

La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria)

Soil tillage and its impact on soil conservation (review)

Natalia Gómez-Calderón¹, Karolina Villagra-Mendoza²,
Milton Solorzano-Quintana³

Fecha de recepción: 30 de marzo de 2017
Fecha de aprobación: 3 de agosto de 2017

Gómez-Calderón, N; Villagra-Mendoza, K; Solorzano-Quintana, M. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria). *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-1. Enero-Marzo 2018. Pág 167-177.

DOI: 10.18845/tm.v31i1.3506



- 1 Docente e investigadora. Escuela de Ingeniería Agrícola. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: ngomez@itcr.ac.cr
- 2 Docente e investigadora. Escuela de Ingeniería Agrícola. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: kvillagra@itcr.ac.cr
- 3 Docente e investigador. Escuela de Ingeniería Agrícola. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: msolorzano@itcr.ac.cr

Palabras clave

Compactación; erosión por labranza; rodajes, tráfico agrícola; tipos de labranza.

Resumen

Para el año 2050, se prevé que la población será un tercio mayor a la actual. Esto se convierte en un reto para la agricultura por aumentar su producción generando el menor impacto posible al ambiente. La labranza del suelo ha permitido aumentar áreas de siembra en detrimento de su capa arable, contribuyendo a degradar en forma progresiva la superficie del suelo y facilitando la erosión. La erosión por labranza se ve influida directamente por la compactación provocada por el paso de la maquinaria. Sistemas de tráfico agrícola controlado, agricultura de precisión y rodajes alternativos han sido utilizados para minimizar los efectos de los pases de los equipos sobre el campo. En Costa Rica, la adopción de nuevas tecnologías, la selección adecuada de equipos, el respeto a la legislación vigente e investigación sobre el impacto de la labranza en la degradación del suelo, constituyen un reto para las autoridades, los productores y la academia.

Keywords

Soil compaction; tillage erosion; wheel slip; traffic farming; tillage techniques.

Abstract

It is expected that by the year 2050 population will increase one-third. This is a challenge to increase the agricultural production with the least possible impact to the environment. Soil tillage has led to increase agricultural areas at the expense of top soil, contributing to a progressively degradation of the soil surface generating soil erosion. Tillage erosion is influenced directly by the compaction caused by the passage of machinery. Controlled Traffic Farming systems (CTF), precision agriculture and alternative agricultural tires, have been used to minimize the effects of frequent-machinery-traffic. Implementation of new technologies, proper selection of agricultural equipment, compliance with current legislation and research on topics related to tillage erosion; constitute a challenge to authorities, farmers and academy in Costa Rica.

Introducción

En el mercado de productos agrícolas, el consumo de productos que generan el mínimo impacto al ambiente es actualmente un factor decisivo. Se proyecta que para el 2050 el consumo de alimentos aumentará una tercera parte con respecto al consumo actual [1]. Ante esta situación, para satisfacer la demanda y crecimiento de la población, la agricultura tiene el reto de maximizar sus recursos y utilizar tecnologías que la hagan más eficiente y sostenible con el ambiente.

La erosión del suelo es uno de los mayores procesos de degradación derivados de las labores agrícolas, lo que afecta la calidad de infiltración, capacidad de retención del agua, disponibilidad de nutrientes, contenido de materia orgánica, actividad biológica, profundidad efectiva del suelo, y su productividad [2], [3]. Se ha demostrado que la erosión por labranza es tan degradante como la erosión hídrica, ya que aumenta la susceptibilidad del suelo al romper agregados de una forma más uniforme aumentando la erodabilidad, inclusive con lluvias de baja intensidad.

El aumento de las labores agrícolas mecanizadas en Costa Rica, coincide con la intención de los productores por elevar el rendimiento de sus operaciones, redundando en aumentos de pasadas de máquinas sobre el terreno. Además, el aumento de la mecanización exige mejoras en el rendimiento de los equipos por medio de la automatización de los mecanismos y la eficiencia de los rodajes, lo cual indirectamente beneficia el manejo del suelo, aunque no hay documentación al respecto en el país. Esta revisión pretende repasar algunas prácticas existentes de mecanización que inciden en la conservación del suelo y a la vez exponer la situación actual en Costa Rica con respecto a la relación suelo-labranza.

La figura 1, esquematiza el enfoque de esta revisión. Se exponen los principales aspectos relacionados con sistemas de labranza mecanizada, enfocado en los tipos de labranza más conocidos, los efectos y la gestión del tránsito y tipo de rodajes de la maquinaria sobre el suelo.

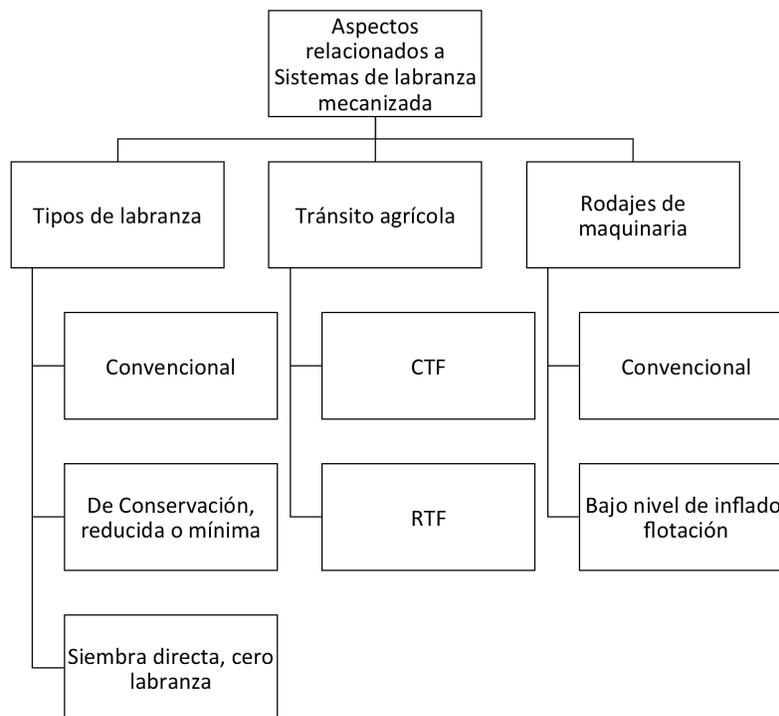


Figura 1. Esquema de estudio de los aspectos relacionados a sistemas de labranza mecanizada.

Sistemas de labranza mecanizada

La labranza tradicional (volteo y roturación superficial) ha permitido aumentar las áreas de siembra debido al incremento de la eficiencia en las labores y al mejoramiento de las propiedades del suelo en la rizosfera. Sin embargo, en condiciones desfavorables, ha contribuido con la degradación del suelo, siendo la capa arable la más afectada [4]. Se estima que el 80% de los suelos agrícolas en el mundo, presentan erosión moderada a severa y 10% erosión ligera a moderada [5]. La labranza convencional tiende paulatinamente a aumentar el desplazamiento y la densidad de los suelos, induciendo a la compactación, desestructuración y aumento de la erodabilidad, especialmente en prácticas agrícolas de nivelación, laboreo y tráfico de maquinaria pesada en condiciones de humedad alta [5]–[7].

El principal impacto de la labranza convencional en el suelo se da en la porosidad. Afecta severamente los macroporos, encargados de facilitar las interconexiones para un adecuado movimiento del agua infiltrada a través del perfil, intercambio gaseoso y de propiciar un espacio adecuado para el crecimiento de las raíces [8]. Asimismo, se da la conservación y formación de microporos, lo que beneficia el sellamiento de la superficie, creando mayor susceptibilidad a la generación de escorrentía [9]. Es por esta razón, que la labranza convencional también es evaluada por medio de la compactación.

Una forma de minimizar el impacto de la labranza convencional es la utilización de métodos de labranza menos agresivos, como la labranza reducida y la cero labranza. La labranza reducida, conservacionista o vertical, implica el uso de implementos que rompen el suelo en forma vertical sin voltearlo. Esto facilita la infiltración sin dañar la estructura del suelo, sin embargo, debido a que no se utilizan aperos afinadores del suelo, tiende a provocar problemas para la germinación de las plantas. La cero labranza o siembra directa implica la disposición de rastrojos de cosecha, lo que mejora la incorporación de materia orgánica, sin embargo, aumenta la densidad del suelo y consecuentemente la compactación de las capas superiores de éste, siendo esto un efecto negativo en la germinación de las semillas.

A pesar de que cada vez es más frecuente el uso de técnicas de labranza vertical o de siembra directa, los efectos de la compactación del suelo en la agricultura siguen impactando la disminución de la productividad, el aumento significativo de los costos de producción, y el aumento de la erodabilidad del suelo. Esto ha creado la necesidad de introducir nuevas operaciones agrícolas de elevado costo como el subsolado [10], que ayuden a revertir la compactación ocasionada.

Los parámetros de suelo usualmente utilizados para la medición de los efectos del tráfico con cargas altas sobre las propiedades del suelo son, la resistencia a la penetración y la densidad aparente, aunque esta última ha sido catalogada como menos sensible en las mediciones de la compactación en suelos de texturas finas [11]. 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 [12].

Tránsito de maquinaria agrícola

La automatización de la labranza, reduce los errores en cuanto a pasadas de maquinaria sobre las mismas áreas. Con labranza convencional, los rodajes de la maquinaria tienden a sobre transitar hasta un 86% del total del área; con labranza reducida se transita sobre el 64%, mientras que con labranza automatizada por medio de agricultura de precisión, se reduce hasta un 31% del área total [13]. Es por esta razón, que los esfuerzos por reducir la compactación del suelo no solo deben estar enfocados a utilizar implementos menos agresivos sino además a minimizar las pasadas de maquinaria sobre el terreno agrícola.

El Tráfico Agrícola Controlado (CTF, por sus siglas en inglés), es una estrategia para minimizar la compactación del suelo. Consiste en limitar el tránsito de la maquinaria a áreas definidas, sin que los neumáticos rueden sobre el terreno de producción. La aplicación del CTF, ha logrado reducir la escorrentía en un 27-42% en comparación a la estrategia no planificada de las labores de labranza, conocida como Tráfico Agrícola Aleatorio (RTF, por sus siglas en inglés) [14].

Se ha comprobado que la compactación superficial se produce por la presión en la zona de contacto rueda-suelo, pero la compactación subsuperficial es producida por todo el peso del equipo [14]; por lo tanto si el peso de un eje no sobrepasa los 49 kN, solo compactará los primeros 30 cm del perfil del suelo [12]. Es así como el tráfico de los rodajes de los equipos utilizados bajo el sistema RTF impacta en la compactación del suelo. Este sistema consiste en el paso de maquinaria sobre el campo de cultivo, muchas veces de forma intensiva, donde la

decisión de la secuencia y frecuencia de las operaciones la toma el productor, provocando desestructuración del suelo y reduciendo su porosidad efectiva [15].

En estudios del impacto del sistema RTF, en la compactación del suelo utilizando maquinaria pesada y ligera, no se evidenció diferencias significativas a nivel superficial (hasta 30 cm), pero sí a mayor profundidad, comprobando que el beneficio de utilizar maquinaria ligera radica en la reducción de pasadas [16]. Diez pases de equipos ligeros producen el mismo efecto que cuatro pases de equipos pesados. Es decir, usar equipos ligeros no garantiza que el suelo no se compacte si se realizan exceso de pasadas con la maquinaria.

Se ha indicado que para conservar el suelo en forma eficiente, se debe reducir el número de pasadas de la maquinaria agrícola sobre el terreno [5], [16]. De ahí la importancia de una selección adecuada de equipos (en cuanto a topografía, suelo, cultivo y rendimiento de la maquinaria) para evitar pases repetitivos de los equipos sobre la misma área de trabajo con maquinaria inadecuada para las condiciones de operación [13]. Sistemas como el CTF pueden llegar a generar pérdidas de suelo inferiores a 2 toneladas por hectárea por año, cantidad aceptable tomando en cuenta que el máximo tolerable de pérdidas del suelo es de 10 toneladas por hectárea por año [17]. El CTF se convirtió en una opción para incrementar el rendimiento del cultivo a partir de la reducción de la compactación del suelo [15], definiendo líneas permanentes de tráfico dentro del terreno y permitiendo operaciones de campo lo más amplias posibles sin compactar el suelo. Las máquinas usan sistemas de guía propios y pueden ser diseñados para una aplicación específica. Se pueden utilizar máquinas de amplia envergadura, "gantries", siendo la mayoría de las veces adaptaciones de equipos agrícolas convencionales. Según Rohde, K., y Yule [18], se pueden obtener reducciones en pérdidas del suelo de hasta 260% en periodos de 2,5 años, al utilizar sistemas de CTF en comparación con sistemas RTF.

La combinación de sistemas CTF y labranza reducida son una solución para minimizar el efecto de la compactación del suelo y mejorar la conservación del mismo. Unidos a la navegación satelital se logran labores agrícolas de precisión, evitando traslapes entre pases y localizando las labores agrícolas donde sean necesarias. Gradualmente, estos sistemas han reemplazado implementos agrícolas con guías mecánicas, haciendo las operaciones de campo más precisas [13].

Rodajes utilizados en maquinaria agrícola

La maquinaria agrícola y los tractores en general, ejercen una presión continua sobre el suelo. Según Ribes y Marcos [19], el primer pase de tractor es el que produce el efecto más importante en el suelo, por lo que los neumáticos y las presiones bajas de inflado son claves para prevenir la compactación. La transitabilidad puede mejorarse utilizando neumáticos anchos, lo cual disminuye la presión de inflado para una determinada carga axial. Los neumáticos de alta flotación, se caracterizan por soportar menores presiones de inflado y tener mayor anchura en relación al neumático convencional, lo que produce apoyos superiores al 25%, mejorando la tracción del equipo y haciéndolo más liviano. Al comparar la compactación causada por dos tipos de tractores (cadenas y ruedas) y dos tipos de neumáticos (convencionales y de baja presión), Ribes y Marcos [19] concluyeron que los neumáticos con baja presión de inflado, producen una compactación y huella en el suelo similar al tractor de cadenas, siendo en ambos casos, muy inferior a la provocada por los neumáticos convencionales con alta presión de inflado. Esto contribuye a evitar la compactación del suelo en los tractores con una alta relación peso / potencia y permite un uso más eficiente de los equipos en general, disminuyendo los índices de patinaje sobre la superficie. La práctica común e indiscriminada de la utilización de lastre líquido (hidrinflado) y la presión de los neumáticos más altos en suelos de secano es cuestionable [20] debido a que se aumenta el peso del tractor, ocasionando compactación del suelo y mayor consumo de combustible.

En condiciones de operación normales de la maquinaria agrícola, cuando se utiliza doble tracción, la transmisión de potencia en la rueda trasera es más eficiente que en la rueda delantera, pero la cantidad de energía desarrollada por el eje trasero es menor que la de la parte frontal debido a diferencias de carga en los ejes trasero y delanteros. Para Serrano et al [20], el uso de presiones de inflado de neumáticos más alta de lo recomendado, mostró una ligera reducción (3% -5%) en el ritmo de trabajo y un aumento significativo en el consumo de combustible por hectárea laborada (10% -25%), incluso en buenas condiciones de tracción con intervalos de patinaje del tractor entre un 7% y 15%. Esto indica que un aumento en la superficie de contacto del eje delantero utilizando neumáticos de flotación, incrementa la eficiencia del tractor mejorando su adherencia al terreno, incluso por encima de la contribución del lastrado.

Con respecto al uso de contrapesos, Serrano et al [20], demostraron que el uso del lastre líquido en los neumáticos no mejora el ritmo de trabajo, e incluso puede causar un aumento de 5% a 10% en el consumo de combustible por hectárea laborada. Aunque en general hay disminución de patinaje, el peso extra del tractor ocasiona adicionalmente al aumento en el consumo de combustible, disminuciones en el ciclo de vida útil de la máquina y compactación del suelo.

Por lo anterior, realizar prácticas de balanceo del peso del tractor para lograr disminuir el peso sin perjudicar la tracción y aumentar el área de contacto de los rodajes, es importante para mantener una adherencia adecuada de las llantas y evitar bajas eficiencias de los equipos, disminuyendo el costo económico y ambiental de la labranza mecanizada.

Prácticas de labranza en Costa Rica

Se estima que el 42% de los suelos en Costa Rica sufren algún grado de erosión. Un 60% de éstos presenta erosión moderada y un 18% presenta erosión severa a muy severa [21]. En partes altas y medias de cuencas como las de los Ríos Pirrís o Reventazón, las actividades agrícolas intensivas se desarrollan en fuertes pendientes (entre 30-60%) las cuales se consideran, de acuerdo a su capacidad de uso, no apropiadas para fines agrícolas. Métodos de labranza inapropiados en combinación con lluvias fuertes e intensas, son la fuente principal de aporte de sedimentos a zonas de menor hipsometría. El suelo perdido en estas zonas, afecta la productividad y produce un impacto ambiental a nivel de cuenca [2], [22].

En América Latina existe poca información que permita asociar la labranza mecanizada con las pérdidas de suelo por erosión. Algunas evidencias de estudios realizados en laderas de Venezuela y Ecuador, señalan que la mecanización es una de las variables más importantes al evaluar pérdidas por erosión [23].

Según FAO [24], los sistemas de labranza son responsables de 28% de la degradación de suelos en Costa Rica. Esto debido principalmente al uso de sistemas de labranza convencionales, las cuales pulverizan la capa arable del suelo [23], [25]. Mehuys et al [23], indican que en Costa Rica la erosión por labranza puede ser controlada modificando las prácticas de mecanización de suelos, reduciendo la frecuencia de las operaciones de labranza, adoptando sistemas de cultivo de labranza reducida o mediante el uso de rotaciones prolongadas con cultivos que requieren menos labranza. En Costa Rica, la mayor cantidad de maquinaria de labranza mínima y siembra directa en Costa Rica, es adquirida para el uso en cultivos de arroz y actividades de ganadería en la siembra de alimentos para animales como pastos, sorgo, maíz.

Suelos inceptisoles y molisoles, como los que predominan en la región Chorotega, sufren una considerable degradación del suelo bajo sistemas RTF, originando niveles altos de compactación por encima de los 2.0 MPa [26], [27]. En estas áreas predomina la actividad azucarera, por lo que es importante fortalecer los criterios para la gestión adecuada de los sistemas de mecanización [28]. Actividades como la piña y el arroz han realizado inversiones

considerables en cuanto a sistemas y tecnologías de control de tránsito sobre el suelo. A pesar de que se ha invertido fuertemente en sistemas de agricultura de precisión, es importante reforzar la importancia de sistemas de tráfico agrícola controlado (CTF) y tipos de rodajes más adecuados para lograr una menor degradación del suelo y por ende mejorar la productividad.

Según una encuesta realizada en 2015 por la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Comité Agrícola Cantonal de Oreamuno, en la Zona Norte de Cartago el 90% de los productores agrícolas preparan el suelo con tractores. La frecuencia de mecanización es alta (2 o 3 veces por año), lo que se evidencia un uso intensivo de la maquinaria propiciando degradación del suelo sino se utilizan adecuadamente los equipos (figura 2). De los productores encuestados, el 60,2% asegura no haber recibido asesoría en técnicas de conservación de suelos y el 80,7% indica tener conocimiento nulo sobre el término o tecnologías de agricultura de precisión. Esto refleja un bajo nivel de conocimiento en cuanto a técnicas de conservación del suelo, principalmente en el uso de equipos de labranza adecuados. En esta zona, los productores prefieren utilizar implementos de corte y desestructuración del suelo como el rotador, arado rotativo, el *rotoking* y el arado de discos. Este último, es uno de los implementos más utilizados durante la época preparación del suelo [23]. Se ha demostrado que este implemento es capaz de mover cantidades significativas de suelo a largas distancias (hasta 7,6 m). Sin embargo, al preparar el suelo a favor de la pendiente, el movimiento del suelo puede llegar a ser hasta 2,5 veces mayor [23]. Esta forma de mecanización incide negativamente en la generación de escorrentía y consecuentemente en las pérdidas por erosión, además, impacta la capacidad de reservorios, estabilidad de caminos, capacidad hidráulica de los ríos, capacidad productiva del suelo, entre otros; traducido en un costo social y económico muy alto [29]. A pesar de que en los últimos años se introdujo la azada mecánica, su uso es limitado y los productores continúan prefiriendo los aperos anteriormente mencionados. Villalobos et al [30] determinaron que el uso de palín o azada mecánica mejora los rendimientos en algunas hortalizas, incrementa la velocidad de infiltración del agua y rompe el piso de arado. Esto genera efectos positivos ante la reducción de la escorrentía y consecuentemente para la cantidad de suelo erosionado.

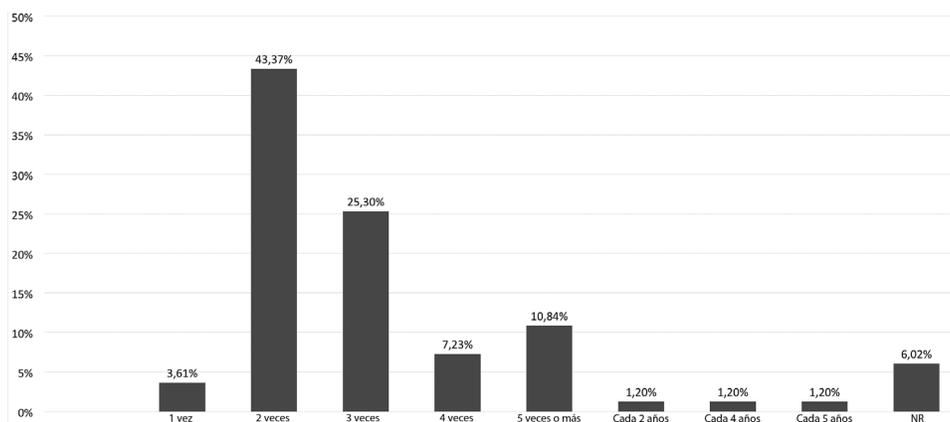


Figura 2. Frecuencia de labranza mecanizada en la Zona Norte de Cartago, Costa Rica.

La legislación vigente en Costa Rica, la Ley 7779 (Uso, Manejo y Conservación de Suelos), regula los procesos de labranza en el país. En ella, se consideran aptos para la labranza los equipos cuya potencia sea inferior a 100 HP, tractores de alta flotación (llantas de baja presión de inflado) o de rodajes de cadenas (oruga) de aplicación especial. Los implementos que la ley

reconoce como adecuados para la labranza, son los que trabajan el suelo verticalmente y no recomienda los implementos de corte y volteo. A pesar, de las disposiciones de la ley, no existe en la práctica regulación o restricción sobre la venta de estos implementos.

Esta legislación no especifica el peso máximo de la maquinaria tolerable por eje, parámetro decisivo en mediciones de patinaje y compactación de suelos por encima de la potencia del tractor o su peso total. Prácticas como el balanceo estático, con ayuda de una balanza portátil (figura 3) para un lastre adecuado de la máquina, pueden mejorar la distribución de las cargas indistintamente de la categoría del tractor. En Costa Rica cada vez es más común el uso de neumáticos de alta flotación, con el fin de aumentar el rendimiento económico de las operaciones, lo que indirectamente mejora porcentajes de patinaje y tracción de la maquinaria. Esta práctica requiere documentación científica, adicional a la económica, que respalde los beneficios en las propiedades del suelo. El acceso a nuevas tecnologías disponibles en el mercado, la evolución de la gestión de los activos que amparan un buen manejo de recursos y la demanda real de equipos de alta eficiencia en los sistemas de producción agrícola, requieren una actualización urgente de la legislación actual para mejorar la regulación de los equipos utilizados en el campo, y la capacitación y actualización del personal que promueva un salto tecnológico de la agricultura en Costa Rica.

Actualmente existe muy poca investigación e información disponible del impacto de la mecanización en la degradación del suelo, sistemas de tráfico agrícola sobre el terreno y selección adecuada de implementos y tractores en función de variables como pendiente y propiedades del suelo. Por tradición, las potencias de los equipos utilizados en Costa Rica se seleccionan según lo históricamente definido para una operación de campo, por lo que normalmente el rendimiento de los motores y sistemas de transmisión es desaprovechado por desconocimiento de los tecnologías actuales de gestión de potencia, que justifica el uso de tractores de potencias nominales menores a la usada en los años ochentas y noventas. Esto permitiría una mejor eficiencia de la máquina en cuanto a condiciones de operación, consumo de combustible y capacidad de tracción de implementos, con la ventaja de adquirir equipos más livianos y de un menor costo. La tecnología de gestión de potencia en la maquinaria agrícola disponible actualmente en Costa Rica, desvirtúa la selección de equipos basado solamente en un criterio de potencia neta o bruta del tractor.



Figura 3. Práctica de balanceo estático para un lastrado correcto de tractor agrícola para un cultivo de piña en Muelle de San Carlos (Foto cortesía: MATRA)

La actividad agrícola, en general, debe apostar con mayor ímpetu hacia una agricultura con tecnologías de precisión que ayuden a controlar del tránsito sobre el suelo por medio de la reducción de pasadas y traslapes. El alcance a estas opciones de mecanización se ven limitadas por el desconocimiento, escasez de estudios sobre el retorno de la inversión en sistemas automatizados para la producción y la resistencia al cambio de algunos productores, por encima de limitantes topográficas y de extensiones de áreas de producción. Es necesario

que la academia y el sector agrícola en general, se unan para no solo generar información a nivel local sobre el impacto de la labranza en el suelo, sino también para capacitar tanto a productores, operadores y tomadores de decisiones en la selección adecuada y el estudio de las necesidades específicas de los tractores agrícolas.

Conclusiones

La labranza mecanizada juega un papel importante en la degradación del suelo. La agricultura de precisión en conjunto con los sistemas de Tráfico Agrícola Controlado (CTF) y la labranza reducida, benefician la agricultura mecanizada, ya que contribuyen a la reducción de la compactación del suelo, reducen las pérdidas del suelo y aumentan los rendimientos del cultivo. Además, el uso alternativo del rodaje, recomendaciones acerca del lastrado de las ruedas, recomendaciones de uso de neumáticos de baja presión de inflado y pesos adecuados por eje de la maquinaria, constituyen una opción de bajo costo para reducir la compactación del suelo y aumentar la eficiencia de los tractores agrícolas.

Es necesario, generar experiencias y conocimientos sobre el impacto de la labranza, índices de patinaje de llantas y distribución de pesos de maquinaria en la estabilidad del recurso suelo en Costa Rica que sirvan para seleccionar implementos de labranza adecuados para cada labor y tipo de suelo. Adicionalmente, se debe generar conocimiento acerca de selección y operación correcta de los equipos de acuerdo a la tecnología disponible en el país, que genere beneficios económicos y ambientales a las producciones agrícolas, independientemente de las extensiones de terreno en las que se desenvuelvan.

La legislación costarricense debe ampliar las consideraciones en cuanto a requerimientos de maquinaria agrícola para la conservación del suelo y considerar la apertura a técnicas y tecnologías que reduzcan la compactación de suelos, tales como agricultura de precisión, CTF y labranza reducida. Esta ley debe ser fiscalizada de manera enérgica y se debe regular la fabricación, importación y uso de los implementos no recomendados para la conservación del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas Agromec, Craisa, Matra y Tecnoagrícola por la información brindada acerca de las tecnologías que se ofrecen en el mercado nacional, y al Centro Agrícola Cantonal de Oreamuno por la colaboración en la encuesta realizada en la Zona Norte de Cartago.

Referencias

- [1] I. García, “Aplicaciones de la robótica en la agricultura, desarrolladas en Holanda”, *Vida Rural*, núm. 366, pp. 16–19, 2013.
- [2] F. Á. Sánchez, H. G., Marín, E. C., & Mejía, “Impacts and plan of environmental management of the conventional tillage”, *CES Med. Vet. y Zootec.*, vol. 3, núm. 1, pp. 36–40, 2008.
- [3] K. Van Oost, G. Govers, y P. Desmet, “Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage”, *Landsc. Ecol.*, vol. 15, pp. 577–589, 2000.
- [4] FAO, “Estrategia de mecanización agrícola”, *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/ags/mecanizacion-agricola/estrategia-de-mecanizacion-agricola-ema/es/>. [Consultado: 12-feb-2014].



- [5] B. P. Cadena, D. Egas, H. Ruiz, J. Mosquera, y O. Benavides, "Efecto de cinco sistemas de labranza, en la erosión de un suelo vitric haplustand, bajo cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.).", *Rev. Ciencias Agrícolas*, vol. 29, núm. 2, pp. 116–128, 2012.
- [6] G. Montenegro y D. Malagón, *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá, Colombia, 1990.
- [7] L. O. Brandsæter, A. K. Bakken, K. Mangerud, H. Riley, R. Eltun, y H. Fykse, "Effects of tractor weight, wheel placement and depth of ploughing on the infestation of perennial weeds in organically farmed cereals", *Eur. J. Agron.*, vol. 34, núm. 4, pp. 239–246, may 2011.
- [8] D. K. Cassel y L. A. Nelson, "Spatial and temporal variability of soil physical properties of norfolk loamy sand as affected by tillage", *Soil Tillage Res.*, vol. 5, núm. 1, pp. 5–17, mar. 1985.
- [9] González-Peñaloza, A. Félix, A. Cerdà, L. M. Zavala, A. Jordán, A. Giménez-Morera, y V. Arcenegui, "Do conservative agriculture practices increase soil water repellency? A case study in citrus-cropped soils", *Soil Tillage Res.*, vol. 124, pp. 233–239, ago. 2012.
- [10] M. C. Ulloa, *Aplicaciones de las Sondas Electromagnéticas y de Neutrones en la Ingeniería Agrícola*. 2011.
- [11] L. Alakukuu, "Properties of fine textured subsoils as affected by high axle load traffic. In: Academic Dissertation: Longterm soil compaction due to high axle load traffic.", Institute of Crop and Soil Science. Agricultural Research Centre of Finland, 1997.
- [12] A. M. Terminiello, R. H. Balbuena, J. A. Claverie, y J. P. Casado, "Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola", *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 4, núm. 2, pp. 290–293, 2000.
- [13] M. Kroulík, Z. Kvíz, F. Kumhála, J. Hůla, y T. Loch, "Procedures of soil farming allowing reduction of compaction", *Precision Agriculture*, vol. 12, núm. 3, pp. 317–333, 2011.
- [14] V. Gasso, C. a. G. Sørensen, F. W. Oudshoorn, y O. Green, "Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts", *Eur. J. Agron.*, vol. 48, pp. 66–73, jul. 2013.
- [15] G. D. Vermeulen, J. N. Tullberg, y W. C. T. Chamen, "Soil Engineering", vol. 20, A. P. Dedousis y T. Bartzanas, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 101–120.
- [16] D. Jorajuria y L. Draghi, "Sobrecompactación del suelo agrícola parte I: influencia diferencial del peso y del número de pasadas", *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 4, núm. 3, pp. 445–452, 2000.
- [17] F. Castilla, "Siembra Directa. La elegida para conservar el suelo: Una decisión agronómica que combina rotación de cultivos, fertilizantes y agricultura de precisión para aumentar la producción y preservar los recursos naturales", *RIA. Rev. Investig. Agropecu.*, vol. 39, núm. 2, pp. 118–123, 2013.
- [18] D. Rohde, K., & Yule, "Soil compaction and controlled traffic farming research in Central Queensland", *ISTRO*, vol. 16, pp. 1020–1027, 2003.
- [19] J. G. Ribes y N. Marcos, "Estudios de compactación de suelos : neumáticos y tractores", *Vida Rural*, pp. 48–52, 2005.
- [20] J. M. Serrano, J. O. Peça, J. R. Silva, y L. Márquez, "The effect of liquid ballast and tyre inflation pressure on tractor performance", *Biosyst. Eng.*, vol. 102, núm. 1, pp. 51–62, 2009.
- [21] M. Chinchilla, A. Alvarado, y R. Mata, "Capacidad de las tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirrís, los Santos, Costa Rica.", *Agron. Costarric.*, vol. 35, núm. 1, pp. 109–130, 2011.
- [22] M. Vega, J. M. Febles, N. M. B. Amaral, y A. T. X. Lastra, "Aplicación del modelo MMF en la evaluación de la erosión de los suelos en las alturas cársicas del distrito pecuario ' Nazareno '", núm. Insmet 2012, pp. 67–73, 2013.
- [23] G. R. Mehuys, K. H. D. Tiessen, M. Villatoro, F. Sancho, y D. A. Lobb, "Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica", *Agron. Costarric.*, vol. 33, núm. 2, pp. 205–215, 2009.
- [24] FAO, "Food for all", *Word food summit - Agricultural Machinery Worldwide*, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x0262e/x0262e08.htm>. [Consultado: 14-abr-2014].
- [25] CADETI, "Informe de costa rica para la implementación de la convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación", San José, Costa Rica, 2000.
- [26] M. Morales y M. Rojas, "Compactación de suelo y producción de caña de azúcar", *LA/CA*, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:DvJT17JGB6UJ:https://www>.

laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet%3Fc%3D443%26s%3D2341%26d%3D9016+&cd=4&hl=es-419&ct=clnk. [Consultado: 13-abr-2014].

- [27] USDA, "Soil Survey Manual", U.S. Department of Agriculture Handbook 18, 1993.
- [28] B. Bangita y B. K. R. Rao, "Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (*Saccharum spp.*) under zonal tillage system", *Geoderma*, vol. 189–190, pp. 351–356, nov. 2012.
- [29] R. Vignola, T. Koellner, R. W. Scholz, y T. L. McDaniels, "Decision-making by farmers regarding ecosystem services: Factors affecting soil conservation efforts in Costa Rica", *Land use policy*, vol. 27, núm. 4, pp. 1132–1142, oct. 2010.
- [30] M. Villalobos-Araya, I. Guzmán-Arias, y C. Zúñiga-Pereira, "Evaluación de tres tipos de labranza en el cultivo de la papa (*Solannum tuberosum*)", *Tecnol. en Marcha*, vol. 22, pp. 40–50, 2009.