muestran las longitudes del eje menor y el eje mayor de la huella para los 4 tratamientos experimentales y los 4 pases del neumático para cada tratamiento (carga-descarga). Se puede observar como a partir del análisis de las huellas digitalizadas se pueden obtener las longitudes de los ejes con una mayor precisión en comparación con las mediciones experimentales que se muestran en la Tabla 1. Aunque la información de las figuras 3a y b es similar a lo mencionado de la Tabla 1, que sugiere que para las condiciones del estudio a partir del primer pase o ciclo carga-descarga el incremento de las longitudes de los ejes es nulo, los resultados obtenidos de la digitalización de las huellas muestran que con el primer pase (carga-descarga), las longitudes de los ejes logran el mayor incremento, posteriormente aumentan ligeramente con el número de pases de manera irrelevante. De las mismas figuras se observa que efectivamente como era esperado, el incremento de la carga vertical de compactación incrementa las longitudes de los ejes para ambas presiones de inflado, mientras que una presión baja (0.124 MPa) en comparación con la recomendada (0.193 MPa) para la misma carga, aumenta las longitudes de ambos ejes de la huella.

Farhadi *et al.* (2019) manifiesta que la compactación es el proceso de reacomodo de las partículas del suelo, lo que reduce el espacio libre entre ellas ocasionando una disminución del volumen del suelo. Por otro lado, Hernández *et al.* (2022) menciona que la reducción del volumen del suelo está relacionada con el cambio de propiedades físicas del suelo, tales como la porosidad del suelo, la densidad aparente, los esfuerzos que se presentan en el suelo durante la carga de la maquinaria que compacta, la capacidad de intercambio iónico, entre otras propiedades, que pueden ser usadas para indicar el grado de compactación. Además, el autor menciona que el aumento del área de contacto y la profundidad de la huella es un indicador de un incremento de la pérdida de volumen, lo que está relacionado con el incremento de la compactación del suelo. Las figuras 3c y d muestran la profundidad de la huella y el área de contacto inducida por el neumático sobre el suelo para los 4 tratamientos experimentales y los 4 pases del neumático para cada tratamiento (carga-descarga). Para ambas variables, se muestra que independientemente de la presión de inflado del neumático agrícola, el incremento de la carga vertical de compresión aumenta el área de la huella inducida por el neumático y su profundidad. Para la presión de inflado de 0.193 MPa, un incremento de carga vertical de 1962 N a 3924 N aumenta el área de contacto promedio de 311.83 cm² a 690.94 cm² (alrededor del 121.6 %), y la profundidad media de la huella de 1.91 cm a 4.52 cm (cerca del 136.6 %), mientras que para la presión de inflado de 0.124 MPa, el mismo incremento de carga vertical aumenta el área de contacto promedio de 441.79 cm² a 785.78 cm² (alrededor del 77.9 %), y la profundidad media de la huella de 2.89 cm a 4.78 cm (aproximadamente un 65.4 %). Lo anterior, sugiere que al incrementar la carga vertical al neumático con la mayor presión de inflado (0.193 MPa), se induce un mayor porcentaje en la pérdida de volumen, en comparación con incrementar la carga vertical a la presión de inflado menor de 0.124 MPa. Sin embargo, se observa que, a una misma carga vertical la presión de inflado del neumático baja (0.124 MPa) induce una mayor área de contacto y profundidad de huella en comparación con la presión de 0.193 MPa, lo que sugiere una mayor pérdida de volumen. Lo

anterior muestra la importancia de trabajar los neumáticos agrícolas con una presión de inflado adecuada. Finalmente, la información experimental obtenida de las huellas inducidas por el neumático agrícola bajo diversas condiciones de trabajo (carga vertical y presión de inflado), puede ser empleada en trabajo futuro para validar por medio de los diversos escenarios experimentales un modelo numérico de la interacción neumático-suelo, para el estudio de la compactación del suelo Vertisol pélico.

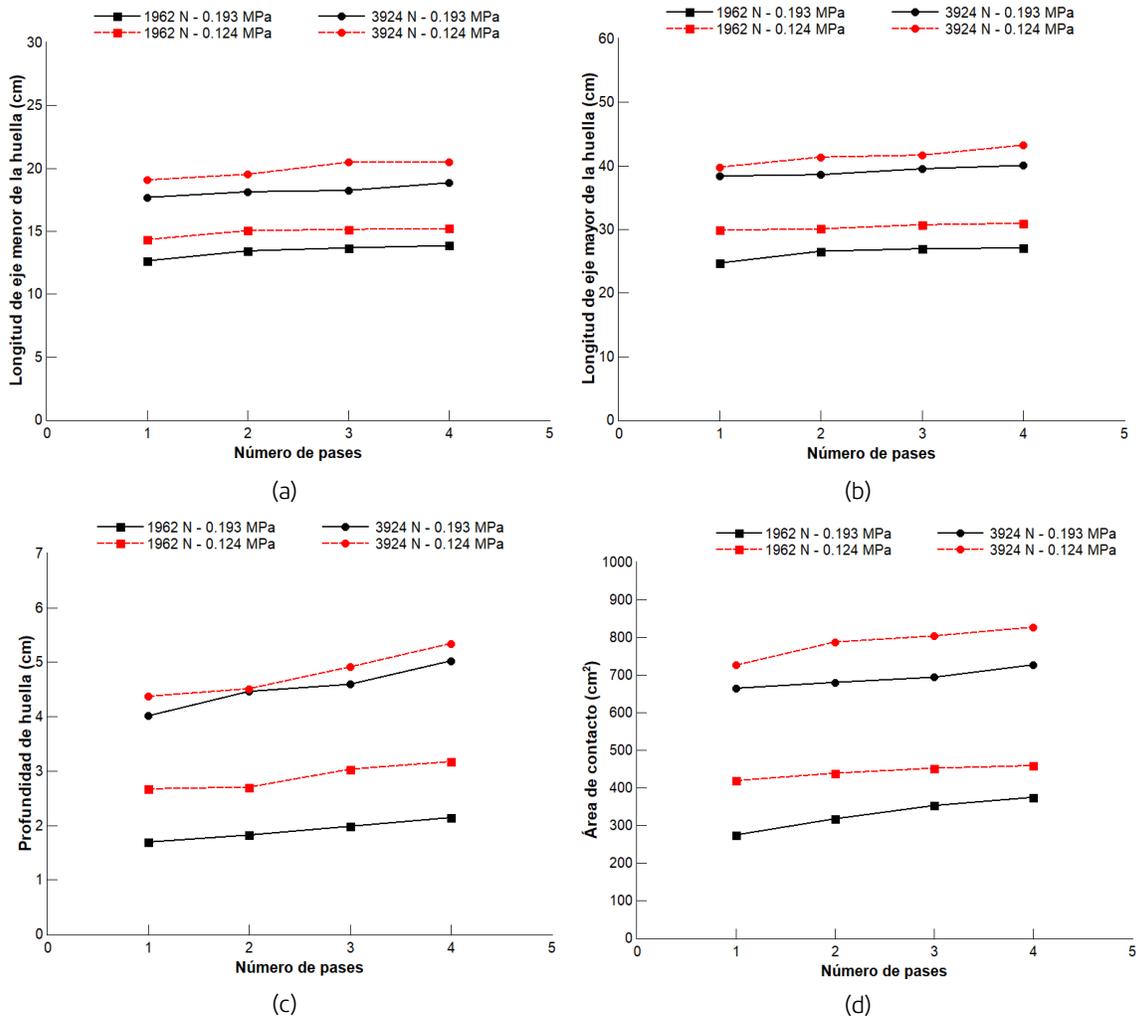


Figura 3. Resultados del análisis de las huellas digitalizadas inducidas por el neumático agrícola a diferentes condiciones de carga y presión de inflado, (a) longitud del eje menor, (b) longitud del eje mayor, (c) profundidad de la huella y (d) área de contacto.

Conclusiones

Se digitalizaron las huellas de contacto inducidas por un neumático agrícola sobre suelo Vertisol pélico bajo distintos escenarios de presión de inflado del neumático y carga vertical de compactación cíclica de manera satisfactoria. Los parámetros determinados de área de contacto, profundidad de la huella, longitud del eje menor y longitud del eje mayor de las huellas inducidas bajo los distintos escenarios experimentales pueden ser útiles en un futuro para validar un modelo numérico de la interacción neumático-suelo Vertisol pélico para estudiar compactación. Las condiciones del suelo, las cargas verticales de compactación y las presiones de inflado del neumático agrícola establecidas en este estudio, muestran que con el primer pase se logra el mayor incremento de las características de la huella de contacto y compactación del suelo, que al incrementar el número de pases siguen incrementando pero de manera irrelevante. El incremento de la carga vertical de compactación independientemente de la presión de inflado aumenta el tamaño de la huella inducida por el neumático, lo que sugiere también un incremento en la compactación del suelo. El estudio desarrollado es

preliminar, en un futuro se puede emplear un penetrómetro digital para correlacionar las características de la huella inducida con un índice del grado de compactación del suelo, el estudio de las huellas inducidas por diferentes neumáticos agrícolas, así como investigar la influencia de cargas verticales de compactación más grandes.

Referencias

- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Malvajardi, A. S., & Shahgholi, G. (2019). Finite element modeling of the interaction of a treaded tire with clay-loam soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 793-806.
- González, C. O., Coronel, C. E. I., Morfa, C. A. R., Sosa, G. U., Gómez, L. H. H., Calderón, G. U., & Suárez, M. H. (2013). Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and electronics in agriculture*, 99, 146-152.
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, 82(2), 121-145.
- Hernández, H. V. A. (2022). Análisis experimental y simulación numérica de la compactación de suelo Vertisol pélico. Tesis de Doctorado. División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México.
- Torres, C. A., Gutiérrez, C., M., Carmen, D., Ortiz, S. C. A., & Gutiérrez, C. E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 457-466.