

Evaluación preliminar de los esfuerzos inducidos en el suelo por los equipos de cosecha y transporte de caña de azúcar

Luis Arnoby Rodríguez, Jaime Alberto Urbano, Jorge Torres*



Medición de esfuerzos en el suelo utilizando el Cenisensor.

Introducción

La compactación del suelo durante la cosecha es uno de los mayores problemas que afronta el cultivo de la caña, especialmente cuando la labor se efectúa en épocas húmedas. El peso de los equipos y los correspondientes esfuerzos causados afectan la condición del suelo, el desarrollo del cultivo y la producción. La compactación de los suelos agrícolas resulta en un incremento de su densidad y es una consecuencia directa de los esfuerzos que ejercen las máquinas en su tránsito sobre el campo. Además de los daños al suelo por compactación, el tránsito de las máquinas y equipos origina daños por deformación de la superficie del suelo y pisoteo directo al cultivo que pueden resultar en disminuciones de la producción de caña por hectárea hasta de 42% en las áreas afectadas por el tráfico (Torres y Villegas, 1993).

Regularmente, la compactación se evalúa a través de las propiedades físicas del suelo como: densidad aparente, porosidad, resistencia a la penetración y permeabilidad. Otra alternativa es la medición de los esfuerzos por medio de sensores que se colocan dentro de la masa de suelo a la profundidad deseada y bajo la ruta de las llantas. Los sensores realizan un registro absoluto e instantáneo de la magnitud de los esfuerzos causados al paso de las máquinas, y dichos registros constituyen un buen indicador de la magnitud de la compactación inducida. Se considera que las propiedades físicas del suelo se afectan adversamente cuando los esfuerzos de contacto son superiores a 200 kPa. En determinaciones realizadas en Cuba, González y Rodríguez (2002) encontraron que en el transporte de caña los esfuerzos son superiores a 300 kPa y pueden llegar a 500 kPa.

El presente trabajo hace parte del proyecto “Evaluación de la compactación causada por los equipos de cosecha y transporte de caña” y se realizó con el objetivo de cuantificar de manera preliminar los esfuerzos y la compactación causados por los vagones HD 20000 y los vagones de autovolteo durante la cosecha mecánica.

* Respectivamente: Ingeniero Mecánico, Ph.D., Asesor en Mecanización Agrícola <larodriguez@cenicana.org>; Ingeniero Agrícola, Investigador Temporal en Mecanización Agrícola <jaurbano@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director del Programa de Agronomía <jtorres@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

Metodología

La evaluación se llevó a cabo en un suelo Manuelita (Fluventic Haplustolls) de familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0, suerte 4 de la hacienda San José Garcés del Ingenio Providencia, localizada en el municipio de Buga, Valle del Cauca.

Durante la cosecha mecánica la cosechadora y el vagón transitan dos veces por el mismo entresurco, motivo por el cual se realizaron mediciones antes de iniciar el proceso de cosecha y después del segundo pase de cada máquina o equipo por los entresurcos seleccionados en el campo. Para la medición de los esfuerzos y la compactación inducida por cada equipo se siguió el siguiente procedimiento:

1. Muestreo previo a la cosecha para determinar el contenido de humedad del suelo a las profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. Se realizó en un entresurco seleccionado en el campo por cosechar.
2. En el mismo entresurco, medición de la resistencia a la penetración con un penetrógrafo de cono antes del primer pase de la cosechadora. El penetrógrafo de cono (Figura 1) registra, sobre una plantilla de papel, la resistencia que presenta el suelo a la penetración de una varilla con punta de cono estandarizado de 30° y 12.7 mm de diámetro de base. Las mediciones se realizaron cada 20 cm a lo ancho del entresurco y con intervalos de 10 cm hasta 70 cm de profundidad para obtener así una matriz de datos que reflejara el comportamiento del suelo debajo de la huella de la llanta al paso de los equipos sobre la superficie.
3. Cosecha de los dos surcos aledaños al entresurco.
4. Medición de la resistencia a la penetración en el entresurco, con el penetrógrafo, después del segundo pase de la cosechadora.
5. Paso del conjunto tractor-vagón cargado con caña y medición de los esfuerzos a 10 cm de profundidad en el entresurco utilizando el sensor desarrollado por Cenicaña (Cenisensor). Éste es un dispositivo hidráulico (Figura 1) que se inserta a la profundidad deseada en el entresurco de prueba. La presión interior del sistema aumenta a medida que el sensor es pisado o presionado en su cara superior; un transductor de presión y un *datalogger* permiten el registro de los esfuerzos causados a dicha profundidad por efecto del tráfico de cargas en la superficie.
6. Medición de la resistencia a la penetración después del pase del conjunto tractor-vagón.

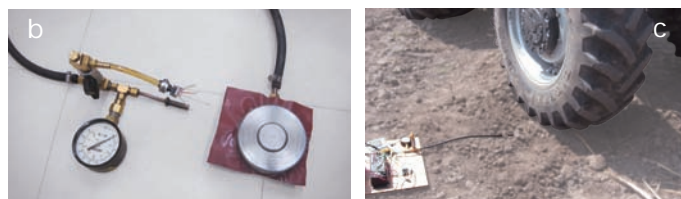


Figura 1. Instrumentación utilizada para la evaluación de la compactación de suelos: (a) Medición de resistencia a la penetración con penetrógrafo de cono, (b) Cenisensor y (c) Medición de esfuerzos.

La cosecha y la prueba se efectuaron con los siguientes equipos:

- Cosechadora:
- Cameco CHT3500, rodamiento sobre orugas, peso: 17.5 t.
- Vagón de autovolteo:
- Volumen: 25 m³, capacidad: 9.5 t con caña picada, peso propio: 7.6 t
 - Dos ejes y punto de apoyo en la barra de tiro del tractor.
 - Llantas: 600/50-22.5, presión de inflado: 317 kPa (46 psi).
- Vagón HD 20000:
- Volumen: 60 m³, capacidad: 22 t con caña picada, peso propio: 12.8 t
 - Tres ejes, llantas: 560/80D26, presión de inflado: 262 kPa (38 psi).
- Tractores:
- Case IH 9130. Articulado, peso: 9.6 t, llantas: 23.1-32

Resultados

Contenido de humedad del suelo

La resistencia a la penetración es una medida indirecta del grado de compactación de un suelo y está relacionada con el contenido de humedad. Un suelo húmedo normalmente presenta valores bajos de resistencia a la penetración debido a su menor dureza y, de manera opuesta, un suelo seco presenta una mayor resistencia a la penetración. En la Figura 2 se muestra el contenido de humedad en el perfil del suelo al momento de las pruebas; el contenido de humedad fue alto como resultado de las precipitaciones ocurridas en los días previos a la cosecha.

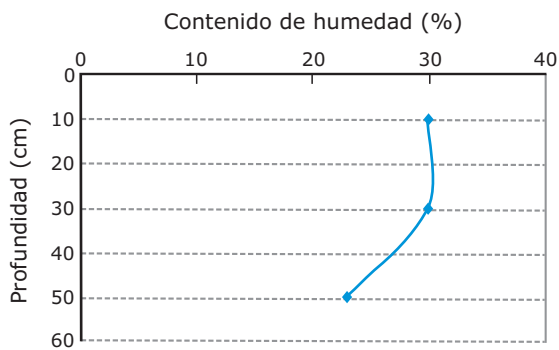


Figura 2. Variación del contenido de humedad del suelo en el lote de prueba, suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

Esfuerzos dentro de la masa de suelo

La variación de los esfuerzos en función del tiempo al paso del conjunto tractor-vagón de autovolteo se muestra en la Figura 3. Los mayores valores coinciden con el paso de los ejes de los equipos. El tractor Case IH 9130, con peso aproximado de 10 t, diseño articulado y llantas 23.1x32, distribuye el 60% de su peso sobre el eje delantero y el 40% sobre el eje trasero. Esta máquina causó esfuerzos sobre el suelo a 10 cm de profundidad de 260 kPa al paso del eje delantero y de 160 kPa al paso del eje trasero. El vagón de autovolteo, por su diseño y por la posición de los ejes, transfiere parte de su peso a la barra de tiro del tractor y debe causar reacciones similares sobre sus ejes. Este vagón, con llantas infladas a 46 psi, registró esfuerzos cercanos a 300 kPa al paso de ambos ejes, producto de reacciones próximas a 7.5 toneladas sobre cada eje del vagón.

La Figura 4 corresponde al registro de los esfuerzos causados por el vagón HD 20000 cuya distribución de carga se aproxima a 9.5 t en el eje delantero y 12.4 t sobre los ejes posteriores. Este vagón estaba equipado con llantas 560/80D26 que generan superficies de contacto cercanas a 2300 cm². A 10 cm de profundidad se registraron esfuerzos de 275 kPa al paso del tren delantero y de 375 kPa en el eje trasero.

Al comparar las Figuras 3 y 4 se observa que el vagón de autovolteo ejerce menores esfuerzos sobre el suelo debido a su menor peso, menor capacidad de carga y por la mayor transferencia de peso hacia el tractor a través de su barra de tiro rígida. Las llantas (600/50-22.5) que se usan en los vagones de autovolteo generan un área de contacto próxima a 1900 cm²; aunque tienen mayor ancho de sección, son de bajo perfil por su razón de aspecto del 50% (razón entre la altura y el ancho de la sección de la llanta). Esta condición, además de afectar la flotación de la llanta, dificulta el rodamiento por atascamiento con barro y adherencia de los residuos de caña. La llanta 560/80D26 de los vagones HD 20000, aunque es de menor sección, es más favorable por su mayor área de contacto, según los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones de

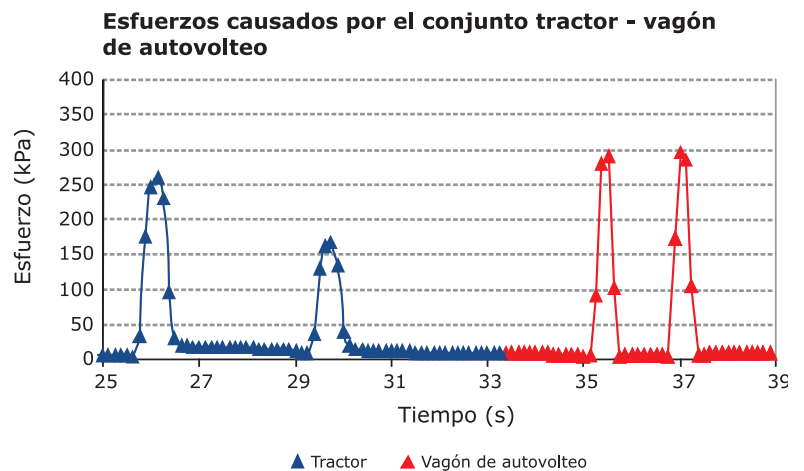


Figura 3. Registro de los esfuerzos causados por el conjunto tractor-vagón de autovolteo a 10 cm de profundidad. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

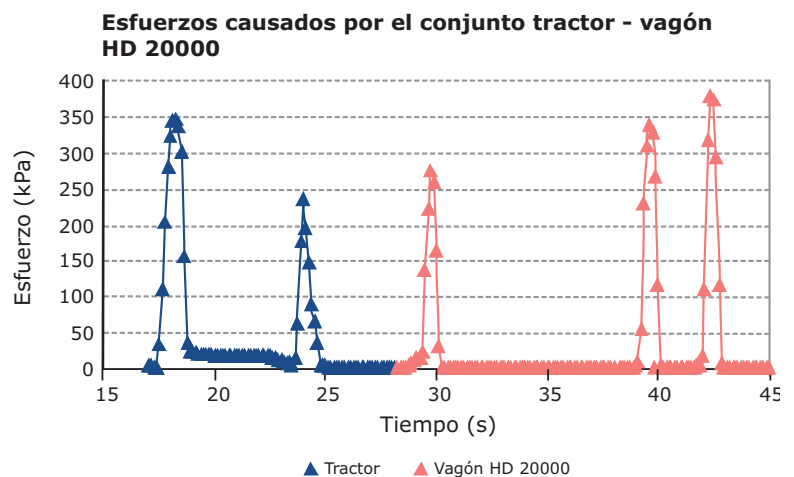


Figura 4. Registro de los esfuerzos causados por el conjunto tractor-vagón HD 20000 a 10 cm de profundidad. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

predicción de superficies y esfuerzos de contacto en llantas agrícolas (González, *et al.*, 2007). Los tractores utilizados en las dos pruebas fueron del mismo modelo y marca; sin embargo, los esfuerzos registrados fueron diferentes debido a que las transferencias de peso fueron diferentes por la naturaleza y magnitud de las cargas que manejó cada tractor durante las evaluaciones. La posición y la altura de los puntos de enganche y de las barras de tiro también pudieron influir para que las transferencias de peso y las cargas dinámicas sobre los ejes de los tractores fueran diferentes.

Resistencia a la penetración

Condición previa a la cosecha. La resistencia a la penetración (Mpa) medida antes del tráfico de los equipos se muestra en la Figura 5. En la capa superficial de 0 cm a 20 cm, la compactación acumulada durante el ciclo del cultivo mostró valores entre 0 MPa y 1 MPa; a profundidades mayores que 15 cm el suelo estaba más compacto y presentó valores de resistencia a la penetración en el rango de 1 MPa a 2 MPa. En la mayor parte del perfil del suelo la resistencia a la penetración está en un rango de valores tolerables, con medidas inferiores a 3.2 MPa, valor considerado como límite a partir del cual se afecta el crecimiento de las raíces (Draghi, 2005; Torres y Rodríguez, 1995).

Compactación inducida por la cosechadora. Las cosechadoras de un surco pisan dos veces sobre el mismo entresurco a medida que avanza la cosecha; por esta razón, la evaluación de la compactación causada por la cosechadora se hizo midiendo la resistencia a la penetración después del segundo pase de la máquina. La distribución de los valores de resistencia a la penetración en el perfil del suelo se muestra en la Figura 6. Al pasar la cosechadora se incrementó la magnitud de la compactación en todo el perfil y aunque aumentó la sección compactada en el rango de 2 MPa a 3 MPa, la compactación en el perfil del suelo se mantuvo en valores moderados debido a que las orugas distribuyen la carga sobre una superficie mayor a la que generan las llantas, dando como resultado menor presión de contacto. Se estima que las cosechadoras pesan entre 17 t y 18 t, generan las superficies de contacto rectangulares con áreas entre 2.2 m² y 2.7 m² que garantizan la condición deseable de presiones o esfuerzos de contacto inferiores a 100 kPa (Torres y Rodríguez, 1995).

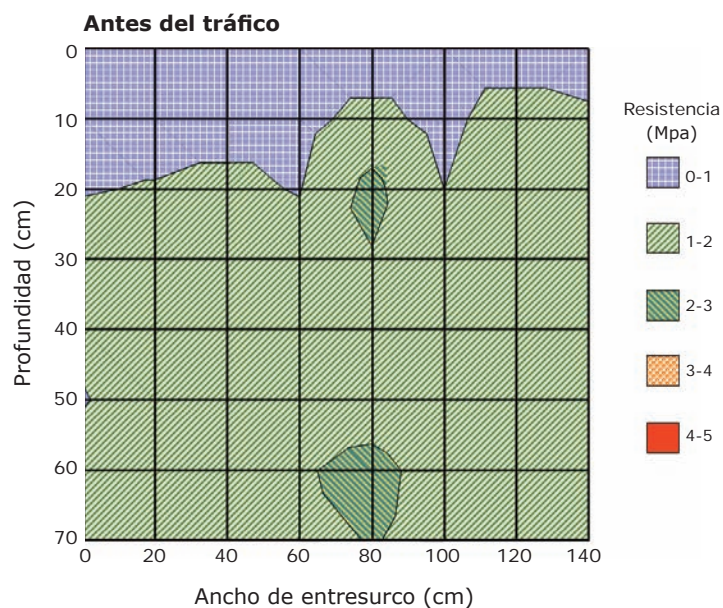


Figura 5. Distribución de la resistencia a la penetración previa al tráfico de maquinaria de cosecha. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

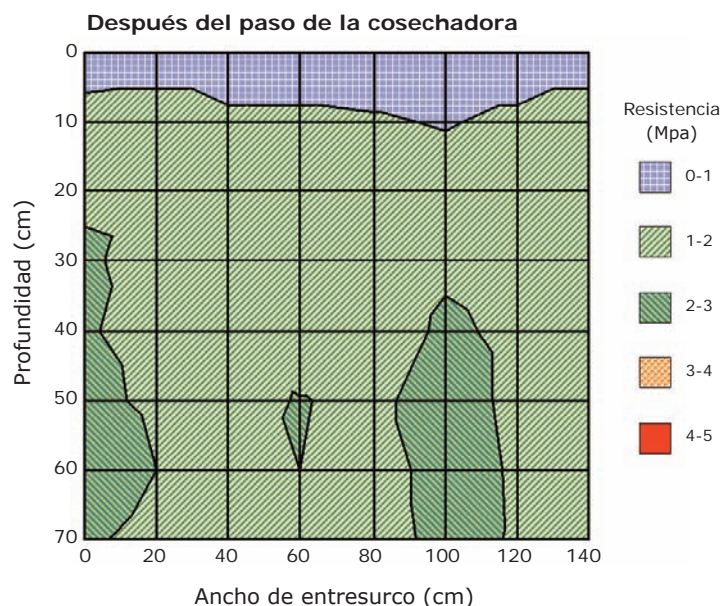


Figura 6. Distribución de la resistencia a la penetración después del segundo pase de la cosechadora. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

Compactación inducida por el vagón de autovolteo. El tráfico durante la cosecha concluye con un segundo pase del conjunto tractor-vagón. En la Figura 7 se muestra la resistencia a la penetración medida después del pase del conjunto tractor-vagón de autovolteo. La capa compactada, con valores de resistencia a la penetración en el rango de 2 MPa a 3 MPa y ubicada por debajo de 40 cm de profundidad, se extendió a lo ancho del entresurco. Esta compactación en el subsuelo es ocasionada por las altas cargas por eje y sólo se puede eliminar con labranza profunda.

Cabe anotar que en el Ingenio Carmelita se registraron con báscula las cargas en cada llanta de vagones "Milenio" llenos con caña picada y se determinaron cargas de 11 t/eje (Rodríguez, *et al.*, 2007). Se considera que 6 t/eje es la carga límite hasta la cual los daños por compactación del subsuelo son mínimos cuando se usan equipos con enllantado sencillo. Para equipos de enllantado dual el límite está entre 8 t y 10 t (Keller y Arvidsson, 2004; Balbuena, *et al.*, 2000).

Compactación inducida por vagones HD 20000. Estos vagones pueden transportar hasta 22 t de caña picada, pesan alrededor de 13 t y generan sobre sus ejes traseros cargas cercanas a 12 t. Las mediciones de la resistencia a la penetración realizadas después del paso del vagón HD 20000 se muestran en la Figura 8; es notable el incremento en los valores de resistencia a la penetración con respecto al pase de la cosechadora. La resistencia a la penetración aumenta gradualmente desde la superficie hasta alcanzar valores superiores a 5 MPa a partir de los 50 cm de profundidad, donde la compactación es mayor y es el resultado de la carga por eje transportada por el vagón.

Compactación acumulada. La compactación del suelo aumenta gradualmente durante el desarrollo del cultivo y se incrementa drásticamente durante la cosecha por el tráfico de la maquinaria. En la Figura 9 se muestran los cambios de la resistencia a la penetración según la profundidad, después del tránsito de los equipos. En la medición realizada antes de la cosecha se registra la compactación acumulada durante el período del cultivo que, de hecho, incluye los efectos de la mecanización y los procesos de expansión-contracción causados por los cambios en el contenido de humedad del suelo.

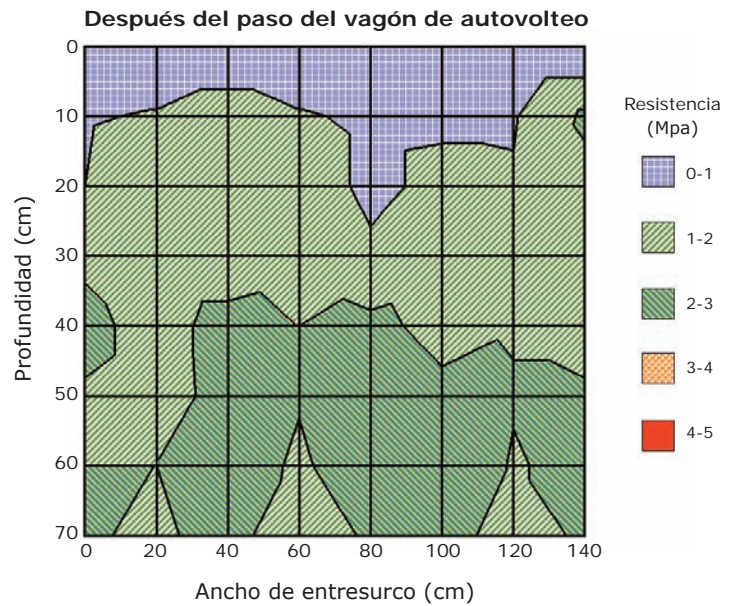


Figura 7. Distribución de la resistencia a la penetración después del paso del vagón de autovolteo. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

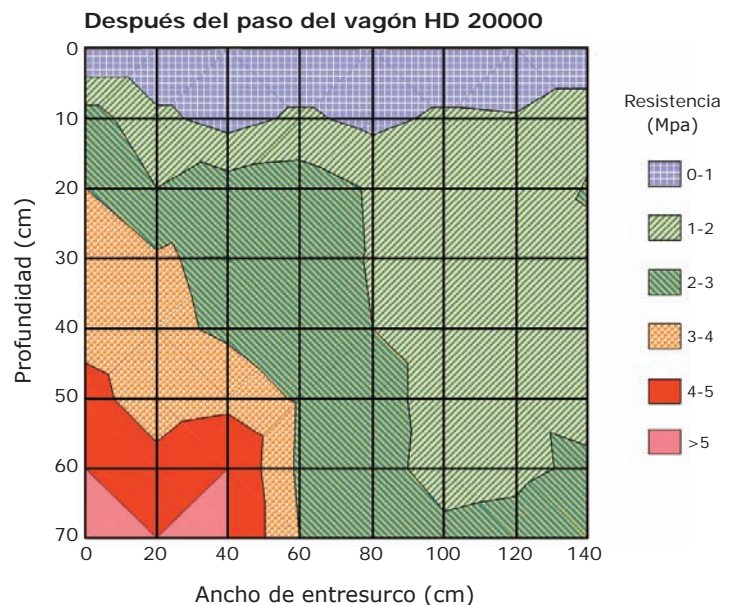


Figura 8. Distribución de la resistencia a la penetración al paso del conjunto tractor-vagón HD 20000. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

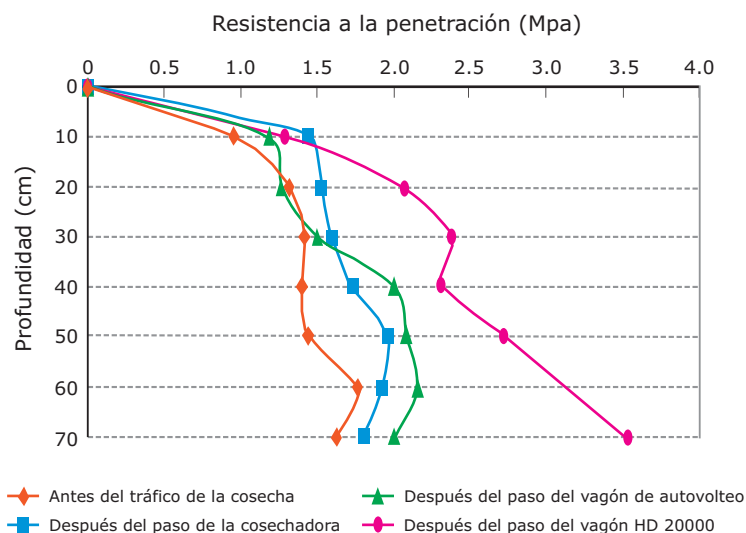


Figura 9. Variación de la resistencia a la penetración con el paso sucesivo de los equipos de cosecha. Suerte 4 de la hacienda San José Garcés, Ingenio Providencia. Suelo Manuelita, familia textural francosa fina, zona agroecológica 11H0.

Después del segundo pase de la cosechadora, la resistencia a la penetración alcanzó un valor máximo de 1.9 MPa. El rodamiento en orugas proporciona grandes superficies de contacto con baja distribución de carga sobre el piso y niveles moderados de compactación. El paso de los equipos más pesados y con mayor carga por eje induce mayor compactación en el subsuelo a partir de los 30 cm de profundidad. Este resultado se notó con mayor énfasis al paso del vagón HD 20000 que alcanzó 3.5 MPa transportando cargas para las cuales los suelos agrícolas no tienen suficiente capacidad portante y exceden su límite elástico, con lo cual se genera deterioro físico (Smith, *et al.*, 2002). Un efecto menos marcado se observa con el vagón de autovolteo, con valores máximos de resistencia a la penetración de 2.1 MPa.

Conclusiones y recomendaciones

1. Las cargas transmitidas al suelo por los vagones durante la cosecha ocasionan esfuerzos de contacto que superan los valores reconocidos como límites aceptables para suelos agrícolas (200 kPa).
2. Los vagones tradicionales de gran capacidad de carga como el HD 20000 inducen alta compactación en el subsuelo: alcanzan valores de resistencia a la penetración superiores a 4 MPa a profundidades mayores de 40 cm.
3. El uso de vagones de menor peso y menor capacidad de carga, como el de autovolteo, es una buena alternativa para reducir la compactación causada durante la cosecha.
4. El Cenisensor desarrollado por Cenicafía es una herramienta útil para medir de manera confiable los niveles de compactación del suelo provocados por el tráfico de la maquinaria en el campo.

5. El proyecto sobre compactación de suelos en la agroindustria de la caña de azúcar continúa y se consideran los siguientes factores: dos suelos de texturas contrastantes, dos condiciones de humedad (seco y húmedo), cinco equipos de transporte, dos sistemas de cosecha, cuatro tipos de llantas y tres presiones de inflado con el fin de formular alternativas de manejo para disminuir la compactación.

Referencias bibliográficas

- Balbuena, R.H.; Terminiello, A.M.; Claverie, J.A.; Casado, J.P. y Marlats, R. 2000. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol 4 (3):453-459. Campina Grande. Brasil.
- Draghi, L.M. 2005. Mecanización del huerto frutal. Tráfico controlado con vehículos de bajo peso/eje y altas intensidades de tráfico. Reología del suelo agrícola bajo tráfico. 160 pag. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina.
- González, O.; Iglesias, C.; Herrera, M.; López, E. y Sánchez A. 2007. Modelación matemática de la superficie de contacto suelo-neumático. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 16(2):49-51. Universidad Agraria de La Habana. Cuba.
- González, O. y Rodríguez, M. 2002. Determinación de las principales características técnicas de los equipos de transporte de caña de azúcar. Universidad Agraria de La Habana. Cuba.
- Keller, T. y Arvidsson, J. 2004. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. Soil & Tillage Research. Vol. 79:191-205. Elsevier. The Netherlands.
- Rodríguez, L.A.; Urbano, J.A.; Montoya, W.; Bernal, N.; Chaparro, O. y Escobar, D.F. 2007. Evaluación de la compactación causada por vagones de transporte a través de la superficie de contacto suelo-llanta en el Ingenio Carmelita S.A. Carta Trimestral 29(4):13-19. Cenicafía. Cali, Colombia.
- Smith, J.E.; Hilbert, J.A. y Aucana, M.O. 2002. Clasificación de vehículos en función del grado de compactación ejercida sobre suelo agrícola. INTA. Buenos Aires. Argentina.
- Torres, J.S. y Rodríguez, L.A.. 1995. Soil compaction management for sugarcane. XXII ISSCT Proceedings. Sept. 11-15. Cartagena, Colombia. Pag. 222-229.
- Torres, J.S. y Villegas, F. 1993. Differentiation of soil compaction and cane stool damage. Sugar Cane. No 1. Pag 7-11. Gran Bretaña.



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña
Agroindustria unida en la investigación y el desarrollo

Cenicaña es una institución privada de carácter científico y tecnológico, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la agroindustria azucarera localizada en el valle del río Cauca. Su misión es contribuir por medio de la investigación, evaluación y divulgación de tecnología y el suministro de servicios especializados al desarrollo de un sector eficiente y competitivo, de manera que éste juegue un papel importante en el mejoramiento socioeconómico y en la conservación de un ambiente productivo, agradable y sano en las zonas azucareras.

Las actividades de investigación y desarrollo son financiadas por los ingenios azucareros y los cultivadores de caña a través de donaciones directas definidas cada año como un porcentaje del valor de la producción de azúcar.

Las áreas de investigación se enmarcan en tres programas: Variedades, Agronomía y Procesos de Fábrica. Los servicios de apoyo son: Información y documentación, Economía y Estadística, Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología y Tecnología Informática.

El Centro Experimental está ubicado a 3°13' latitud norte, a 1024 metros de altura sobre el nivel del mar. En este sitio la temperatura media anual es de 23.5 °C, la precipitación de 1160 mm y la humedad relativa de 77%.

La **Carta Trimestral** es una publicación periódica, editada por Cenicaña con el propósito de difundir información y conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el desarrollo de la agroindustria azucarera colombiana. Ofrece documentación resumida sobre los resultados generados por el centro de investigación y las experiencias de ingenios y cañicultores con las nuevas tecnologías, al tiempo que provee las referencias bibliográficas complementarias sobre cada tema. El primer volumen fue editado en 1978, y los cambios más significativos de diseño y concepto editorial se dieron en 1997 cuando la versión impresa comenzó a publicarse también en Internet.

Título: Evaluación preliminar de los esfuerzos inducidos en el suelo por los equipos de cosecha y transporte de caña de azúcar

Autores: Luis Arnoby Rodríguez; Jaime Alberto Urbano; Jorge Torres

Publicado en: Carta Trimestral. Cenicaña, 2009. v.31, nos. 1 y 2. p.28-33

© Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2009.

Centro Experimental: vía Cali-Florida, km 26
Tel: (57) (2) 6876611 – Fax: (57) (2) 2607853
Oficina de enlace: Calle 58 norte no.3BN-110
Apartado aéreo: 9138
Cali, Valle del Cauca – Colombia

www.cenicana.org
buzon@cenicana.org