

LABRANZA MECANIZADA DE PASTURAS MEDIANTE TRES IMPLEMENTOS EN UN ULTISOL DE SAN MATEO, COSTA RICA: IMPLICACIONES FISICAS E HIDROPEDOLÓGICAS.

Manuel E Camacho^{1}, Rafael Mata¹, Warren Forsythe¹, Mario Morales²*

Palabras clave: Compactación de suelo, infiltración, mecanización, pasturas, Ultisoles, Hidropedología.

RESUMEN

Mediante un estudio en el campo, se determinó el efecto de la labranza mecanizada de tres implementos sobre la compactación, las variables físicas e hidropedológicas del suelo. Se tomó un lote dedicado a la ganadería de aproximadamente 10000 m² (1 ha) con un suelo clasificado taxonómicamente como Andic Haplohumults, se dividió en dieciséis secciones iguales, y se aleatorizó la mecanización con distintos implementos correspondientes a los tratamientos, teniendo como unidad experimental una parcela. Como tratamientos se obtuvo un área sin mecanización (T), mecanización mediante un palín mecánico (PM), un arado de cincel (AC) y un subsolador (S). Cuarenta días después de la aplicación de los tratamientos se determinó la resistencia a la penetración, humedad gravimétrica, densidad aparente, así como infiltración y conductividad hidráulica. Se encontró un descenso en la compactación del suelo expresada como resistencia a la penetración para los tratamientos de mecanización, siendo el tratamiento palín mecánico (PM) el que reportó los valores más bajos. Este mismo tratamiento incrementó la infiltración acumulada de manera significativa. No se encontró diferencias significativas entre los tratamientos de mecanización para densidad aparente, porosidad y espacio aéreo, pero sí con respecto al tratamiento T. El tratamiento subsolador (S) reportó los valores más elevados de conductividad hidráulica, sin diferencia estadísticas del resto de tratamientos.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas pastoriles representan una muy importante actividad económica a nivel nacional. Sin embargo en los últimos años se ha reportado una reducción significativa de las áreas dedicadas a la ganadería. Para el año 1988 se habían censado 2 420 118 ha, pasando a 1 349 628 ha para el año 2000, sin embargo la carga animal incrementó de 0.70 a 0.77 unidades animales

¹ Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camacho87@gmail.com

*Centro de investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. San José. Costa Rica.

² Universidad de Costa Rica, sede Liberia

ha⁻¹ para los mismos años respectivamente (MAG 2000), lo cual sugiere un uso más intensivo de las tierras dedicadas a la ganadería.

Lo anterior y la presión de producción de ganado bovino resultan en el sobre pastoreo, el cual degrada progresivamente los suelos sobre los cuales se desarrollan dichas actividades (Forsythe 1997, Wheeler et al. 2002), además trasciende en una reducción de la cobertura y en los rendimientos esperados (Kauffman y Krueger 1984). Los efectos del ganado bovino sobre el suelo han sido estudiados por múltiples autores (Kauffman y Krueger 1984, Warren et al. 1986) y es definido como un agente modificador del suelo y el paisaje (Trimble y Mendel 1995).

Un efecto directo de estos sistemas de producción es la compactación, la cual se define como un incremento en la densidad del suelo producto de presiones o cargas ejercidas sobre el mismo (Barver et al. 1973 citados por Agüero y Alvarado 1983) las cuales provocan la compresión de partículas sólidas, gases y líquidos dentro del espacio poroso, generando un reacomodo estructural del suelo (Agüero y Alvarado 1983). Este fenómeno ha sido reportado por otros autores como ente degradador de la calidad del suelo (Agüero y Alvarado 1983, Forsythe 1997, Dec et al. 2011, Dec et al. 2012)

Forsythe et al. (2005) mencionan varios parámetros físicos por los cuales es posible evaluar la compactación de un suelo, entre ellos la porosidad, la densidad aparente, la infiltración, y la resistencia a la penetración, siendo este último el mejor parámetro para determinar el grado de compactación. Estos mismos han sido reportados por otros autores (Kauffman y Krueger 1984,

Warren et al. 1986, Sharrow 2007, Dec et al. 2012) como índices de compactación y adensamiento del suelo.

Parte del problema de compactación en pasturas radica en la disminución de la profundidad de raíces por parte de las plantas, obteniéndose como resultado un descenso en el desarrollo de biomasa radical y por ende en la biomasa aérea de la planta (Paripovic 2011). Bajo estas condiciones en dichos sistemas, se han reportado descensos en la profundidad de las raíces directamente relacionados al incremento de la densidad aparente del suelo (Skinner et al. 2009), generando disminuciones de hasta un 75 % de dicha profundidad en comparación con las desarrolladas en suelos menos compactados.

Desde el punto de vista pedológico e hidrológico, la compactación del suelo se ve fuertemente involucrada en los múltiples procesos de la génesis y la evolución de un suelo, así como en los fenómenos del movimiento y retención del agua en el mismo. Dentro de los anteriores destacan la capacidad de drenaje y movimiento del agua, la aireación y reacciones oxido-reducción en el perfil del suelo, así como el adensamiento y formación de horizontes endurecidos, responsables de elementos formativos dentro del nombre taxonómico de un suelo (Boul et al. 2009). Por lo anterior, conviene estudiar la compactación del suelo de una forma integrada e interdisciplinaria, tomando en cuenta conceptos tanto pedológicos como hidrológicos.

Recientemente se ha venido desarrollado la hidropedología, una ciencia interdisciplinaria que describe la interacción entre los procesos pedológicos e hidrológicos (Lin 2003, Lin et al. 2006, Pachepsky et al. 2006). Esta disciplina se fundamenta en dos aspectos generales: 1) el rol del

paisaje y la arquitectura del suelo en los procesos hidrológicos, y 2) el efecto de los procesos hidrológicos sobre la génesis y evolución del suelo, variabilidad y funcionalidad (Lin 2012). Bouma (2006) describe procesos relacionados con la hidropedología e importancia en la investigación y políticas ambientales. Destaca entre ellos el flujo de derivación, la conductividad hidráulica saturada, los niveles de tabla de agua, la accesibilidad de agua, e hidrofobicidad del suelo.

En Costa Rica, los trabajos sobre compactación de suelos y sus repercusiones sobre el desarrollo y rendimiento de los cultivos son escasos (Alvarado y Agüero 1983, Forsythe y Schweizer 2001, Forsythe et al. 2005). Sumado a lo anterior, no se han encontrado estudios sobre la relación de parámetros físicos del suelo como la compactación y la infiltración, y menos aún, sobre el estudio de las propiedades hidropedológicas.

Basado en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de tres implementos de labranza sobre la compactación y algunas propiedades físicas e hidropedológicas de un Ultisol en San Mateo de Alajuela, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en San Mateo, Alajuela (Figura 1). Se localizó un terreno dedicado a la ganadería con un área de aproximadamente una hectárea (10 000 m²). El terreno se encontró ubicado en el pie de monte de los cerros del Aguacate, con una gradiente de 3%. Se clasifica dentro del sistema de vida de Holdridge (1983) bosque húmedo tropical (Bh-T), y el

drenaje del sitio conduce a un afluente del río Jesús María. Los parámetros climáticos se describen en la Figura !

El suelo del sitio se clasificó taxonómicamente como un Andic Haplohumults según el sistema USDA (2014), las características del suelo se presentan en el Cuadro 1 y Cuadro 2. El terreno se encontraba sembrado con pasto *Bracharia brizantha*, especie con crecimiento cespitoso y reproducción por estolones, la cual presenta de manera general un 80% de la biomasa de raíces distribuido en los primeros 30 cm del perfil del suelo y baja tolerancia a la sequía (Guenni et al 2002). Dicho terreno se dividió en 16 parcelas iguales correspondientes a cuatro repeticiones para cuatro tratamientos.

Dichos tratamientos consistieron en la mecanización mediante tres implementos de labranza: el palín mecánico (PM), el arado de cincel (AC) y el subsolador (S). Como tratamiento testigo se establecieron sitios sin mecanizar. Cuarenta días posteriores a la mecanización se realizaron las evaluaciones correspondientes a los parámetros físicos e hidropedológicos.

Diseño experimental

El experimento se estableció a nivel de campo, en un diseño experimental Irrestricto al Azar, con 4 tratamientos y 4 repeticiones por cada tratamiento. Se estableció como unidad experimental una parcela de 650 m².

Los tratamientos que se aplicaron fueron los siguientes:

- Testigo sin labranza (T)
- Labranza mediante palín mecánico a 60cm de profundidad (PM)
- Labranza mediante arado de cincel a 20 cm de profundidad (AC)
- Labranza mediante subsolador a 40 cm de profundidad (S)

Variables de compactación, físicas e hidropedológicas.

Para cada parcela se determinó la resistencia a la penetración hasta 50 cm de profundidad mediante un penetrómetro Eijkelkamp[®] empleado el cono # 2, como variable directa de compactación. Como variables físicas se determinó la densidad aparente, densidad de partículas del suelo y la humedad gravimétrica según lo sugerido por Forsythe (1985). A partir de ambos valores de densidad y la humedad se calculó la porosidad total y el espacio aéreo de acuerdo con Forsythe (1985). Como variables hidropedológicas se evaluó la infiltración del suelo mediante la metodología de los anillos concéntricos propuesta por Bower (1986) y la conductividad hidráulica de acuerdo con Forsythe (1985).

Análisis estadístico

Mediante el uso del paquete estadístico InfoStat[®], se realizó un análisis de varianza “ANDEVA” para las variables densidad aparente, porosidad total, espacio aéreo y conductividad hidráulica, se utilizó la prueba de LDS Fisher para separar las medias en las variables que presenten diferencias mínimas significativas con $p < 0.05$.

Para el análisis de infiltración se determinó las constantes de la ecuación de Kostiakov (1932) para cada tratamiento mediante un modelo regresión de forma potencial con la velocidad de infiltración ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$) como variable dependiente y el tiempo (min) como variable independiente:

$$Q = \alpha\tau^\beta$$

Donde Q corresponde a la velocidad de infiltración; τ el tiempo; α y β constantes de regresión.

Para la determinación de la infiltración acumulada (cm), se integró la ecuación anterior en los límites de tiempo $t=0$ y $t=1$ para generar la siguiente ecuación:

$$I = \int_0^\tau Q d\tau = \int_0^\tau \alpha\tau^\beta = \frac{\alpha\tau^{\beta+1}}{\beta + 1}$$

Donde I es la infiltración acumulada; α y β son las constantes de regresión, τ es el tiempo en minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de los tratamientos de mecanización sobre la compactación del suelo.

Los tratamientos de labranza mecanizada redujeron la compactación del suelo, estimada por la resistencia a la penetración. Se observa que en los primeros 5 cm, no existe diferencia significativa en los valores de resistencia a la penetración entre implementos pero sí entre el tratamiento testigo y el suelo arado por los implementos (Figura 2).

Conforme incrementa la profundidad del suelo los valores de resistencia a la penetración reportados para cada tratamiento comienzan a incrementar. El tratamiento PM presenta valores menores a 1 MPa hasta una profundidad de 35 cm, y a partir de 15 cm este tratamiento presenta valores estadísticamente distintos de los obtenidos por AC y S, para posteriormente obtener valores cercanos a 2 MPa a una profundidad de 50 cm, de forma similar a lo obtenido por los otros dos tratamientos. A esta misma profundidad no se observa una diferencia de los tratamientos de labranza mecanizada comparados con el testigo.

El tratamiento S presentó valores de resistencia a la penetración similar a PM durante los primeros 15 cm, a partir de esta profundidad dichos valores incrementan al punto que no presentan diferencias significativas con los valores del tratamiento AC y con el T al alcanzar 30 cm de profundidad.

De manera general se observó el efecto de los distintos implementos de labranza, obteniéndose diferencias significativas entre los valores de resistencia a la penetración para el tratamiento testigo y los obtenidos en los tres tratamientos en los primeros 25 cm.

Destaca el tratamiento PM, el cual dio los valores más bajos de resistencia a la penetración hasta una profundidad de 40 cm, con diferencias significativas con respecto a los otros dos tratamientos de mecanización y al tratamiento testigo (Figura 2). Este tratamiento reportó valores de resistencia inferiores a 2.04 MPa dentro 50 cm de profundidad evaluados, y según Forsythe () este valor de resistencia corresponde al límite inferior para clasificar un suelo como compactado. Lo anterior podría explicarse según Alvarado (2004), quien expone que el funcionamiento del

palín mecánico produce un volteo mínimo del suelo y requiere menos pases del implemento, lo contribuye en la reducción de la compactación y evita la formación del pie de arado.

Por otro lado, Licht y Al-Kaisi (2005) evaluaron implementos de labranza como el arado de cincel y arado de franja contra sitios sin mecanizar. Encontraron que a una profundidad de 0-10 cm el tratamiento de arado de cincel reportó valores más bajos de resistencia a la penetración que tratamientos sin mecanizar y labranza en franja. Pierce et al. (1992) estudiaron diferentes sistemas de labranza en un suelo fine-loamy, mixed, mesic Typic Hapludalf; encontraron reducciones significativas en la resistencia a la penetración (0,5 MPa) para los tratamientos de subsolado en comparación con el tratamiento sin mecanización (3 MPa).

Martínez y Zynck (2004) reportaron valores de hasta 4,5 MPa en los primeros 20 cm en pasturas de 9 años. Destacan el incremento en la resistencia a la penetración producto del pisoteo del ganado sobre el suelo tras un periodo largo de pastoreo. Resultados similares fueron reportados por Agüero y Alvarado (1983) para suelos bajo pastoreo en la provincia de Guanacaste, Costa Rica.

Efecto de los tratamientos de mecanización sobre las variables físicas del suelo.

Los tratamientos de labranza mecanizada afectaron de manera significativa las variables físicas del suelo evaluado. Se observó un descenso de la densidad aparente así como un incremento en la porosidad total y el espacio aéreo en los primeros 25 cm. Para las tres variables evaluadas, no se encontró diferencias significativas entre los implementos pero sí con respecto al testigo (Figura 3).

El resultado más evidente corresponde al incremento en el espacio aéreo obtenido en los tres implementos, el cual corresponde a un incremento del 50 % con respecto al testigo. Esto se debe probablemente al efecto del implemento en la ruptura de los macro-agregados, el cual los secciona en partes más pequeñas reduciendo la densidad aparente del suelo, e incrementando el espacio poroso. Para este parámetro del suelo la diferencia entre los tres tratamientos de labranza mecanizada es mínima.

Al respecto Álvarez y Steinbach (2009) en un estudio de revisión de resultados de 35 experimentos de mecanización encontraron que los valores de densidad aparente fueron significativamente más bajos en tratamientos de mecanización convencional que los reportados para los sitios bajo cero labranza, evaluados en los primeros 25 cm de profundidad. Kay y VandenBygaart (2002) mencionan la reducción de la porosidad en suelos que pasan de un manejo bajo mecanización convencional a uno sin mecanización o cero labranza. Lipiec et al. (2006) encontraron en un Eutric Fluvisol los valores más elevados de porosidad en un tratamiento de mecanización, en comparación con el tratamiento cero labranza, el cual reportó los más bajos.

Efecto de los tratamientos de mecanización sobre las variables hidropedológicas.

Los tratamientos de labranza mecanizada incrementaron de manera significativa la infiltración acumulada para el suelo evaluado. Se observó un incremento de casi 41 veces la infiltración acumulada en el tratamiento del PM con respecto al testigo a lo largo del tiempo de evaluación, hasta que se alcanzó la infiltración estabilizada. Los otros dos implementos también incrementaron la infiltración acumulada pero en valores más bajos que los obtenidos por el

tratamiento del PM (Figura 4). Esto se debe posiblemente al modo de acción del instrumento, generando un volteo mínimo y ruptura superficial del suelo en agregados más finos de forma homogénea, permitiendo así una mayor separación entre los agregados y la continuidad de los macro poros del suelo que facilita la infiltración del agua (Alvarado 2004).

Al respecto, Alegre et al. (1991) resumió gran cantidad de resultados de ensayos sobre labranza convencional, labranza de conservación y cero labranza realizados en Latinoamérica y encontró bajas tasas de infiltración en los sitios bajo mínima o cero labranza, en comparación con suelos bajo labranza convencional con subsolado y/o arado de cincel. Resultados similares han sido reportados por otros autores en otras latitudes (Horne et al. 1992, Gómez et al. 1999, Lipiec et al. 2006, Strudley et al. 2008).

Los bajos valores de infiltración acumulada reportados para el tratamiento T se deben probablemente a un uso intensivo del sitio como actividad ganadera. Pietola et al. (2005) estudiaron el efecto del pisoteo del ganado sobre las propiedades hidráulicas del suelo, encontrando reducciones significativas de la infiltración en sitios con mayor actividad del ganado. Resultados y conclusiones similares se reportan por otros autores (Warren et al. 1986, Trimble y Mendel 1995, Mwendera y Saleem 1997).

Por otro lado los valores de conductividad hidráulica obtenidos en los primeros 5 cm del horizonte superficial (Ap) se comportaron de manera distinta a los resultados anteriores. Los valores promedio de conductividad hidráulica obtenidos para cada tratamiento no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre ellos (Figura 5). Los valores

mencionados anteriormente presentaron la siguiente tendencia: Tratamiento S (102,9 cm.h⁻¹), PM (79,9 cm.h⁻¹), AC (37,8 cm.h⁻¹) y por último T (22,4 cm.h⁻¹). Estos resultados se deben probablemente a la gran variabilidad intrínseca de este parámetro dentro de un mismo suelo, vista como los errores estándar estimados para la media de cada tratamiento (Figura 5) y como lo sugieren otros autores (Mubarak et al. 2010, Rienzner y Gandolfi 2014).

De manera general, la conductividad hidráulica saturada de un suelo está más fuertemente asociada a la micromorfología de los poros que a la porosidad total y la densidad aparente del mismo (Nakano y Miyazaki 2005, Ingelmo et al. 2011), por lo anterior esta conductividad tiende a mantenerse en un sector de la profundidad del suelo afectada por mecanización o agentes de compactación (Dexter et al. 2004). Sin embargo, existen gran cantidad de estudios que reportan variaciones de la conductividad hidráulica saturada del suelo asociadas a compactación o bien a mecanización. Al respecto Pierce et al. (1992) encontraron incrementos en la conductividad hidráulica saturada en tres profundidades del suelo en sitios mecanizados con subsolador, obteniendo valores estadísticamente superiores al tratamiento sin mecanizar.

Xu y Mermoud (2003) elaboraron ensayos de mecanización empleando labranza cero y convencional, así como subsolador para modelar la dinámica del agua inferida de la conductividad hidráulica del suelo bajo estos tres manejos. Los autores encontraron valores superiores de conductividad hidráulica durante los primeros días de evaluación en el tratamiento de subsolador. Otros autores reportan resultados similares (Sojka et al. 1997, Drewry y Patton 2000).

La conductividad hidráulica es una propiedad de suma importancia en la hidropedología, la cual es descrita desde este enfoque como el comportamiento hidráulico del suelo en función de características propias debidas a su proceso de génesis como el desarrollo de la estructura o la micro morfología del perfil (Bouma 2006). Por ello, variaciones en esta propiedad producto de manejo del suelo o prácticas asociadas a cultivos podrían tener repercusiones no solo sobre el comportamiento mecánico del suelo, sino también sobre los procesos de desarrollo y evolución del suelo.

Los tratamientos de mecanización, tuvieron en general un efecto positivo sobre las variables hidropedológicas del sitio en estudio, incrementando la infiltración acumulada con respecto al tratamiento testigo. Estos efectos podrían tener beneficios a mediano y largo plazo, como el incremento en la infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Guzha 2004), reduciendo a la vez el agua de escorrentía y mitigándose el proceso de erosión laminar, muy común en estos sistemas de pasturas intensivos donde los valores de escorrentía son elevados (Trimble y Mendel 1995).

Sumado a lo anterior, el mejoramiento de las propiedades físicas del suelo podría generar beneficios en la actividad ganadera, tales como el incremento el rendimiento del pasto expresado como biomasa seca producto de un incremento en la porosidad y el espacio aéreo, ambos claves en la aireación del suelo y por tanto en el desarrollo radical y de la parte aérea en las gramíneas. Para futuros estudios de labranza mecanizada en pasturas, se recomienda la evaluación de parámetros de crecimiento y rendimiento del pasto, con la finalidad de evaluar el posible efecto de la mejora del suelo sobre el cultivo de interés, en dicho caso, el pasto.

CONCLUSIONES

De manera general, en el presente estudio se determinó los efectos de tres implementos de labranza sobre la compactación del suelo, propiedades físicas e hidropedológicas del mismo.

La labranza mecanizada del suelo mediante el palín mecánico (PM) resultó en un descenso de la compactación del suelo expresada como resistencia a la penetración, así como en un incremento significativo de la infiltración acumulada del mismo.

No se encontró diferencia significativa entre los tres implementos de mecanización en la densidad aparente, la porosidad y el espacio aéreo del suelo, sin embargo estas variables difieren significativamente con respecto al tratamiento testigo. El espacio aéreo determinado para los tratamientos de mecanización incrementó en casi un 50% con respecto al tratamiento testigo.

El tratamiento subsolador (S) produjo los valores más elevados de conductividad hidráulica, pero sin diferencia estadística a los restantes tratamientos. La variabilidad espacial y temporal de este parámetro se deberá tomar en cuenta para futuros estudios de mecanización, compactación e hidropedología.

LITERATURA CITADA

Agüero JM, Alvarado A. 1983. Compactación y compactibilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 7 (2): 27-33.

Alegre JC, Cassel DK, Amezcua E. 1991. Tillage systems and soil properties in Latin America. *Soil and Tillage Research* 20: 147-163.

Alvarado A. 2004. *Maquinaria y mecanización agrícola*. EUNED. San José Costa Rica. 612 p.

- Alvarez R, Steinbach HS. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104(1): 1-15.
- Bouma J. 2006. Hydropedology as a powerful tool for environmental policy research. *Geoderma* 131(3): 275-286.
- Dec D, Dörner J, Balocchi O. 2011. Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in Southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(2): 293-303.
- Dec D, Dörner J, Balocchi O, Lopez I. 2012. Temporal dynamics of hydraulic and mechanical properties of an Andosol under grazing. *Soil & Tillage Research* 125: 44–51
- Dexter AR, Czyż EA, Gaę OP. 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79(2): 185-189.
- Drewry JJ, Paton RJ. 2000 Effect of subsoiling on soil physical properties and dry matter production on a Brown Soil in Southland, New Zealand, *New Zealand Journal of Agricultural Research* 43(2): 259-268.
- Forsythe W, Sancho F, Villatoro M. 2005. Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3): 175-185.
- Forsythe W, Schweizer S. 2001. La resistencia a la penetración y la rata de infiltración como indicadores de las condiciones físicas de un suelo de Costa Rica. In: XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo .Varadero, 11 al 16 de noviembre, 2001. CD-ROM.
- Guenni O, Marín D, Baruch Z. 2002. Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant and soil*, 243(2): 229-241.
- Guzha AC. 2004. Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. *Soil and Tillage Research* 76(2): 105-114.
- Hiltbrunner D, Schulze S, Hagedorn F, Schmidt M, Zimmermann S. 2012. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma* 170: 369 - 377.
- Ingelmo F, Molina M, de Paz JM, Visconti F. 2011. Soil saturated hydraulic conductivity assessment from expert evaluation of field characteristics using an ordered logistic regression model. *Soil and Tillage Research* 115: 27-38.
- Jenkinson DS, Powlson DS. 1976. The effects of biocidal treatment on metabolism in soil-V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry* 8: 209–213.

- Kay BD, Vandenbygaart AJ. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 66(2): 107-118.
- Kauffman JB., Krueger W. C. 1984. Livestock impacts on riparian ecosystems and streamside management implications. A review. *Journal of Range Management* 37(5): 430-438
- Kostiakov AN. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions 6th commission*: 17-21.
- Licht MA, Al-Kaisi M. 2005. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage research* 80(1): 233-249.
- Lin H. 2003. *Hydropedology*. *Vadose Zone Journal* 2(1): 1-11.
- Lin H. 2012. *Hydropedology: Addressing fundamentals and building bridges to understand complex pedologic and hydrologic interactions*. *Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology*. 3-39 p
- Lin H, Bouma J, Pachepsky Y, Western A, Thompson J, Van Genuchten R, Hans-Jorg V, Lilly, A. 2006. *Hydropedology: Synergistic integration of pedology and hydrology*. *Water Resources Research* 42(5): 1-13.
- Lipiec J, Kuś J, Słowińska-Jurkiewicz A, Nosalewicz A. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage research* 89(2): 210-220.
- Martinez LJ, Zinck JA. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil and Tillage Research* 75(1): 3-18.
- Ministerio de Agricultura y Ganaderia. 2000. Análisis del censo ganadero 2000. Disponible en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_animal/censo-ganadero-2000.pdf
- Mubarak I, Angulo-Jaramillo R, Mailhol JC, Ruelle P, Khaledian M, Vauclin M. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent?. *Agricultural water management* 97(10): 1517-1526.
- Mwendera EJ, Saleem MA. 1997. Infiltration rates, surface runoff, and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands. *Soil use and management* 13(1): 29-35.
- Nakano K, Miyazaki T. 2005. Predicting the saturated hydraulic conductivity of compacted subsoils using the non-similar media concept. *Soil and Tillage Research* 84(2): 145-153.
- Pachepsky YA, Rawls WJ, Lin HS. 2006. *Hydropedology and pedotransfer functions*. *Geoderma* 131(3): 308-316.

- Parišovic D. 2011. Impacts of conversion from forestry to pasture on soil physical properties of Vitrandis (Pumice Soils) in the Central North Island, New Zealand. M.Sc. Thesis. The University of Waikato. New Zealand. 91 p.
- Pierce F.J., Fortin M.C., Staton M.J. 1992. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. *Soil Tillage Res* 24:149- 165.
- Pietola L, Horn R, Yli-Halla M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil and tillage research* 82(1): 99-108.
- Rienznier M, Gandolfi C. 2014. Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. *Soil and Tillage Research* 135: 28-40.
- Sharrow SH. 2007. Soil compaction by grazing livestock in silvopastures as evidenced by changes in soil physical properties. *Agroforest Syst* 71:215–223
- Skinner AK, Lunt ID, Spooner P, McIntyre S. 2009. The effect of soil compaction on germination and early growth of *Eucalyptus albens* and an exotic annual grass. *Austral Ecology* 34(6): 698-704.
- SOIL SURVEY STAFF. 2014. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Tenth ed. Washington DC, USDA. 341 p.
- Sojka RE, Horne DJ, Ross CW, Baker CJ. 1997. Subsoiling and surface tillage effects on soil physical properties and forage oat stand and yield. *Soil and Tillage Research* 40(3): 125-144.
- Strudley MW, Green TR, Ascough II JC. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research* 99(1): 4-48.
- Trimble SW, Mendel AC. 1995. The cow as a geomorphic agent—a critical review. *Geomorphology* 13(1): 233-253.
- Vance E, Brookes P, Jenkinson D. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19: 703-707.
- Warren S.D., Thurow T.L., Blackburn W.H., Garza N.E. 1986. The influence of livestock trampling under intensive rotation grazing on soil hydrologic characteristics. *Journal of Range Management* 39(6): 491-495.
- Weisskopf P., Reiser R., Rek J., Oberholzer HR. 2010. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. *Soil & Tillage Research* 111: 65–74.

Wheeler M.A., Trlica M.J., Frasier G.W., Reeder J. D. 2002. Seasonal Grazing Affects Soil Physical Properties of a Montane Riparian Community. *Journal of Range Management*. 55(1): 49-56

Xu D., Mermoud A. 2003. Modeling the soil water balance based on time-dependent hydraulic conductivity under different tillage practices. *Agric. Water Manage.* 63 (2): 139–151.

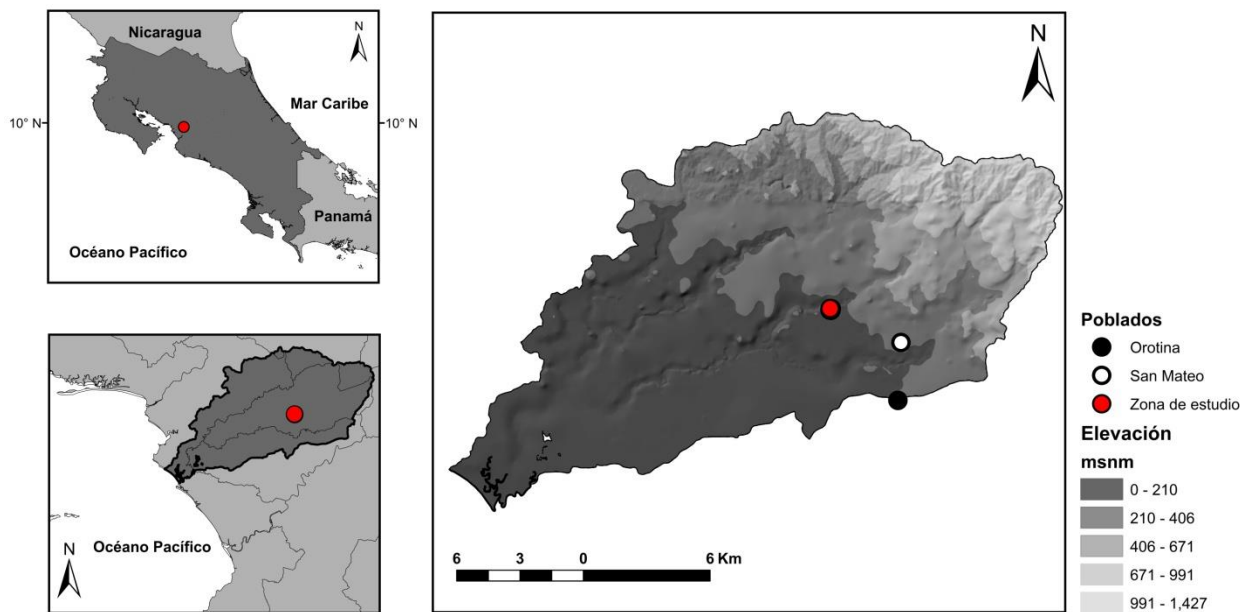


Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio y muestreo en la cuenca del río Jesús María, San Mateo. Alajuela. 2013.

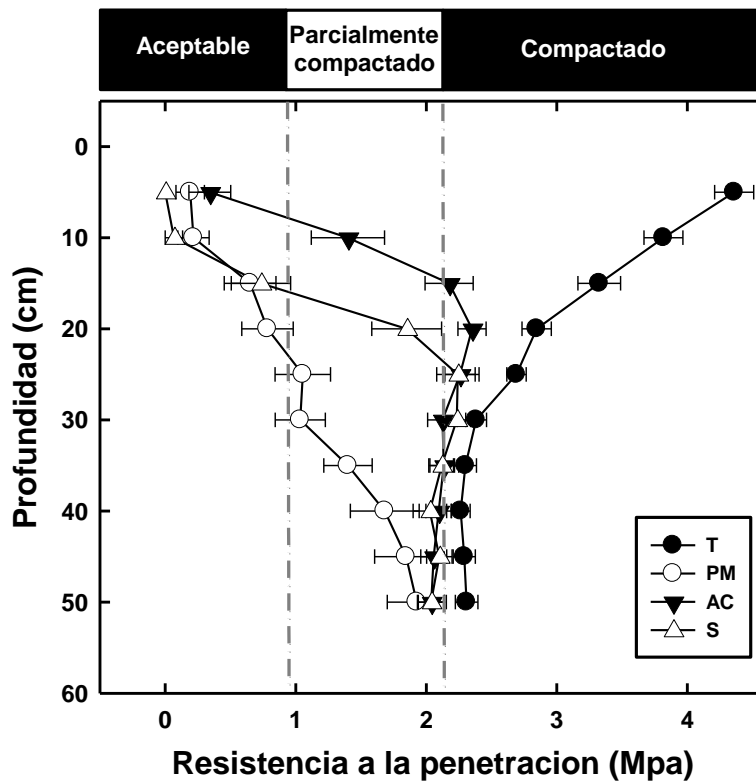


Figura 2. Efecto de distintos equipos de labranza sobre la resistencia a la penetración de un Andic Haplohumults evaluada hasta 50 cm de profundidad. San Mateo. Costa Rica. Barras de error basadas como error estándar. Ámbitos de compactación tomados de Listo (2009).

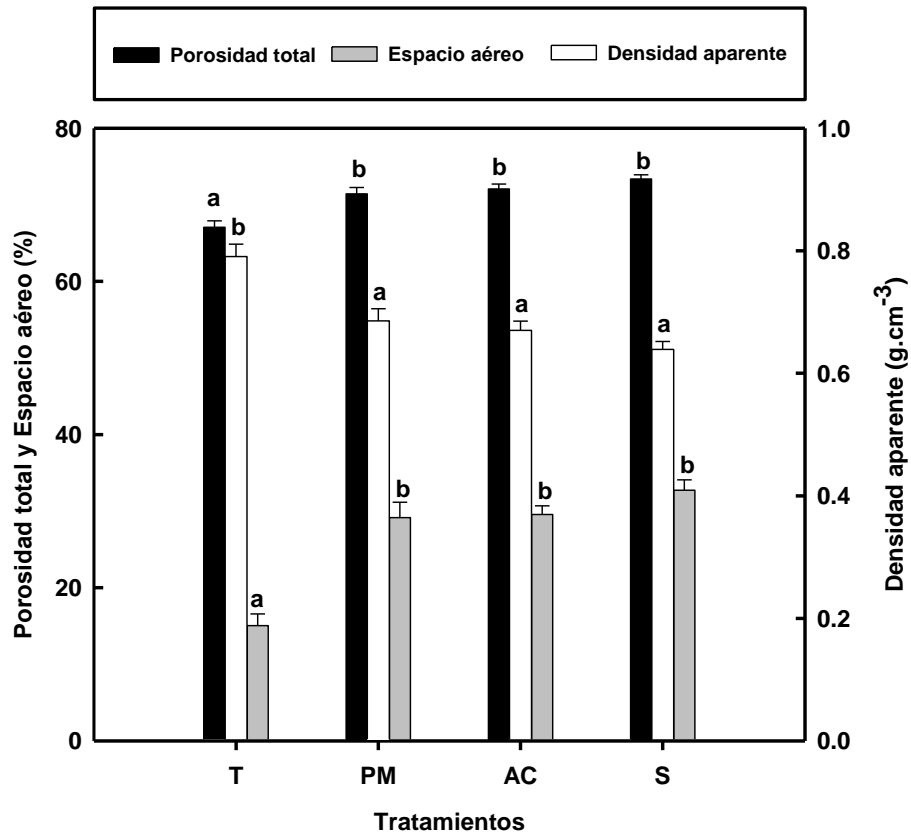


Figura 3. Efecto de distintos equipos de labranza sobre los distintos parámetros físicos de un Andic Haplohumults en los primeros 5 cm del horizonte Ap de (0- 25 cm de profundidad). San Mateo. Costa Rica. Letras distintas denotan diferencia significativa de acuerdo con prueba LSD Fisher ($p < 0,05$).

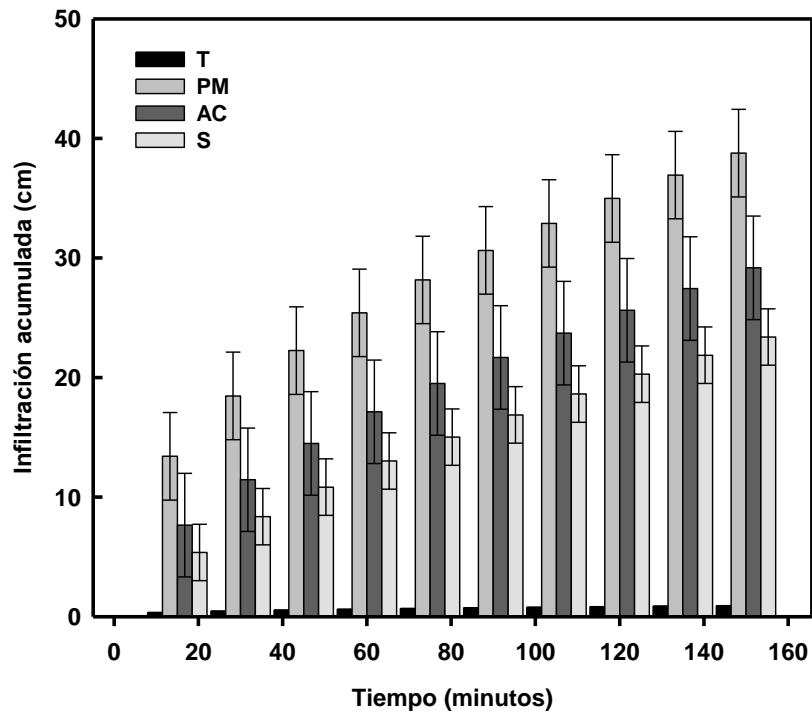


Figura 4. Efecto de distintos equipos de labranza sobre la infiltración acumulada de un Andic Haplohumults. San Mateo, Costa Rica. Barras de error estimadas como error estándar.

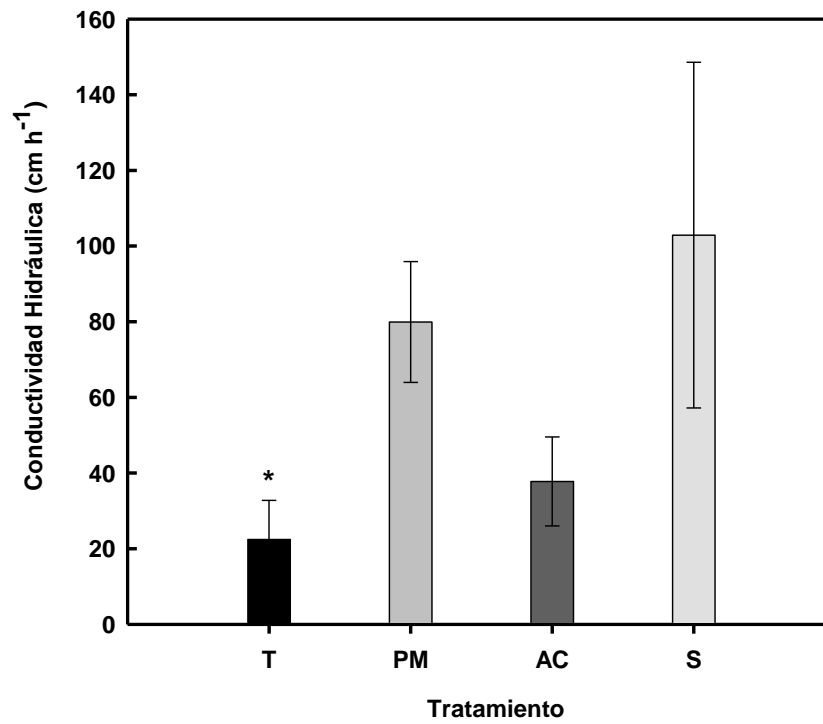


Figura 5. Efecto de distintos equipos de labranza sobre la conductividad hidráulica de un Andic Haplohumults en los primeros 0-5 cm del horizonte Ap de (0- 25 cm de profundidad). San Mateo. Costa Rica. * Sin diferencias significativas de acuerdo con prueba LSD Fisher ($p > 0,05$).

Cuadro 1. Características físicas iniciales del suelo en estudio, Higuito de San Mateo, Costa Rica.

Material Parental	Horizonte	Prof. (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	CC	PMP	Agua útil	Densidad Aparente	Densidad Partículas	Porosidad	Espacio aéreo	Conductividad Hidráulica	Resistencia a Penetración
			%				%			g cm ⁻³					
Lahares y cenizas volcánicas	Ap	0 - 23	52.5	37.5	10.0	Fa	74	73.0	1	0.86	2.27	62.1	4.5	0.58	4.1
	A2	23 - 38	50.0	40.0	10.0	F	67	48.0	19	0.74	2.34	68.4	18.8	8.65	2.7
	Bt ₁	38 - 74	20.0	25.0	55.0	A	40	31.0	9	0.98	2.52	61.1	21.9	14.87	2.7
	Bt ₂	74 - 88	17.5	17.5	64.0	A	32	26.0	6	1.27	2.39	46.9	6.2	0	1.8
	Bt ₃	88 - 120	14.4	68.0	17.6	Fl	35	27.0	8	1.06	2.61	59.4	22.3	4.8	1.8

CC= capacidad de campo; PMP= punto de marchitez permanente; AD= agua disponible; D. ap.=densidad aparente; D. part.= densidad de partículas; E A= espacio aéreo; Cond. Hidr. = conductividad hidráulica; RP=resistencia a la penetración.

Cuadro 2. Características químicas del suelo en estudio, Higuito de San Mateo, Costa Rica.

Material Parental	Horizonte	Prof (cm)	pH H ₂ O	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Mn	Cu	Fe
				cmol (+). l ⁻¹						%	mg. l ⁻¹			
Lahares y cenizas volcánicas	Ap	0 - 23	5.0	0.40	3.40	0.60	0.14	4.54	8.81	3	0.5	21	3	62
	A2	23 - 38	5.0	0.35	3.90	0.40	0.10	4.75	7.37	4	0.4	19	5	55
	Bt ₁	38 - 74	5.1	0.35	3.70	0.40	0.08	4.53	7.73	4	0.4	41	9	38
	Bt ₂	74 - 88	5.3	0.30	3.30	0.40	0.09	4.09	7.33	4	0.3	49	6	29
	Bt ₃	88 - 120	5.4	0.35	2.90	0.30	0.07	3.62	9.67	4	0.3	12	2	19

Material Parental	Horizonte	Prof (cm)	pH NaF	C	N	C/N	Ca	Mg	K	Bases	CIC.	SB
				%			cmol (+). kg ⁻¹					%
Lahares y cenizas volcánicas	Ap	0 - 23	10.9	-	-	-	6.90	0.90	0.27	8.07	22.03	36.6
	A2	23 - 38	10.8	-	-	-	7.20	0.70	0.21	8.11	21.64	37.5
	Bt ₁	38 - 74	10.2	1.5	0.1	11.8	6.80	0.60	0.20	7.60	19.81	38.4
	Bt ₂	74 - 88	10.0	0.7	0.1	7.7	5.90	0.60	0.19	6.69	20.82	32.1
	Bt ₃	88 - 120	10.1	0.4	0.1	5.7	4.30	0.50	0.18	4.98	19.73	25.2

Material Parental	Horizonte	Prof (cm)	Fe	Al	FIJ. P
			%		
Lahares y cenizas volcánicas	Ap	0 - 23	0.65	0.55	82, 50
	A2	23 - 38	0.72	0.65	81, 30
	Bt ₁	38 - 74	0, 68	0.60	80, 50
	Bt ₂	74 - 88	0, 45	0.40	79, 50
	Bt ₃	88 - 120	0, 40	0.40	77, 50

