

Nota técnica

## EFECTO DEL BALANCEO DE CARGAS EN LOS EJES DE TRACTORES AGRÍCOLAS SOBRE LA EFICIENCIA DE LABRANZA Y LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN SUELO VERTISOL

Karolina Villagra-Mendoza<sup>1/\*</sup>, Daniela Brenes-Canó<sup>2</sup>, Natalia Gómez-Calderón<sup>3</sup>

**Palabras clave:** Balanceo de cargas; consumo de combustible; maquinaria agrícola; patinaje; peso del tractor; profundidad de labranza; propiedades del suelo; velocidad de avance.

**Keywords:** Ballast; fuel consumption; agricultural machinery; slippage; tractor weight; tillage depth; soil properties; tillage speed.

Recibido: 04/03/22

Aceptado: 23/08/22

### RESUMEN

**Introducción.** Debido a la alta tasa de degradación del suelo a nivel mundial, se requiere encontrar prácticas agrícolas que promuevan la conservación de suelos. **Objetivo.** Evaluar el balanceo estático de cargas de un tractor dedicado a la labranza, por medio de diferentes distribuciones de contrapesos en sus ejes, para mejorar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas y la eficiencia de operación en un suelo vertisol. **Materiales y métodos.** Se plantearon 3 balanceos de cargas diferentes en los ejes delantero y trasero 40-60%, 30-70% y 50-50%; mediante la adición de contrapesos en el eje trasero del tractor. Se realizaron muestreos de campo a una profundidad de 15 cm en 3 etapas de muestreo (antes de mecanizar, inmediatamente y 2 meses

después de mecanizar) en un vertisol con cultivo de pasto (*Digitaria decumbens* Stent). Se analizaron las variables de contenido de humedad del suelo, densidad aparente, límites plásticos, resistencia a la penetración del suelo, así como las necesidades hídricas del cultivo de acuerdo con los tratamientos. Además, se determinaron variables de operación y eficiencia, tales como profundidad de labranza, patinaje, consumo de combustible y fricción. Se analizaron las diferencias de las variables entre los tratamientos y entre etapas de muestreo con el fin de determinar el tratamiento con la menor afectación a las propiedades del suelo y mayor eficiencia de operación. **Resultados.** Se encontraron diferencias significativas entre los balanceos de carga por eje evaluados para todas las propiedades del suelo analizadas, excepto en el contenido de humedad. El balanceo 30-70% presentó los valores más

\* Autora para correspondencia. Correo electrónico: kvillagra@itcr.ac.cr

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago, Costa Rica.  
 0000-0002-2335-0615.

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 0000-0001-6990-5316.

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola, Cartago, Costa Rica.

 0000-0001-7961-7529.

bajos de consumo de combustible y de agua para el riego, patinaje, resistencia al corte y resistencia a la penetración. **Conclusiones.** El balanceo 30-70% se considera ideal para mecanizar bajo las condiciones estudiadas. No se recomienda mecanizar con el balanceo 50-50%, ya que la profundidad de labranza y los cambios en las propiedades del suelo fueron en detrimento de algunas propiedades del mismo.

## ABSTRACT

**Effect of agricultural tractor axle load balancing on tillage efficiency and the soil physical and mechanical properties of a vertisol. Introduction.** Due to the high worldwide rate of soil degradation, it is necessary to look for agricultural practices that promote soil conservation. **Objective.** To assess the tractor axle load balancing dedicated to tillage, through different counterweights distributions, to improve the physical, mechanical, and hydraulic properties of a vertisol and the efficiency of tillage operation. **Materials and methods.** Three different load balances were set on the front and rear axles, being 40-60%, 30-70% and 50-50%, by adding counterweights to the rear

axle of the tractor. Field samples were taken at a depth of 15 cm in 3 sampling stages (before, immediately and 2 months after tillage), in a grass (*Digitaria decumbens* Stent) cultivated lot. Soil water content, bulk density, plastic limits, soil penetration resistance, as well as the water needs of the crop according to the treatments were analyzed. In addition, operation and efficiency variables were determined, such as tillage depth, slippage, fuel consumption, friction, and tractor power required. The differences of the variables between the treatments and sampling stages were analyzed to determine the treatment with the least impact to the soil properties and greater efficiency of operation. **Results.** Significant differences were found between balances in all the soil properties analyzed, except in the soil water content. The balance 30-70% presented the lowest values of fuel and water consumption for irrigation of the grass crop, wheel slippage, shear stress and penetration resistance. **Conclusions.** The balance treatment of 30-70% was considered as the best treatment under the studied conditions. Tillage with the treatment 50-50% was not recommended since tillage depth and soil property changes between sampling stages affected negatively to some soil properties.

## INTRODUCCIÓN

El 25% de la tierra dedicada a la agricultura se encuentra en algún estado de degradación (FAO y ITPS 2015), donde la labranza es una de las causas más importantes de esta. De acuerdo con Gómez-Calderón *et al.* (2018), aproximadamente un 28% de los suelos en Costa Rica se encuentran en estado de degradación debido a la labranza, donde la convencional que es la más utilizada y la cual consiste en una labranza de corte y volteo. La labranza convencional aumenta el número de pasadas de la maquinaria lo que genera un sobretránsito de hasta un 86% del total del área mecanizada (Gómez-Calderón

*et al.* 2018), lo que afecta múltiples propiedades y funciones del suelo (Cadena *et al.* 2012). Adicionalmente, la labranza es una de las operaciones que consume más energía, ya que significa un 29% a un 59% de combustible, en todo el proceso de producción. Por tanto, la escogencia adecuada del tractor es muy importante no solo para mejorar directamente la eficiencia del proceso de labranza sino para determinar el menor impacto negativo sobre las propiedades del suelo (Al-Talabani 2021). Es así como los criterios de escogencia y operación del tractor deben estar en función de su peso, presión de las llantas, balance de cargas, y velocidad y profundidad de labranza adecuadas con el fin de minimizar el número de

pasadas y patinaje de las llantas, así como el consumo de combustible (Mamkagh 2019a).

La distribución del peso del tractor es clave en la compactación del suelo y en el consumo de combustible (Hartge y Horn 2016). Por lo tanto, para lograr un balance óptimo de distribución de cargas, se debe tomar en cuenta el tipo y tamaño del tractor; tipo, tamaño y número de llanta; tipo de suelo y su condición; y la fuerza de tiro (Casady 1997). Suelos vertisoles al presentar un gran contenido de arcilla, pueden mostrar más plasticidad o más cementación en función del contenido de humedad, lo que afecta el deslizamiento y la eficiencia de tracción (Jadhav *et al.* 2013). Debido a lo anterior, suelos con altos contenidos de arcilla impactan directamente en el requerimiento de mejores relaciones de balance de pesos (Al-Mastawi *et al.* 2022), por lo que el balance de cargas debe estar distribuido correctamente entre la parte delantera y trasera para obtener la máxima eficiencia de tracción, estabilidad, minimizar el consumo de combustible y la deformación del suelo (Casady 1997, Lyne *et al.* 1984). De acuerdo con lo mencionado por Pravin (2012), el balanceo óptimo de un tractor agrícola es de 41% en el eje delantero y 59% en el eje trasero, ya que bajo estas condiciones se obtiene la mayor tracción bruta y potencia. Por otra parte, Gómez-Calderón y Rodríguez-Yáñez (2020) recomiendan una relación 40% y 60% para el eje delantero y trasero, respectivamente, con el fin de conservar el centro de gravedad del tractor y prevenir su desgaste prematuro. Adicionalmente, el aumento del peso del tractor contribuye a aumentar la productividad, pero al mismo tiempo puede aumentar el consumo de combustible y la compactación del suelo. Por ejemplo, Mamkagh (2019a) reportaron hasta un 15% de aumento del consumo de combustible, y Mahmood *et al.* (2020) cuantificaron un aumento del 156% en consumo de combustible al aumentar 300 kg de peso en el tractor. Asimismo, Jorajuria y Draghi (2000) mencionan que el peso de los ejes no debe sobrepasar 49 kN para reducir la compactación a profundidades mayores a 30 cm.

El número de rastras también influye en la compactación del suelo. El primer pase del tractor es el que produce un mayor efecto sobre la compactación (entre un 50% - 60%), ya que el peso del eje del tractor es el más importante. Prácticas como el mantenimiento del balanceo estático del tractor contribuyen a disminuir el peso sin perjudicar la tracción, al aumentar el área de contacto y mantener una adherencia adecuada de los neumáticos, para evitar las bajas eficiencias de la maquinaria y así disminuye el costo de la labranza mecanizada (Gómez-Calderón *et al.* 2018).

El patinaje también afecta directamente el rendimiento de la labranza (Gómez *et al.* 2016) y a la vez influye en la deformación mecánica del suelo (Hartge y Horn 2016). Almaliki *et al.* (2021) explicaron el patinaje en función de la profundidad de labranza, la velocidad de avance del tractor y la cohesión y fricción de las partículas del suelo en términos de resistencia a la penetración. Observaron un patinaje máximo de 29% al aumentar la labranza a una profundidad de 25 cm con una resistencia a la penetración de 550 kPa, mientras que obtuvieron un 15% de patinaje a 10 cm de profundidad. Seguidamente, al aumentar 3 veces la velocidad de avance les generó un aumento en el patinaje del 116%. De acuerdo con Gómez *et al.* (2016) el porcentaje ideal de patinaje del tractor en el suelo puede oscilar entre 8-15% según del tipo de la tracción del tractor.

El impacto de la labranza en la deformación mecánica del suelo se encuentra fuertemente relacionado con la resistencia del suelo y el contenido de humedad. La resistencia al corte tangencial del suelo (fricción entre partículas) disminuye linealmente con el contenido de humedad (Rucks *et al.* 2004). Es así como en suelos con bajo contenido de humedad se requiere mayor potencia de los equipos de maquinaria agrícola para desestructurar al suelo, ya que se necesita un mayor estrés mecánico para separar las partículas del suelo (Fernández y Goñi 2010, Gómez *et al.* 2017). Asimismo, la resistencia a la penetración (compresión vertical), se encuentra fuertemente influida por el contenido de humedad del suelo, contenido de materia orgánica,

densidad aparente y textura del suelo. Esta suele aumentar con la densidad aparente y el contenido de arcillas y disminuir con el contenido de humedad y materia orgánica (Kuang *et al.* 2012). Valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa pueden reducir el crecimiento de las raíces de un cultivo, mientras que valores superiores a 2,1 MPa lo limitan considerablemente (Gómez-Calderón *et al.* 2018). Además de las condiciones del suelo que se relacionan con su deformación, Ten Damme *et al.* (2021) se refirieron al riesgo de deformación vertical al aumentar la fuerza de tracción del tractor y el número de pasadas. Estas personas autoras reportaron un aumento en la deformación vertical del suelo a profundidades entre 20 a 25 cm, y un daño horizontal entre 1,5 – 2 veces el ancho de la llanta cuando se utilizó un tractor con remolque cuyo peso estático total osciló entre 17 y 21 Mg.

Aparte de la configuración óptima de las cargas del tractor, es importante considerar la operación de la labranza bajo condiciones óptimas de contenido de humedad del suelo, en términos de friabilidad (Ashburner Sims 1984). En el estado friable, hay suficiente humedad entre las partículas del suelo para minimizar el efecto de deformación, sin que exista suficiente humedad para producir la cohesión que existe en el límite plástico, ya que cuando el estrés mecánico supera las fuerzas cohesivas el suelo, sufre deformación plástica sin recuperación elástica (Keller y Dexter 2012). Rucks *et al.* (2004) relacionaron los límites de consistencia de acuerdo con este tipo de suelo, en el cual indicaron que, a mayor contenido de arcilla mayor es el rango de consistencia y condición friable del mismo, y por lo tanto, el rango de humedad del suelo tiende a ser mayor para la mecanización. Por otra parte, el contenido de humedad óptimo para la labranza se considera menor al límite inferior plástico, LP (Kirchhof 2006), de 0,77 veces el LP para suelos franco arenosos (Bhushan y Ghildyal 1972), de 0,9 veces LP para la mayoría de tipos de suelos (Dexter y Bird 2001) y Keller y Dexter (2012) sugirieron utilizar un rango entre 0,7 – 0,9 veces LP.

La deformación del suelo produce cambios en su estabilidad estructural, reduce la porosidad, aumenta la cantidad de microporos y bloquea los espacios porosos llenos de aire (Ten Damme *et al.* 2021). Estos efectos se evidencian al tiempo de la mecanización. De acuerdo con Koola *et al.* (2019) se requieren entre 2 – 4 semanas para que el suelo se estabilice y se observen los efectos de la compactación del suelo. Por lo tanto, los efectos beneficiosos de la labranza sobre las propiedades hidráulicas pueden darse solo en el corto plazo; ya que estos efectos pueden no persistir con el tiempo. Por su parte, Haruna *et al.* (2018), observaron que la labranza aumentó el porcentaje de mesoporos gruesos en un 32%, lo que resultó en un aumento de más del 87% de la conductividad hidráulica saturada. Sin embargo, observaron que cuando el suelo se encontraba recién mecanizado, la densidad aparente tendía a disminuir y la conductividad hidráulica a aumentar, y después de 2-4 semanas (cuando el suelo se había estabilizado), a valores de densidad aparente mayores a  $1,06 \text{ g.cm}^{-3}$ , la densidad aparente tendía a aumentar, mientras que la conductividad hidráulica disminuía.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del balanceo de cargas en los ejes del tractor utilizado para la mecanización del suelo, y su impacto sobre las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de un suelo vertisol, a partir de 3 diferentes combinaciones de contrapesos en los ejes delantero y trasero del tractor, en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez. Además, se evaluó la relación entre las condiciones físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo en 3 etapas de muestreo con respecto a la labranza, y se estimó la eficiencia de los balanceos en función del consumo de combustible, potencia requerida del tractor, porcentaje de patinaje y coeficiente de fricción del suelo. Asimismo, se calculó el consumo teórico del recurso hídrico para el cultivo de pasto para cada tipo de balanceo, con el fin de recomendar el balanceo de cargas con mayores ventajas operativas y de conservación del suelo. La hipótesis de este estudio fue que el balanceo de cargas

40-60% sugerido para alargar la vida útil del tractor también es la distribución óptima de cargas para reducir el impacto sobre las propiedades del suelo y aumentar la eficiencia de operación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Ubicación y características del área de estudio.** El estudio se realizó en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (EEJN) ubicada a 10 kilómetros al sur del centro de Cañas, Guanacaste, en un suelo de orden vertisol

(Figura 1). El periodo del estudio comprendió del 28 de julio al 27 de septiembre del 2019. Esta zona corresponde al bosque seco tropical (bs T) según la clasificación Holdridge, cuenta con una temperatura promedio anual de 24°C, una precipitación media anual de 1800 mm y con 5 meses de periodo seco (Solano y Villalobos 2021). La pendiente del terreno en el que se realizaron los tratamientos de labranza es plana. Antes de realizar el estudio, el área se había mantenido bajo el cultivo de pasto (*Digitaria decumbens* Stent) y sin mecanizar por al menos 5 años.

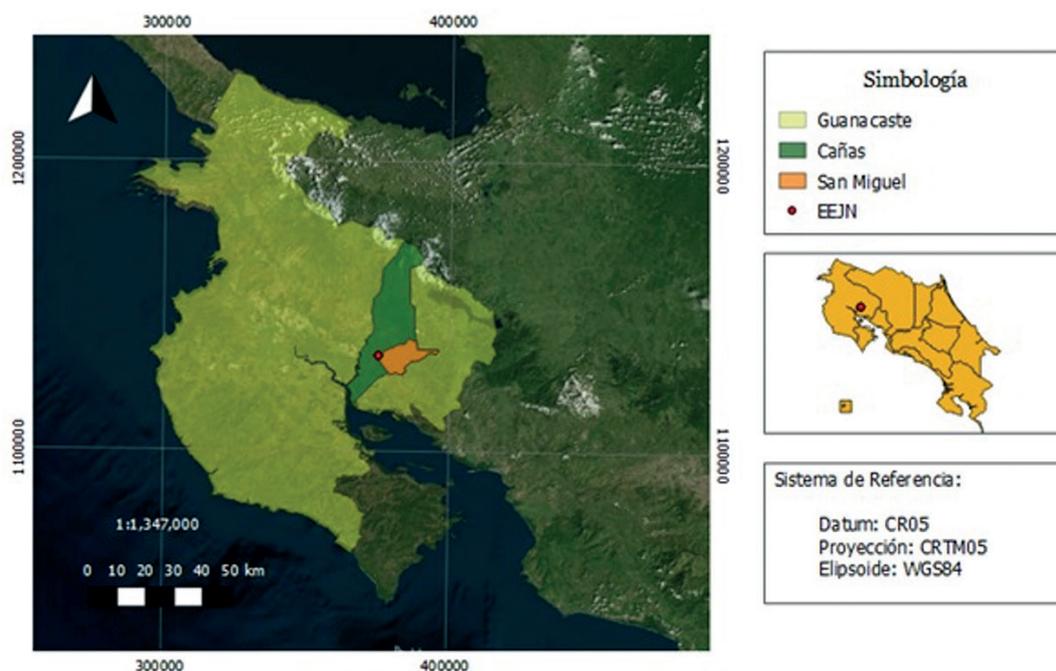


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (EEJN), en Cañas, Guanacaste.

**Diseño experimental.** Se establecieron 3 tipos de tratamientos en función de los balances de cargas de los ejes del tractor: 1) 40-60% con 40% del peso total del tractor que equivale a la carga del eje delantero y el 60% al eje trasero; 2) 50-50% con las cargas de los ejes distribuidas

uniformemente en ambos ejes; y 3) 30-70 con el 34% del peso total ubicado en el eje delantero y el 66% en el eje trasero del tractor. Adicionalmente, se plantearon 3 etapas de muestreo: A = antes de mecanizar, B = inmediatamente después de mecanizar y C = 2 meses después de mecanizar.

De esta manera, se combinaron los balances 40-60% (4060), 50-50% (5050), 30-70% (3070) y las frecuencias (B, C) para obtener los siguientes tratamientos: 4060-B, 4060-C, 5050-B, 5050-C, 3070-B, 3070-C.

La Figura 2 muestra el esquema del diseño experimental, en el cual el área de estudio fue de 3080 m<sup>2</sup>, dividida en 3 parcelas (una por cada tipo de balanceo), con dimensiones de 106 m x 8 m. Antes de la mecanización (A) se establecieron 3 puntos de muestreo (Figura 2a) distanciados aproximadamente a 35 metros entre sí. En cada punto de muestreo se tomaron 6 muestras de

suelo de las cuales 3 réplicas fueron disturbadas (obtenidas con barreno muestreador) y 3 no disturbadas. Después de la mecanización (B y C), se establecieron 9 puntos de muestreo a lo largo de cada parcela (Figura 2b), distanciados aproximadamente 11 m entre sí. En cada punto de muestreo se tomaron 2 muestras no disturbadas del suelo con cilindros de acero inoxidable de aproximadamente 100 cm<sup>3</sup>. Todos los muestreos se realizaron a 15 cm de profundidad, que para pastos esta es la profundidad media aproximada de absorción de agua durante época seca (Kulmatiski *et al.* 2020).

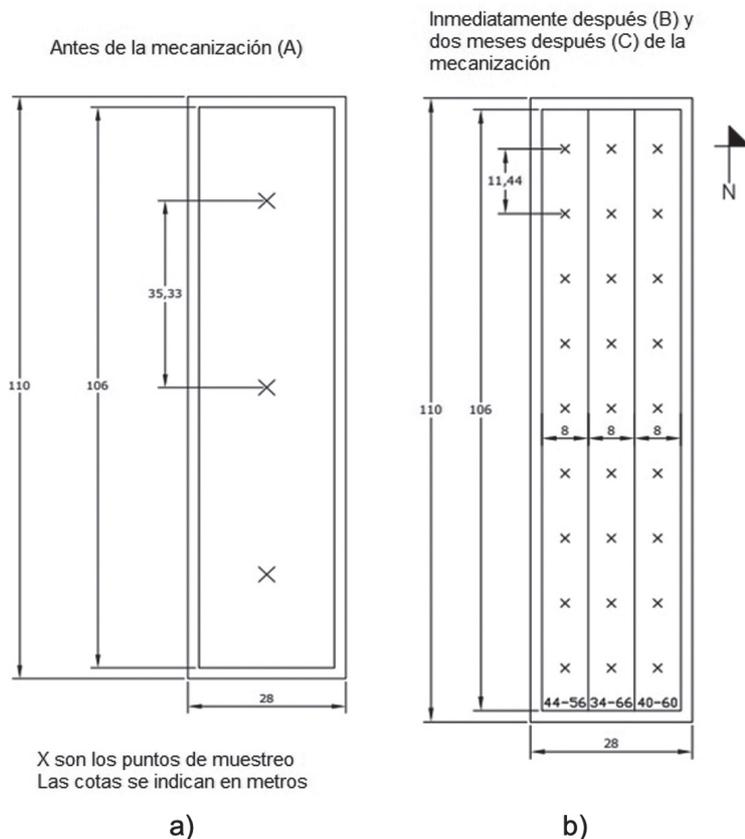


Figura 2. Esquema del diseño experimental y distribución de los puntos de muestreo: a) antes de la mecanización (A), b) después de la mecanización (B, C).

Se utilizó un tractor SL 150, con 114 kW de potencia bruta, con la tracción integral activada en todas las labores de balanceo, e hidroinflado al 100% en los neumáticos traseros convencionales de tamaño 16,9R30. Se acopló una rastra de 3,39 m de ancho de trabajo y 3,40 m de largo, con 28 discos de 0,55 m de diámetro, con un espaciamiento entre discos de 0,27 m y una profundidad de labranza teórica de 20 – 30 cm.

#### **Análisis de variables físicas del suelo.**

La textura del suelo se determinó por el método del hidrómetro de Bouyoucos (Medina González *et al.* 2007). La materia orgánica se removió previo al análisis de textura (Zimmermann y Horn 2020). La clasificación del suelo arcilloso se caracterizó por 20,5% arena (63 - 200  $\mu\text{m}$ ), 37,5% limo (2 – 63  $\mu\text{m}$ ) y 42% arcilla (< 2  $\mu\text{m}$ ) de acuerdo con la guía textural de la FAO (2015). El Índice de Plasticidad (IP) se obtuvo en el laboratorio a partir del cálculo de los Límites Atterberg, de acuerdo con la norma ASTM D424-59. La densidad aparente se obtuvo de dividir el peso seco del suelo (después de 105°C) entre el volumen de la muestra no disturbada. La porosidad (Blume *et al.* 2010) se calculó a partir del valor de la densidad aparente y la densidad real, asumiendo para esta última un valor de 2,65 g.cm<sup>3</sup> (USDA 2001).

**Medición del contenido de humedad del suelo a diferentes potenciales mátricos.** Las muestras no disturbadas se saturaron por ascenso capilar por 24 h y luego se drenaron a un potencial mátrico de –33 kPa correspondiente a capacidad de campo en una olla de presión de Richards de 5 bar. El peso gravimétrico de las muestras se obtuvo del peso húmedo de las muestras después de alcanzar el equilibrio al potencial mátrico configurado y del peso seco después del secado en el horno a 105°C por 16 h. Para obtener el contenido de humedad gravimétrico al potencial mátrico de –1500 kPa (punto de marchitez permanente), se prepararon muestras disturbadas saturadas en duplicado en anillos de 1 cm de altura, y se drenaron por 4 semanas en ollas presión de Richards de 15 bar. Luego se secaron las muestras a 105°C por 16 h. El agua

útil se calculó como la diferencia entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). El contenido de humedad volumétrica se obtuvo de multiplicar el contenido de humedad gravimétrica por la densidad aparente (USDA 2001).

**Medición de las propiedades hidráulicas y mecánicas del suelo.** La conductividad hidráulica ( $K$ ) se determinó por medio del método de columna constante, de acuerdo con la fórmula de Darcy (Soil Survey Staff 2018), como se muestra en la Ecuación 1.

#### **Ecuación 1**

$$K = (Q * L) / A * \Delta H$$

Donde

A = área de la sección transversal del cilindro (cm<sup>2</sup>)

L = altura del cilindro que contiene la columna de suelo (cm)

$\Delta H$  = carga total de agua (cm)

Q = caudal de agua (cm<sup>3</sup>/min)

La infiltración se determinó, en triplicado en cada punto de muestreo, mediante un minidisco infiltrómetro modelo S de la marca METER (Pullman, USA), a una succión de 3 cm-H<sub>2</sub>O = 3 hPa. La infiltración base se obtuvo por medio de la fórmula de Kostiakov. (Baver *et al.* 1972). La resistencia a la penetración (RP) se determinó con un Penetrologger marca Eijkelkamp (Giesbeek, The Netherlands), hasta una profundidad de 80 cm. La resistencia al corte (RC) se determinó a 15 cm de profundidad, por el método de veleta, de la marca Eijkelkamp (Giesbeek, The Netherlands). Se utilizó una veleta de 16 x 32 mm de la marca Eijkelkamp (Giesbeek, The Netherlands).

**Determinación de los parámetros de eficiencia de la labranza.** El porcentaje de patinaje se midió durante la mecanización para cada uno de los balanceos (4060, 3070, 5050), de acuerdo con el procedimiento descrito en la Figura 3. El patinaje se midió en 3 pasadas de tractor (es decir, 3 repeticiones) por cada tratamiento establecido y se calculó el patinaje tanto para las

llantas traseras como delanteras del tractor. El recorrido de la llanta se calculó como lo indica la Ecuación 2 (Gómez *et al.* 2016).

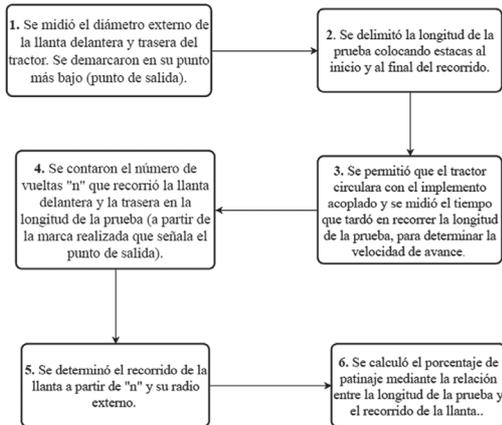


Figura 3. Procedimiento utilizado para cuantificar el porcentaje de patinaje durante la labranza.

### Ecuación 2

$$R = 2\pi r * n$$

Donde

R = recorrido de la llanta (m)

r = radio externo de la llanta (m)

n = número de vueltas dada por llanta

El porcentaje de patinaje se obtuvo con la

### Ecuación 3

$$\%Patinaje = 100 * \left(1 - \frac{L}{R}\right)$$

Donde

L = distancia del recorrido entre estacas (m)

El consumo de combustible de 14,7 L.h<sup>-1</sup> se obtuvo de los registros disponibles de la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (EEJN). A partir de la velocidad de avance del tractor (V) de cada tratamiento y del ancho de trabajo de la rastra de discos, se determinó la

cobertura del área (ha) trabajada en el tiempo (h) (V<sub>labranza</sub>), según la Ecuación 4 (Gómez *et al.* 2017).

### Ecuación 4

$$V_{labranza} = \frac{(V * W) * 3600}{10000}$$

Donde

V<sub>labranza</sub> = velocidad de laboreo (ha.h<sup>-1</sup>)

V = velocidad de avance del tractor (m.s<sup>-1</sup>)

W = ancho de trabajo de la rastra (m)

La profundidad de labranza fue medida directamente en el campo al momento de mecanizar el suelo. El procedimiento consistió en introducir una varilla en el perfil del suelo hasta encontrar el piso de arado y posteriormente se midió con una cinta métrica la longitud del trozo de varilla que penetró.

El coeficiente de fricción (μ) se calculó a partir de la relación entre la fuerza de corte o fricción (F<sub>corte</sub>) — Ecuación 5 — y la fuerza normal producto del peso total del tractor (N) (Beer *et al.* 2009) mediante la Ecuación 6.

### Ecuación 5

$$F_{corte} = RC * A_{corte}$$

### Ecuación 6

$$\mu = \frac{F_{corte}}{N}$$

Donde

Rc = resistencia al corte (N/m<sup>2</sup>)

A<sub>corte</sub> = área de corte (m<sup>2</sup>) la cual está en función de la profundidad de corte y el ancho de trabajo de la rastra.

La potencia requerida del tractor (P) se estimó con la Ecuación 7, a partir de de cada uno de los tratamientos y la velocidad de avance del tractor (Beer *et al.* 2009).

### Ecuación 7

$$P = F_{corte} * V$$

**Análisis estadístico de los datos.** El efecto de los balanceos de cargas del tractor, sobre las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo, se analizó por medio del análisis de varianza (ANDEVA) y las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos y etapas de muestreo se obtuvieron mediante la prueba HSD Tukey. Se correlacionaron las variables para establecer la dependencia entre ellas, y se asume que un valor cercano a 1 indica una gran dependencia de la variable dependiente con la independiente. Los análisis estadísticos se realizaron mediante el programa R, versión 3.6.1. (R Core Team 2022).

## RESULTADOS

**Efecto de los balanceos de las cargas del tractor sobre las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo.** En la Tabla 1 se muestra el efecto de los diferentes balanceos de cargas del tractor (4060, 5050, 3070) sobre las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de un suelo vertisol, durante 3 diferentes periodos de muestreo, antes de mecanizar (A), inmediatamente (B) y 2 meses después (C) de la mecanización. Se observa que la densidad aparente (Da) no presenta cambios significativos entre los tratamientos, para las etapas B y C, con respecto a la etapa A. Sin embargo, se observa un aumento significativo de Da en el tratamiento 4060-B de 20,3% y 15,5% con respecto a 3070-B y 5050-B, respectivamente. En la etapa C, la Da tiende a disminuir en 4060-C mientras que en 5050-C y 3070-C aumenta levemente, por lo que no se observan diferencias significativas entre los tratamientos 2 meses después de mecanizar.

Tabla 1. Efecto de los balanceos, 4060, 5050 y 3070 en 3 etapas de muestreo, antes de mecanizar (A), inmediatamente (B) y 2 meses después (C) de la mecanización, sobre las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de un suelo vertisol a 15 cm de profundidad.

Tratamiento	Densidad aparente, Da	Porosidad Total, PT	Capacidad de Campo, CC	Conductividad Hidráulica, K	Infiltración Base, Ib	Resistencia al Corte, RC	
	g cm <sup>-3</sup>	%	g.g <sup>-1</sup>	cm.día <sup>-1</sup>	m. h <sup>-1</sup>	kPa	
4060	A	1,15 ± 0,06 <sup>ab</sup>	56,4 ± 2,1 <sup>ac</sup>	32,5 ± 0,3 <sup>ab</sup>	160,8 ± 19,1 <sup>a</sup>	*	52,0 <sup>a</sup>
	B	1,27 ± 0,07 <sup>b</sup>	52,6 ± 3,1 <sup>a</sup>	32,4 ± 1,9 <sup>a</sup>	66,2 ± 7,1 <sup>b</sup>	423,9 ± 38,4 <sup>a</sup>	151,1 ± 23,6 <sup>b</sup>
	C	1,19 ± 0,05 <sup>bc</sup>	54,3 ± 3,3 <sup>ab</sup>	33,6 ± 1,5 <sup>ab</sup>	59,5 ± 5,1 <sup>bc</sup>	94,3 ± 13,9 <sup>b</sup>	202,2 ± 29,0 <sup>c</sup>
5050	B	1,10 ± 0,02 <sup>ac</sup>	57,5 ± 2,1 <sup>bc</sup>	34,0 ± 1,5 <sup>ab</sup>	116,4 ± 11,4 <sup>d</sup>	384,6 ± 52,3 <sup>a</sup>	172,4 ± 23,6 <sup>bd</sup>
	C	1,14 ± 0,03 <sup>ab</sup>	56,3 ± 3,2 <sup>ac</sup>	35,1 ± 1,7 <sup>bc</sup>	74,5 ± 19,3 <sup>b</sup>	109,3 ± 15,6 <sup>b</sup>	173,3 ± 20,5 <sup>bd</sup>
3070	B	1,06 ± 0,08 <sup>a</sup>	60,1 ± 3,1 <sup>c</sup>	32,7 ± 1,4 <sup>a</sup>	63,1 ± 5,5 <sup>bc</sup>	210,8 ± 5,0 <sup>c</sup>	155,1 ± 16,5 <sup>b</sup>
	C	1,17 ± 0,08 <sup>bc</sup>	55,8 ± 3,2 <sup>ab</sup>	36,6 ± 1,9 <sup>c</sup>	35,5 ± 11,9 <sup>e</sup>	72,8 ± 12,6 <sup>b</sup>	172,4 ± 27,2 <sup>bd</sup>

Letras distintas entre tratamientos, para una misma variable, indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Se muestran los datos con los promedios y su respectiva desviación estándar; \*Ib: se utilizó el valor en la etapa B como valor de referencia; el punto de marchitez permanente (PMP) fue de  $30,89 \pm 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

La porosidad total (PT), al estar fuertemente asociada a la  $D_a$ , mostró la misma tendencia. El tratamiento 4060-B presenta una PT significativamente menor a los tratamientos 5050-B y 3070-B. Sin embargo, 2 meses después (etapa C), no existen diferencias significativas entre ellos.

En la etapa B no se observan diferencias significativas, en la capacidad de campo (CC), de los tratamientos con respecto a la etapa A (antes de mecanizar). Contrariamente, en la etapa C se observa una leve tendencia (no significativa) de los tratamientos 4060-C y 5050-C, excepto 3070-C donde se denota un aumento significativo de CC del 12,5%, con respecto a la etapa A de muestreo y 9% con respecto a 4060-C.

En todos los tratamientos y en las etapas B y C, la conductividad hidráulica saturada (K) disminuyó significativamente con respecto a la etapa A. Asimismo, se observa que el tratamiento 5050 presenta la mayor K para las etapas de muestreo B y C, teniendo menor K, en todas las etapas, el tratamiento 3070.

Para todos los tratamientos, la infiltración base (Ib) disminuyó significativamente de la etapa B a la etapa C y evidencia que el tratamiento 3070 fue el de menor infiltración base y a la vez el menor decrecimiento en el tiempo. Los tratamientos 4060-C, 5050-C y 3070-C disminuyeron 78%, 71,5% y 65%, respectivamente con respecto a su tratamiento homólogo en la etapa B.

Después de la labranza (etapas B y C), todos los tratamientos tuvieron un aumento significativo de la resistencia al corte (RC) con respecto la etapa antes de la labranza (A). En la etapa B, todos los tratamientos muestran un aumento similar, donde ligeramente fue mayor la RC para el tratamiento 5050-B. Sin embargo, en la etapa C, el tratamiento 4060-C presenta una RC significativamente mayor a su homólogo de 33% en la etapa B, así como una diferencia del 17% con respecto a los tratamientos 5050-C y 3070-C.

Adicional a los valores mostrados en la Tabla 1, se determinaron los valores de plasticidad

del suelo en la etapa antes de mecanizar A, mostraron contenidos de humedad ( $g \cdot g^{-1}$ ) para el límite inferior plástico (LP) de  $39,50 \pm 1,36$ ; límite superior plástico (LL) de  $57,83 \pm 1,27$  y un índice de plasticidad (IP) de 18,33. Asimismo, se determinó el contenido de humedad inicial para la mecanización de  $39,19 \pm 0,79$  ( $g \cdot g^{-1}$ ).

La Figura 4 muestra la resistencia a la penetración (RP) obtenida en el perfil del suelo hasta 80 cm de profundidad durante las etapas de muestreo A, B y C. En todos los tratamientos se observa un rápido aumento de la resistencia a la penetración (RP) cerca de la superficie en los primeros 15 cm, sin embargo, a mayores profundidades tiende a estabilizarse en la etapa B en un valor cercano a 1,5 MPa, y en la etapa C tiende a aumentar a valores cercanos a 2,0 MPa.

En la etapa antes de la mecanización (A), la cual se observa como una línea negra continua, se alcanza una RP de 1,5 MPa a una profundidad de 24 cm, considerado como el inicio del pie de arado. En la Figura 4a, no se observan diferencias significativas de RP en la profundidad con respecto a los tratamientos, sin embargo, es posible observar una tendencia leve a aumentar RP hacia la superficie. Se observa que en la etapa inmediatamente después de mecanizar (B), en los tratamientos 4060-B y 5050-B la profundidad que alcanzó el valor de 1,5 MPa se reduce a 16 cm, mientras que para 3070-B dicha profundidad decreció ligeramente a 22 cm (con respecto a la etapa A).

En la Figura 4b se observa que 2 meses después de la mecanización (etapa C), el tratamiento 5050-C alcanzó el límite de 1,5 MPa a 15 cm de profundidad, mientras que el tratamiento 4060-C lo hizo a 18 cm. Se destaca el aumento a 28 cm de profundidad en el tratamiento 3070-C. Se nota además que, a pesar de que en la etapa C los tratamientos aumentaron la profundidad del piso de arado (excepto 5050-C), la RP no logró restablecerse por debajo del límite de 1,5 MPa, a medida que avanzaba en la profundidad del perfil del suelo. Caso contrario sucedió en la etapa inmediatamente después de mecanizar (B), donde luego de llegar al límite de crecimiento

radicular (1,5 MP), la RP en los tratamientos 4060-B y 3070-B, decreció conforme avanzaba en profundidad. A pesar de que, entre los tratamientos no se observan diferencias, a

profundidades mayores a 30 cm, si se observan diferencias con respecto a la condición de la etapa A (antes de la mecanización).

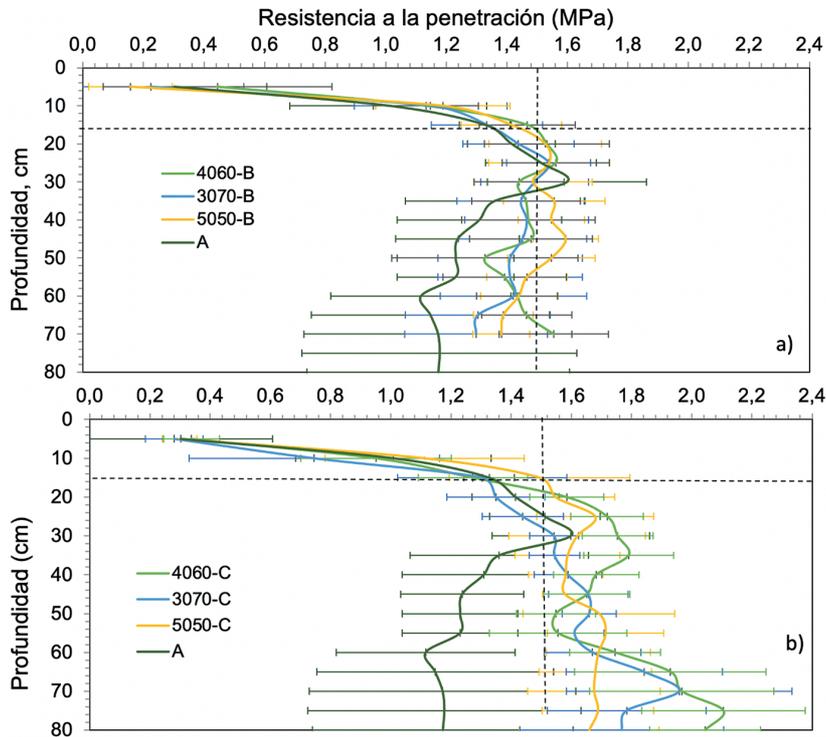


Figura 4. Resistencia a la penetración para los tratamientos 6040, 5050 y 3070; durante las etapas a) antes de la mecanización (A) e inmediatamente después (B); y b) antes de la mecanización (A) y 2 meses después de la mecanización (C). El cruce entre líneas discontinuas corresponde al punto donde se encuentra el pie de arado en la etapa A.

**Efecto de los balanceos de las cargas del tractor sobre los parámetros de eficiencia de labranza.** La velocidad de operación del tractor depende del balance de las cargas del tractor, en la Tabla 2 se muestran las velocidades de avance por área y la profundidad de labranza promedio lograda para cada tratamiento durante la mecanización. El peso total del tractor en el tratamiento 4060 permitió profundizar el perfil del suelo 18 cm, por ende, su velocidad de avance fue menor

y el volumen de suelo alterado mayor. En el tratamiento 3070 se alcanzó la velocidad de avance más elevada y la rastra de discos utilizada logró penetrar 15 cm. El balanceo de cargas 5050, a pesar de presentar una velocidad prácticamente igual al tratamiento 4060, logró profundizar únicamente 10 cm, es decir, que el peso total del tractor en este tratamiento no fue suficiente para mostrar el impacto de la mecanización en las muestras obtenidas. Ninguno de los tratamientos

alcanzó la profundidad teórica de trabajo de la rastra utilizada (entre 20-30 cm), sin que hubiese diferencias significativas entre 4060 y 3070 que alcanzaron mayor profundidad de trabajo que el tratamiento 5050.

Tabla 2. Velocidad de avance y profundidad de labranza para cada tratamiento al momento de la mecanización.

Tratamiento	Velocidad de avance por área ha.h <sup>-1</sup>	Profundidad de labranza cm
4060	1,14 ± 0,0070	18,00 ± 2,37 <sup>a</sup>
3070	1,29 ± 0,0070	15,50 ± 2,48 <sup>a</sup>
5050	1,18 ± 0,0005	10,83 ± 2,74 <sup>b</sup>

Letras distintas entre tratamientos, para una misma variable, indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

La Figura 5 muestra el porcentaje de patinaje de las llantas de los ejes delantero y trasero para cada tratamiento. Se observó que, en promedio para todos los tratamientos, las llantas delanteras patinaron un 45% más que las llantas traseras. Se puede notar que el patinaje tanto para las llantas traseras como delanteras fue significativamente menor en el tratamiento 3070. En ninguno de los tratamientos se excedió el porcentaje de patinaje mecánicamente permitido por los fabricantes.

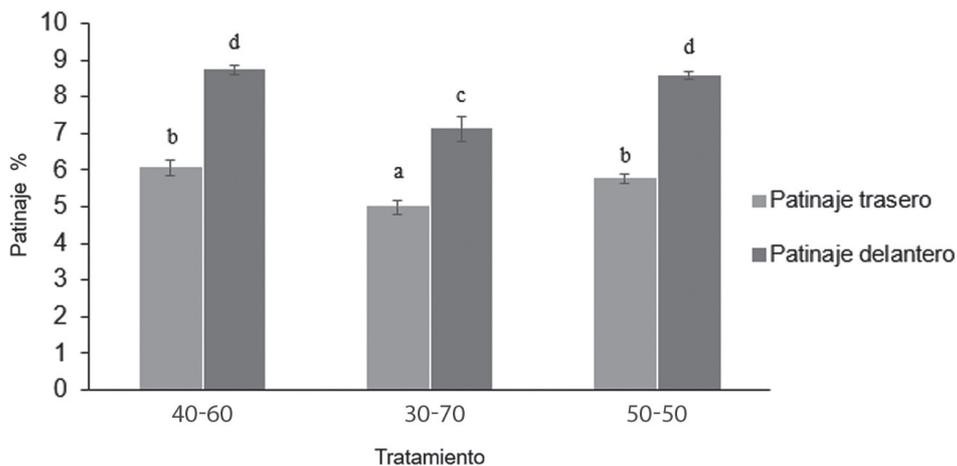


Figura 5. Patinaje de las llantas traseras y delanteras para los tratamientos 4060, 5050, 3070 durante la mecanización. Los tratamientos con letras diferentes indican que son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

La Tabla 3 muestra parámetros relacionados con el consumo de combustible. Se observó que conforme aumentó la velocidad de laboreo disminuyó el consumo de combustible. El balanceo 4060 consumió 3,6% más combustible que 5050, y el tratamiento 3070 fue el que consumió

menos cantidad de combustible por hectárea. A pesar de que 5050 consumió más combustible que 3070, la profundidad de labranza fue menor.

La Tabla 4 muestra los coeficientes de fricción ( $\mu$ ) y potencia requerida (P), calculados a partir de parámetros medidos, para los 3

Tabla 3. Parámetros relacionados al consumo de combustible para los tratamientos 4060, 5050 y 3070 durante la labranza.

Tratamiento	Velocidad de laboreo ha.h <sup>-1</sup>	Consumo de combustible L.ha <sup>-1</sup>	Profundidad de labranza cm
4060	1,14 ± 0,007 <sup>a</sup>	12,93 ± 0,040 <sup>a</sup>	18,00 ± 2,37 <sup>a</sup>
3070	1,29 ± 0,007 <sup>b</sup>	11,4 ± 0,060 <sup>b</sup>	15,50 ± 2,48 <sup>a</sup>
5050	1,18 ± 0,0005 <sup>a</sup>	12,48 ± 0,005 <sup>c</sup>	10,83 ± 2,74 <sup>b</sup>

Letras distintas entre tratamientos, para una misma variable, indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Se muestran los datos con los promedios y su respectiva desviación estándar.

Tabla 4. Coeficiente de fricción del suelo y potencia requerida teóricos para los tratamientos 4060, 5050, 3070 durante las etapas inmediatamente (B) y 2 meses (C) después de la mecanización.

Etapa de mecanización	Tratamiento	Coeficiente de fricción	Potencia requerida del tractor
		$\mu$	kW
B	4060	1,34 <sup>a</sup>	71,57 <sup>a</sup>
	3070	1,18 <sup>b</sup>	83,36 <sup>b</sup>
	5050	1,51 <sup>c</sup>	84,63 <sup>b</sup>
C	4060	1,79 <sup>d</sup>	95,78 <sup>c</sup>
	3070	1,31 <sup>a</sup>	92,68 <sup>c</sup>
	5050	1,51 <sup>c</sup>	85,06 <sup>b</sup>

Letras distintas entre tratamientos, para una misma variable, indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Tabla 5. Requerimiento hídrico para los tratamientos 4060, 5050 y 3070 en las etapas inmediatamente (B) y 2 meses después (C) de la mecanización.

Etapa de mecanización	Tratamiento	Agua útil	Consumo teórico de agua anual	Cantidad de riegos por año
		g/g	mm	
B	4060	6,42 <sup>a</sup>	2091	30
	3070	6,68 <sup>a</sup>	2091	36
	5050	8,22 <sup>ab</sup>	2114	28
C	4060	7,69 <sup>ab</sup>	2114	28
	3070	11,24 <sup>c</sup>	2097	19
	5050	9,53 <sup>bc</sup>	2137	23

tratamientos y 2 etapas de muestreo correspondientes al momento inmediatamente (B) y 2 meses después de la mecanización (C). Se observa que en la etapa C, aumenta, excepto en 5050. Además, se presentó una relación positiva entre el comportamiento de  $\mu$  y P.

A partir de los datos de infiltración base, la Tabla 5 muestra la lámina bruta (mm) en términos de consumo teórico de agua anual, el contenido de humedad disponible para las plantas ( $\text{g.g}^{-1}$ ) y el número de veces (de acuerdo con la frecuencia de riego) que se debe regar al año

para cada tratamiento. Para ambas etapas B y C, el balanceo 3070 fue el que presentó el menor consumo anual de agua por hectárea mecanizada, mientras que 5050-C registró los valores más elevados. En la etapa C, el tratamiento 5050-C consumió 1,10 y 1,2% más agua que 4060-C y 3070-C, respectivamente. Asimismo, 5050-C requirió más veces de riego durante esta etapa.

La Tabla 6 muestra la correlación entre variables físicas tales como densidad aparente y porosidad e hidráulicas como contenido de humedad y conductividad hidráulica, mecánicas como resistencia a la penetración y resistencia al corte y de operación como profundidad de

labranza, patinaje, consumo de combustible y fricción. Se observó una relación altamente positiva entre densidad aparente y las propiedades mecánicas del suelo y de operación. Por su parte las propiedades hidráulicas, muestran en general, una moderada relación negativa con las propiedades mecánicas del suelo y principalmente el contenido de humedad muestra una alta correlación positiva con las variables de operación. Asimismo, las variables mecánicas mantuvieron una alta correlación negativa con la profundidad de labranza y positiva con el patinaje, consumo de combustible y coeficiente de fricción.

Tabla 6. Correlaciones obtenidas entre las variables de suelo y rendimiento operativo del tractor utilizado en la labranza.

Variable*	Da	PT	CH	Ks	RP	RC	PL	PDel	PTras	Comb	$\mu$
Da	1	-0,9768	0,2161	-0,8799	0,8482	0,8286	0,6282	0,7230	0,8368	0,8453	0,2387
PT	-0,9768	1	-0,1684	0,6937	-0,7589	-0,6362	-0,5005	-0,8209	-0,9113	-0,9176	-0,4302
CH	0,2161	-0,1684	1	0,3197	-0,4856	-0,6076	0,7103	0,9200	0,9760	0,9793	-0,1842
Ks	-0,8799	0,6937	0,3197	1	-0,8070	-0,7785	-0,9211	0,4649	0,2957	0,2806	0,2247
RP	0,8482	-0,7589	-0,4856	-0,8070	1	*	-0,7924	0,9863	0,9402	0,9351	0,7948
RC	0,8286	-0,6362	-0,6076	-0,7785	*	1	-0,9853	0,8205	0,9035	0,8997	0,8890
PL	0,6282	-0,5005	0,7103	-0,9211	-0,7924	-0,9853	1	-0,0834	0,0996	0,1153	-0,6459
PDel	0,7230	-0,8209	0,9200	0,4649	0,9863	0,8205	-0,0834	1	0,9833	0,9833	0,8138
PTras	0,8368	-0,9113	0,9760	0,2957	0,9402	0,9035	0,0996	0,9833	1	0,9999	0,6953
Comb	0,8453	-0,9176	0,9793	0,2806	0,9351	0,8997	0,1153	0,9833	0,9999	1	0,6845
$\mu$	0,2387	-0,4302	-0,1842	0,2247	0,7948	0,8890	-0,6459	0,8138	0,6953	0,6845	1

Da = densidad aparente; PT = porosidad del suelo; CH = contenido de humedad del suelo; Ks = conductividad hidráulica del suelo; RP = resistencia a la penetración del suelo; RC = resistencia al corte del suelo; PL = profundidad de labranza; PDel = patinaje del eje delantero del tractor; PTras = patinaje del eje trasero del tractor; Comb = consumo de combustible; y  $\mu$  = coeficiente de fricción calculado. El \* indica la ausencia del dato.

## DISCUSIÓN

**Efecto de los balanceos de las cargas del tractor sobre las propiedades físicas e hidráulicas del suelo.** De acuerdo con los datos observados, el alto contenido de humedad de los límites inferior y superior obtenidos, se

encuentran altamente relacionados con el alto contenido de arcilla, según lo demostrado por estudios previos como el de Keller y Dexter (2012). Sin embargo, el suelo vertisol contaba con un índice de mediana plasticidad (FAO 2008), lo que le permite sufrir deformación sin ser elástico en un rango mayor de humedad (Munkholm *et al.*

2012). Adicionalmente, el contenido de humedad al momento de la labranza fue menor al límite plástico inferior (LP), aunque estuvo dentro de contenido óptimo de labranza, en concordancia con Kirchof (2006).

La labranza provocó deformación del suelo en diferentes magnitudes, lo cual estuvo en función del tratamiento aplicado y el tiempo de muestreo. Los cambios en densidad aparente ( $D_a$ ), principalmente, leves aumentos en la etapa C (2 meses después de la mecanización) en los tratamientos 4060 y 3070, no llegaron a valores de restricción de crecimiento radicular (USDA 2001), pero fueron mayores al valor óptimo para suelos arcillosos. El aumento en  $D_a$  se puede deber principalmente, a la magnitud de cargas ejercida sobre el suelo. El tratamiento más favorable para  $D_a$  fue el 5050 en todos los tiempos de muestreo, sin embargo, este tratamiento apenas logró una profundidad de labranza de 15 cm. Si se relacionan la densidad aparente con la compactación, estos resultados concuerdan con Arvidsson (2001) y Horton *et al.* (2016), los cuales argumentaron que la compactación del suelo aumenta conforme aumenta la presión del tractor sobre el suelo. El aumento de  $D_a$  sin haber alcanzado los límites de restricción del crecimiento radicular, se pudo deber a que, en ninguno de los 3 balances estudiados, el peso de cada eje del tractor sobrepasó los 49 kN, el cual es el peso límite teórico considerado para provocar compactación subsuperficial (Gómez *et al.* 2016).

El balanceo de cargas no mostró diferencias significativas en el contenido de humedad a capacidad de campo (CC), a excepción del tratamiento 3070 en la etapa C (2 meses después de la mecanización) donde se obtuvo la mayor CC. Sin embargo, se destaca, el leve aumento de CC en el tiempo para todos los tratamientos, lo que concuerda con Alam *et al.* (2014), donde observaron un incremento considerable de CC conforme pasó el tiempo. La CC se encuentra fuertemente relacionada con la cantidad y diámetro de los poros en el suelo (Hartge y Horn 2016). Los poros capilares son los encargados de retener el agua disponible para las plantas,

con diámetros entre 50 a 10  $\mu\text{m}$  (Hartge y Horn 2016), y por eso se les atribuyen los valores más típicos de CC (González-Cervantes *et al.* 2012). Por lo tanto, el balanceo 3070 pudo conservar o permitir la formación de una mayor cantidad de poros capilares hasta la etapa C.

La conductividad hidráulica ( $K_s$ ) fue mayor para el tratamiento 5050 y se comportó de forma muy similar en los tratamientos 4060 y 3070, clasificándose como alta y moderadamente alta, respectivamente, de acuerdo con Soil Survey Staff (2018). Esta clasificación de  $K_s$  para el suelo arcilloso de orden vertisol en la zona de estudio, se debe a la presencia de arcillas expandibles de tipo 2:1 que se agrietan con bajos contenidos de humedad y se ensanchan conforme la humedad del suelo aumenta (INTA 2015), es así como, estos cambios estructurales alteran la distribución de los poros y la función de estos en el movimiento del agua (Villagra-Mendoza y Horn 2018). Sin embargo, en todos los tratamientos se observó un decrecimiento de  $K_s$  entre las etapas de muestreo B y C (inmediatamente y 2 meses después de la mecanización). Estos cambios en  $K_s$  con respecto al tiempo se deben a la obstrucción de los poros grandes conductores de agua, los cuales forman cuellos de botella (Villagra-Mendoza y Horn 2018). Por otro lado, la mayor  $K_s$  en el tratamiento 5050 con respecto a los otros tratamientos, se pudo deber a una mayor presencia de macroporos, lo que facilita las interconexiones para un adecuado movimiento del agua a través del perfil (Fasinmirin 2017, Gómez-Calderón *et al.* 2018, Veiga *et al.* 2008), producto de una menor carga del tractor sobre el suelo, con respecto a 4060 y 3070.

La infiltración base no fue un indicador que permitiera relacionar el efecto del balanceo de cargas en el tractor sobre el suelo en estudio (orden vertisol), ya que los valores obtenidos variaron entre tratamientos sin poder encontrar una relación definida. Por el contrario, la variación se pudo deber a la existencia de grietas, producto del tipo de arcillas expandibles tipo 2:1 (INTA 2015), lo cual ocasionó una heterogeneidad de condiciones al momento de realizar

las pruebas de infiltración, independientemente del tipo de balanceo empleado. Amancha (2015) mencionó que las grietas en el suelo incrementan considerablemente los valores de infiltración base, ya que son contracciones del suelo producto de un periodo de desecamiento (Horton *et al.* 2016).

**Efecto de los balanceos de las cargas del tractor sobre las propiedades mecánicas del suelo.** De acuerdo con la Tabla 6, los valores de resistencia a la penetración (RP) y resistencia al corte (RC) mostraron una alta correlación positiva con las variables de operación producto de la labranza y la densidad aparente. Además, la profundidad de labranza se ve afectada en forma inversa por la resistencia que ejerce el suelo durante la labranza y al contenido de humedad del suelo.

La naturaleza arcillosa del suelo, y el hecho de no haber sido mecanizado anteriormente, influyeron en la alta resistencia al corte. Al respecto Horton *et al.* (2016) y Rucks *et al.* (2004) establecieron que cuando el suelo no ha sido sometido a un estrés mecánico, su estructura está bien definida y sus agregados se encuentran más unidos, puesto que no se ha desestabilizado la forma en cómo se arreglan las partículas del suelo. Los discos poco afilados de la rastra provocaron un mayor contacto o roce con la superficie, lo cual condujo a una disminución en RC y RP, además de una menor pulverización de los agregados (Stone y Gulvin 1987). Esto se evidenció en la profundidad de labranza, ya que según Alvarado (2011) una rastra de discos con 0,55 m de diámetro, debería alcanzar una profundidad de trabajo entre 20 - 30 cm, la cual no fue lograda por ninguno de los tratamientos excepto por los valores máximos medidos para el 3070.

En cuanto al piso de arado, las mediciones de RP mostraron una profundidad inicial de 22 cm, la cual disminuyó con los tratamientos 5050 y 4060 y se mantuvo muy cercano a la condición inicial con el tratamiento 3070. Sin embargo, todos los tratamientos mostraron moderadas a severas restricciones para el crecimiento radicular a profundidades mayores a los 15 cm (Zerpa

*et al.* 2013). Fue notable observar, que en la etapa de muestreo C, todos los tratamientos mostraron limitaciones en el crecimiento de las raíces, al estar cercanos al valor de 2,0 MPa en el perfil del suelo, a partir de los 60 cm.

Por otro lado, los valores de RC y RP se encuentran fuertemente relacionados con el patinaje de las llantas del tractor, lo cual concuerda con lo establecido por Battiato *et al.* (2015). Estas mismas personas autoras determinaron una relación directamente proporcional entre RC y RP con el porcentaje de patinaje, debido al debilitamiento de la capa superficial del suelo producto del contacto excesivo de las llantas con la superficie y a la presencia de pedrs de mayor tamaño (mayor patinaje) que incrementan la resistencia del suelo.

De acuerdo con Abrol y Sharma (2012) esta presión del contacto rueda/suelo es directamente proporcional al porcentaje de patinaje en los primeros centímetros de profundidad, donde estableció que un 15 - 25% de patinaje puede provocar un incremento en RP de hasta 2 MPa. Lo investigado difiere de estos resultados, ya que el patinaje en todos los tratamientos no superó el 10% y aun bajo estas condiciones, todos los tratamientos mostraron valores cercanos a 2,0 MPa en la etapa C de muestreo, a mayores profundidades en el perfil.

**Efecto de los balanceos de las cargas y contrapesos del tractor sobre los parámetros de eficiencia de trabajo de la maquinaria utilizada en los tratamientos de labranza.** Como se observó en la Tabla 6, existió alta relación entre la eficiencia de la operación y las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo.

Los valores más bajos de velocidad de avance del tractor se relacionaron con una mayor profundidad de labranza y por lo tanto el volumen de suelo alterado, lo cual concuerda con los resultados registrados por Moitzi *et al.* (2006, 2014). En este estudio el tratamiento 4060 trabajo con una menor velocidad y logró una profundidad de labranza promedio mayor.

Adicionalmente, el peso agregado a los ejes del tractor influyó en la tracción de las

llantas. Mamkagh (2019a) estableció que los contrapesos contribuyen a disminuir el porcentaje de patinaje de las llantas y aumentan la productividad de la labranza. Determinó que una adición de 5,1 kN, en el inflado de las llantas, provocaba una disminución en el porcentaje de patinaje del 3,3%. Sin embargo, los resultados obtenidos difieren con los datos presentados por Mamkagh (2019a), ya que una adición de 13,6 kN en las cargas del eje trasero, con contrapesos, para el tratamiento 3070 con respecto a las cargas de 4060 disminuyeron el patinaje en promedio un 17,5%. En el tratamiento 5050, a pesar de que la cantidad de contrapesos añadida fue menor al tratamiento 4060 (2,4 kN), el porcentaje de patinaje fue similar, lo cual indica que el peso agregado al eje trasero no fue suficiente para disminuir el giro en falso de las llantas sobre el suelo de orden vertisol. Por lo tanto, el patinaje fue un factor clave en el mantenimiento del desempeño del suelo, ya que un menor porcentaje de patinaje refleja a largo plazo una menor degradación y compactación del suelo (Mohamed 2015).

Además, el consumo de combustible se incrementó significativamente cuando el porcentaje de patinaje fue mayor, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Mamkagh (2019b), Mohamed (2015) y Moitzi *et al.* (2006, 2014). De acuerdo con estos resultados, el balanceo de cargas 3070 registró el menor porcentaje de patinaje, y a la vez generó el menor gasto de combustible por hectárea mecanizada.

#### **Efecto de los balanceos de las cargas del tractor sobre el consumo de agua para riego.**

El consumo anual calculado del recurso hídrico fue directamente proporcional al agua útil disponible para las plantas y a la frecuencia de riego, los cuales dependen a su vez de los valores obtenidos de capacidad de campo (Legarda *et al.* 1999). En las etapas de muestreo B (inmediatamente después) y C (2 meses después de la labranza), el tratamiento 3070 mostró el menor consumo anual de agua por hectárea mecanizada, debido a que presentó los valores más altos de capacidad de campo. Asimismo, el tratamiento

5050-C mostró una mayor necesidad de tiempos de riego durante esta etapa. El consumo teórico de agua y la cantidad de riegos por año varía entre tratamientos debido a que la lámina de agua está en función de la densidad aparente ( $D_a$ ) y la capacidad de campo (CC). En función del aprovechamiento eficiente del agua para riego, el balanceo de cargas que mejor representó el consumo mínimo fue el tratamiento 3070.

**Coefficiente de fricción.** El coeficiente de fricción ( $\mu$ ) calculado proporcionó la idea de cómo la fuerza de corte superaba la reacción normal de la superficie, en todos los tratamientos evaluados. Verruijt (2018) mencionó que cuando se supera la reacción normal del suelo, los esfuerzos cortantes no podrán ser transmitidos al suelo, al ser la textura uno de los factores que influyeron en la fricción. Por lo tanto, Donghwi *et al.* (2018) y Verruijt (2018) indicaron que entre mayor es el contenido de arcilla en el suelo, la RC y, por ende,  $\mu$ , incrementan significativamente. Lo anterior se refleja en los resultados del estudio, debido a que se obtuvo mayores resistencias al corte cuando el patinaje fue mayor.

**Valor de resistencia al corte y la velocidad de trabajo del tractor.** Lo determinan la demanda de potencia requerida para labrar el suelo, y fue significativamente mayor para los tratamientos 4060 y 3070 en la etapa C. Esto quiere decir, que, si se volviera a mecanizar 2 meses después, se requeriría mayor potencia del tractor para labrar el suelo bajo los tratamientos previos de 4060 y 3070.

**Eficiencia del equipo de labranza.** En cuanto a eficiencia de los equipos en la labranza, el tratamiento 3070 mostró menor patinaje, una profundidad de labranza promedio intermedia (entre los otros tratamientos), con menor afectación en la resistencia del suelo. Las correlaciones positivas entre el coeficiente de fricción y el patinaje de ambos ejes del tractor son mayores al 70%, por lo que se comprueba el efecto de la superficie sobre las condiciones operativas de los equipos utilizados en la preparación del suelo.

## CONCLUSIONES

En general, ninguna de las combinaciones de balanceo de cargas a los ejes del tractor se complementó favorablemente con las propiedades físicas, hidráulicas, mecánicas y de eficiencia de la operación. Por lo tanto, todos los tratamientos afectaron en cierta magnitud tanto las funciones del suelo como la operación de la labranza.

Es así como, la distribución de cargas del eje en el tratamiento 50-50 no es recomendable para un suelo de orden vertisol, ya que el peso del tractor fue insuficiente para lograr una profundidad de labranza adecuada, por lo tanto, no logró alterar las propiedades del suelo a 15 cm.

A pesar de que el balanceo de cargas en el tratamiento 4060 es considerado ideal, en la literatura, para el mantenimiento adecuado del diseño mecánico del tractor, no favorece las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo. Además, después de 2 meses de labranza, mostró un aumento significativo de la resistencia al corte, lo que ocasiona un mayor requerimiento de potencia del tractor para labranzas mecanizadas posteriores, pues aumentó el patinaje y el consumo de combustible.

El tratamiento 3070, contribuyó, con el tiempo, a aumentar la profundidad del piso de arado, beneficiando el crecimiento radicular del pasto, pero tuvo un comportamiento muy similar en la restricción radicular a profundidades mayores a los 60 cm. A pesar de esto, presentó el menor consumo teórico anual de agua para el cultivo de pasto por hectárea mecanizada, ya que el agua útil disponible para las plantas fue mayor. Además, registró el menor porcentaje de patinaje, coeficiente de fricción, consumo de combustible y potencia de labranza requerida del tractor.

En cuanto a eficiencia de los equipos en la labranza, el tratamiento 3070 mostró menor patinaje de los ejes del tractor con una profundidad de labranza promedio intermedia ejerció un efecto más favorable sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo, las mejores condiciones de eficiencia de operación y requerimientos

hídricos, en comparación con los tratamientos 5050 y 4060.

A partir de los resultados obtenidos con el balanceo de cargas con el tratamiento 3070 se recomienda continuar con estudios similares con diferentes tipos de órdenes de suelos e implementos con el fin de llegar a comprender mejor el efecto de la labranza sobre las funciones del suelo y la maximización de la eficiencia de operación.

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria por haber permitido realizar el estudio en sus instalaciones. Al Ing. Edwin Quirós y su equipo por la asistencia técnica ofrecida. A la Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS) y a la Ing. Floria Bertsch por el financiamiento parcial otorgado a esta investigación. Además, a los revisores anónimos de la revista por sus aportes, los cuales enriquecieron el presente documento.

## LITERATURA CITADA

- Abrol, V; Sharma, P. 2012. Resource management for sustainable agriculture (en línea). London, United Kingdom, IntechOpen. 308 p. Consultado 13 ago. 2020. Disponible en <https://www.intechopen.com/books/1248>
- Alam, K; Islam, M; Salahin, N; Hasanuzzaman, M. 2014. Effect of tillage practices on soil properties and crop productivity in wheat-mungbean-rice cropping system under subtropical climatic conditions. *The Scientific World Journal* 2014: 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/437283>
- Al-Mastawi, KE; Dahham, GA; Yahya, LM. 2022. Effects of soil moisture content, tire inflation pressure, and tillage speed on tractive performance of 2WD tractor in Northern Iraq. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery* 53(8).
- Almaliki, SA; Himoud, MS; Muhsin, S. 2021. Mathematical model for evaluating slippage of tractor under various field conditions. *Basrah Journal of Agricultural Sciences* 34:49-59.

- Al-Talabani, JHN; Al-Sammarraie, MAJ. 2021. The effect of plowing and pulverization systems on some plant indicators of onion. *Plant Arch.* 21:851-853. DOI: <https://doi.org/10.51470/2021/v21.S1.129>
- Alvarado, A. 2011. *Maquinaria y mecanización agrícola*. San José, Costa Rica, Editorial Universidad Estatal a Distancia. 570 p.
- Amancha, E. 2015. Determinación de la permeabilidad de los suelos basados en la metodología del infiltrómetro de mini disco en la Zona de Yanahurco, Napo. Tesis de Grado. Quito, Ecuador, Universidad Central del Ecuador. 97 p. Consultado 2 ago. 2020. Disponible en <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6758>
- Arvidsson, J. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil and Tillage Research* 60:67-78. DOI:10.1016/S0167-1987(01)00169-6
- Ashburner, J; Sims, B. 1984. *Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza* (en línea). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 482 p. Consultado 13 ago. 2020. Disponible en <https://repositorio.iica.int/handle/11324/6796>
- Battiato, A; Alaoui, A; Diserens, E. 2015. Impact of normal and shear stresses due to wheel slip on hydrological properties of an agricultural clay loam: experimental and new computerized approach. *Agricultural Science* 7(4):1-19. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v7n4p1>
- Baver, LD; Gardner, WH; Gardner, WR. 1972. *Soil physics*. 4 ed. USA, John Wiley & Sons.
- Beer, F; Russell Johnston, E; DeWolf, JT; Mazurek, D. 2009. *Mecánica de materiales*. 5 ed. New York, USA, McGraw-Hill. 788 p.
- Bhushan, LS; Ghildyal, BP. 1972. Influence of radius of curvature of moldboard on soil structure. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 42:1-5.
- Blume, HP; Brümmer, GW; Horn, R; Kandeler, E; Kögel-Knabner, I; Kretschmar, R; Stahr, K; Wilke, BM. 2010. Scheffer/Schachtschabel. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16:123-174.
- Cadena, B; Egas, D; Ruiz, M; Mosquera, J; Benavides, O. 2012. Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L) (en línea). *Revista de Ciencias Agrícolas* 29(2):116-128. Consultado 14 jul. 2020. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5104148>
- Casady, W. 1997. *Tractor tire and ballast management*. Agricultural MU Guide, University of Missouri Extension, Columbia, USA. s.p.
- Dexter, AR; Bird, NRA. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research* 57:203-212.
- Donghwi, K; Boo Hyun, N; Heejung, Y. 2018. Effect of clay content on the shear strength of clay – sand mixture. *International Journal of Geo-Engineering* 9(19):1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0087-x>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2008. *Consistencia del suelo* (en línea). Consultado 15 jun. 2020. Disponible en [http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#top](http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm#top)
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2015. *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (en línea). *World Soil Resources Reports* N°. 106. 203 p. Consultado 20 jul. 2020. Disponible en <https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia); ITPS (Intergovernmental Technical Panel on Soils). 2015. *Status of the world's soil resources: main report* (en línea). Rome, Italy. 650 p. Consultado 2 may. 2020. Disponible en <https://www.fao.org/documents/card/es/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/#:~:text=The%20SWSR%20is%20a%20reference,expert%20knowledge%20and%20project%20outputs>
- Fasinmirin, JT. 2017. Saturated hydraulic conductivity ( $K_{\theta s}$ ) of a Sub-Tropical ultisol under different tillage systems (en línea). *In Proceedings of The International Academic Conference for Sub-Saharan Africa Transformation and Development*, Akure, Nigeria 3(4):1-11. Consultado 16 abr. 2020. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/317014864\\_Saturated\\_Hydraulic\\_Conductivity\\_K\\_theta\\_s\\_of\\_a\\_Sub-Tropical\\_Ultisol\\_under\\_different\\_Tillage\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/317014864_Saturated_Hydraulic_Conductivity_K_theta_s_of_a_Sub-Tropical_Ultisol_under_different_Tillage_Systems)
- Fernández, M; Goñi, J. 2010. Relación entre el esfuerzo cortante del suelo y la resistencia a la penetración: su utilidad para diagnosticar la compactación del suelo. *Rev. de la Fac. de Agronomía - UNLPam*, Vol. 21.
- Gómez, N; Villagra, K; Solórzano, M. 2016. Patinaje de tractor con dos Implementos de Labranza en dos tipos de suelo en Costa Rica (en línea). *In Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Quito, Ecuador. Consultado 15 abr. 2020. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/312491125\\_patinaje\\_de\\_tractor\\_con\\_dos\\_implementos\\_de\\_labranza\\_en\\_dos\\_tipos\\_de\\_suelo\\_en\\_costa\\_rica](https://www.researchgate.net/publication/312491125_patinaje_de_tractor_con_dos_implementos_de_labranza_en_dos_tipos_de_suelo_en_costa_rica)
- Gómez, N; Villagra, K; Solórzano, M. 2017. Cuantificación de la erosión hídrica en función de diferentes técnicas

- de mecanización para minimizar la contaminación del agua por sedimentos en la parte alta de la Cuenca del Río Reventazón (en línea). Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 115 p. Proyecto 5402-1421-3201 (1421007). Consultado 25 abr. 2020. Disponible en [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9164/Cuantificacion\\_erosion\\_hidrica\\_funcion\\_diferentes\\_tecnicas\\_mecanizacion\\_minimizar\\_contaminacion\\_agua.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9164/Cuantificacion_erosion_hidrica_funcion_diferentes_tecnicas_mecanizacion_minimizar_contaminacion_agua.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Gómez-Calderón, N; Rodríguez-Yáñez, J. 2020. Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yulök Revista de Innovación Académica* 3(2):44-50.
- Gómez-Calderón, N; Villagra-Mendoza, K; Solórzano-Quintana, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo. *Revista Tecnología en Marcha* 31(1):170. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- González-Cervantes, G; González-Barríos, JL; Chávez-Ramírez, E. 2012. Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas (en línea). *Tecnología y ciencias del agua* 3:21-32. Consultado 17 jul. 2020. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100002)
- Hartge, KH; Horn, R. 2016. *Essential soil Physics*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany. s. p.
- Haruna, S; Anderson, S; Nsalambi, N; Syaharudin, Z. 2018. Soil hydraulic properties: influence of tillage and cover crops. *Pedosphere* 28:430-442. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60387-4
- Horton, R; Horn, R; Bachman, J; Peth, S. 2016. *Essential soil physics an introduction to soil processes, functions, structure and mechanics*. Stuttgart, Germany, Schweizerbart Science Publishers. 391 p.
- INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). 2015. *Suelos de Costa Rica orden vertisol*. Boletín Técnico N°. 3. San José, Costa Rica. s. p.
- Jadhav, PP; Sharma, AK; Wandkar, SV; Gholap, BS. 2013. Study of tractive efficiency as an effect of ballast and tire inflation pressure in sandy loam soil. *Agric Eng Int: CIGR Journal* 15(2):60-67.
- Jorajuria, D; Draghi, L. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient* 4(3):445-452. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300022>
- Keller, T; Dexter, AR. 2012. Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. *Soil Research* 50(1):7. DOI:10.1071/sr11174
- Kirchhof, G. 2006. Plastic properties. *In* Lal, R (eds.). *Encyclopedia of Soil Science*. New York, USA, Taylor & Francis. p. 1311-1313.
- Koola, D; Tongb, B; Tianc, Z; Heitman, J. L; Sauer, T. J; Hortona, R. 2019. Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and tillage research* 193:95-100. DOI: 10.1016/j.still.2019.05.020
- Kuang, B; Mahmood, HS; Quraishi, MZ; Hoogmoed, WB; Mouazen, AM; Van Henten, EJ. 2012. Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: A review. *Adv. Agron.* 114:155-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1>
- Kulmatiski, A; Beard, KH; Holdrege, MC; February, EC. 2020. Small differences in root distributions allow resource niche partitioning. *Ecology and Evolution* 10(18):9776-9787. DOI: 10.1002/ece3.6612
- Legarda, L; Puentes, G; Benavides, H. 1999. Importancia de los parámetros hidrofísicos del suelo y requerimientos hídricos del cultivo en el diseño de un proyecto de riego por aspersión liviana (en línea). *Revista de Ciencias Agrícolas* 16(1-2):98-109. Consultado 5 jul. 2020. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6191459>
- Lyne, PWL; Burt, EC; Meiring, P. 1984. Effect of tire and engine parameters on efficiency. *Transactions of ASABE* 27:5-7.
- Mahmood, H; Subhi, KA; Rashid, M. 2020. Effect of extra weight and tire pressure on fuel consumption and slippage ratio on tillage operation done in Al-Musain Area. *Soild State Technology* 63(3):5278-5287.
- Mamkagh, A. 2019a. Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: A Review. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research* 9(1):1-7. DOI: <https://doi.org/10.9734/AJAAR/2019/46706>
- Mamkagh, A. 2019b. Effect of tillage speed, depth, ballast weight and tire inflation pressure on the fuel consumption of the agricultural tractor: A Review. *Journal of Engineering Research and Reports* 3(2):1-7.
- Medina González, H; García Coronado, J; Nuñez Acosta, D. 2007. El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo (en línea). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16(3):19-24. Consultado 4 jul. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216305>
- Mohamed, S. 2015. Effect of plowing conditions on the tractor wheel slippage and fuel consumption in sandy soil. *Chem Tech Research* 8(12):151-159.
- Moitzi, G; Weingartmann, H; Boxberger, J. 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption (en línea). *In* *Proceedings of Energy Efficiency and Agricultural Engineering – International Scientific Conference* 7. – 9, Rousse, Bulgaria. Consultado 27

- jul. 2020. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/265446406\\_Effects\\_of\\_tillage\\_systems\\_and\\_wheel\\_slip\\_on\\_fuel\\_consumption](https://www.researchgate.net/publication/265446406_Effects_of_tillage_systems_and_wheel_slip_on_fuel_consumption)
- Moitzi, G; Wagentristsl, H; Refenner, K; Weingartmann, H. 2014. Effects of working depth and wheel slip on fuel consumption of selected tillage implements (en línea). *Agric Eng Int: CIGR Journal* 16(1):182-190. Consultado 4 jul. 2020. Disponible en <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2661/1852>
- Munkholm, L.J; Heck, R.J; Deen, B. 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182:22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.02.024>
- Pravin, J. 2012. Effect of ballast and tyre inflation pressure on the performance of agricultural tractor for primary tillage operations in sandy loam soil. Thesis M.Sc. Udaipur, India, Maharana Pratap University of Agriculture and Technology. s. p.
- R Core Team 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. s. p
- Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce de León, J; Hill, M. 2004. Propiedades físicas de los suelos (en línea). Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. 78 p. Consultado 15 ago. 2020. Disponible en <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>
- Soil Survey Staff. 2018. Soil survey field and laboratory methods manual. Soil survey investigations report N°. 51, version 2.0 (en línea). R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 487 p. Consultado 3 abr. 2020. Disponible en [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1244466.pdf)
- Solano, J; Villalobos, R. 2021. Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica (en línea). Instituto Meteorológico Nacional, Gestión de Desarrollo. 32 p. Consultado 20 abr. 2020. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>
- Stone, A; Gulvin, H. 1987. Maquinaria agrícola. 15 ed. México D.F., México, Compañía Editorial Continental. 693 p.
- Ten Damme, L; Schjonning, P; Munkholm, L.J; Green, O; Nielsen, SK; Lamandé, M. 2021. Soil structure response to field traffic: effects of traction and repeated wheeling. *Soil & Tillage Research* 213:105-128. DOI: 10.1016/j.still.2021.105128
- USDA. 2001. Soil quality test kit guide. USDA Soil Quality Institute. Washington, DC. s.p.
- Veiga, M; Reinert, D; Reichert, J; Kaiser, R. 2008. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian hapludox. *Rev Bras Cienc. Solo* 32(4):1437-1446. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400008>
- Verruijt, A. 2018. An introduction to soil mechanics (en línea). Delft, Holanda, Springer. 419 p. Consultado 25 abr. 2020. Disponible en <https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=xDkuDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Verruijt,+A.+2018.+An+Introduction+to+Soil+Mechanics&ots=qsrrtroLwO&sig=XHmDPgmidtZdhNHKw2iyQ5UPQiw#v=onepage&q=Verruijt%2C%20A.%202018.%20An%20Introduction%20to%20Soil%20Mechanics&f=false>
- Villagra-Mendoza, K; Horn, R. 2018. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma* 326:88-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.021>
- Zerpa, G; Sosa, O; Berardi, J; Bolatti, J. 2013. La resistencia mecánica a la penetración en pasturas. *Agromensajes* 35(1):64-68.
- Zimmermann, I; Horn, R. 2020. Impact of sample pretreatment on the results of texture analysis in different soils. *Geoderma* 371:114379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114379>



