

MANEJO DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO CON PRECISIÓN¹

Egbert Spaans y Oscar Núñez²

INTRODUCCIÓN

La preparación de suelo, o labranza, es una práctica común en la agricultura. Manual o mecánicamente, la labranza es una tradición para acondicionar el suelo para la siembra del cultivo. Los tres objetivos principales de esta labor son aflojar el suelo para eliminar la compactación, preparar el suelo para la siembra mediante una disminución mecánica del tamaño de los terrones de suelo, y controlar las malezas.

La intensidad de la labranza ha sido cuestionada, porque es una labor costosa, destruye la continuidad de los poros y disminuye los niveles de materia orgánica en el suelo. Otro aspecto cuestionable de la labranza tradicional es la uniformidad con la cual se realiza la labor a través del terreno. La multitud de suelos que existe en una finca, con cada tipo de suelo teniendo sus características y respuestas propias al manejo que se le da, justifica un manejo diferenciado que considera el tipo suelo y su condición.

El objetivo de la Agricultura de Precisión es optimizar el uso de los recursos para maximizar la eficiencia, y con eso la rentabilidad del sistema productivo. Cuando las características del suelo cambian a través de un terreno, no se puede esperar que un manejo uniforme resulte en óptimas condiciones para el cultivo en todo este terreno. Hacer un manejo basado en el suelo “promedio” en un terreno heterogéneo, siempre resultará en haber hecho más que lo necesario en unos lugares, mientras que en otras áreas no se ha hecho lo suficiente (Spaans y Estrada, 2004; Spaans y Núñez, 2006).

Para romper este paradigma, la Agricultura de Precisión propone manejar el suelo según las necesidades de cada suelo. Un manejo preciso del suelo requiere primeramente un

¹ Presentado en el X Congreso de la Sociedad Ecuatoriana de Ciencias de Suelo, 22-24 noviembre 2006, Guayaquil, Ecuador; y por invitación de la ACCS en el V Congreso Nacional de Suelos, Asociación Costarricense de Ciencia de Suelo, 29-31 agosto 2007, Heredia, Costa Rica.

² Egbert Spaans (espaans@alia2xti.com) es Presidente de ALIA2 S.A (www.alia2xti.com) y profesor adjunto de la Universidad-EARTH (www.earth.ac.cr) ; Oscar Núñez (onunez@isc.com.ec) es Jefe de Investigación Agrícola del Ingenio San Carlos, Ecuador.

conocimiento de las condiciones del suelo en campo, y segundo requiere conocer exactamente qué hacer para modificar estas condiciones de manera tal, que el suelo esté en óptimas condiciones para el uso que se le da.

El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicación de los conceptos de Agricultura de Precisión a la labranza del suelo en el cultivo de caña de azúcar. Para eso, se diseñó la labranza óptima para cada lote del Ingenio San Carlos y se evaluó la respuesta del suelo y cultivo en comparación con el manejo tradicional.

MARCO TEÓRICO

Los poros del suelo

Esquemáticamente se puede visualizar el suelo como una matriz, hecha de minerales y materia orgánica, y poros que contienen agua y aire. La arquitectura o estructura del suelo se refiere a la forma en la cual la matriz y los poros están ensamblados (Brady y Weil, 1999). Los poros permiten el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera (la ventilación del suelo). También ayudan a conducir el agua hacia abajo o retenerla, dependiendo de su diámetro. Para poder ejercer adecuadamente esas funciones, es indispensable que los poros sean continuos, conectados y de diversos diámetros. Además, es importante que sean estables y resistentes contra fuerzas externas para que no se deformen bajo presión.

Las partículas minerales del suelo tienen una forma irregular entonces al estar conglomerados en un cierto volumen del suelo, siempre generarán espacios vacíos. A estos espacios se llaman *poros de empaque de partículas* y son los poros predominantes en suelos de textura arenosa. Debido a que estos poros son difíciles de comprimir y son continuos, suelos arenosos no se compactan, y a pesar de tener poco espacio poroso, tienen una excelente ventilación y drenaje.

Los suelos menos arenosos sí forman agregados, que al conglomerarse forman *poros de empaque de agregados*. Además, la actividad microbiológica y las raíces crean poros tubulares que juegan un papel muy importante en el drenaje de agua en exceso y el intercambio de gases. Debido al gran volumen que tienen estos poros, los suelos de este tipo son más porosos, pero a su vez más susceptibles a compactación, porque los poros biológicos y los *poros de empaque de agregados* son fáciles de destruir.

La labranza aumenta la porosidad del suelo, pero a su vez disturba el proceso biológico de formación de agregados y poros tubulares. Los implementos cortan el suelo, lo desmenuzan y lo levantan, pero no forman estructura en el mismo sentido que la actividad biológica lo hace. Además, los cortes en el suelo rompen la continuidad de los poros, afectando los procesos de conducción vertical del agua y aire.

Así también, la labranza inyecta oxígeno momentáneamente al suelo lo cual acelera la descomposición de la materia orgánica, un asunto que a largo plazo puede ocasionar una disminución de los niveles de materia orgánica en el suelo.

Compactación del suelo

Cuando las fuerzas externas exceden a la resistencia del poro, el poro se comprime disminuyendo el espacio poroso del suelo. A este proceso de compresión se le llama compactación, aunque en la práctica se refiere a un suelo compactado cuando el espacio poroso ha disminuido a un nivel que significativamente afecta el desarrollo de las plantas. La compactación puede ser ocasionada por una carga animal excesiva o por tráfico demasiado pesado para las condiciones del suelo.

Para medir el grado de compactación se utiliza el parámetro densidad aparente (DA) del suelo. Se determina la DA insertando un recipiente (puede ser un anillo, barreno, caja) de un volumen conocido en el suelo sin comprimirlo. El suelo se seca (hasta peso constante a 105°C) y se pesa, y este peso dividido por el volumen del recipiente es la densidad aparente del suelo, generalmente expresado en unidades de g/cm^3 .

Como alternativa, se ha propuesto el penetrómetro para medir la compactación del suelo, sin embargo la penetrabilidad del suelo depende más de la humedad del suelo que de su espacio poroso. El penetrómetro entra con facilidad en un suelo húmedo porque el agua es un lubricante y permite el fácil desplazamiento lateral de las partículas del suelo. Por tanto, es importante diferenciar entre un suelo duro y un suelo compacto cuando se opina sobre el estado de compactación del suelo en campo.

En un suelo seco el penetrómetro tampoco refleja la dificultad que tienen las raíces para penetrar el suelo, porque las raíces humedecen su rizósfera, creando condiciones muy diferentes a las encontradas con el penetrómetro. Debido a estas limitaciones, la interpretación de los datos obtenidos con el penetrómetro es complicada.

Preparación de la cama para la siembra

La preparación de la cama es la última etapa de la labranza antes de la siembra. El objetivo es disminuir el tamaño de los terrones para que la semilla esté bien tapada, tenga un buen contacto con el suelo y pueda emerger sin dificultad. No obstante, cuando se hace de manera excesiva tiene un efecto negativo, ya que además de romper los terrones, puede llegar a moler los agregados pulverizando el suelo. Un suelo pulverizado es altamente susceptible al impacto de gotas de lluvia o riego, y a erosión. La fuerza cinética de las gotas de agua que caen a un suelo pulverizado, tienden a dispersarlo formando una capa de lodo en la superficie que al secarse, forma una costra con una densidad aparente alta, principalmente en suelos limosos. Esta capa reduce la ventilación y la infiltración de agua en el suelo.

CASO INGENIO SAN CARLOS

Metodología

Para la preparación de suelos que se realiza antes de la siembra en el Ingenio San Carlos (ISC) se utilizan rastras de 36", 32", 26" y el subsolador. Las rastras trabajan a una profundidad de entre 12 cm (26") y 30 cm (36") y el subsolador llega hasta 50 cm. El objetivo de la rastra de 36" es voltear la cepa vieja, mientras que el objetivo de las rastras de 32" y 26" es reducir el tamaño de los terrones provocados por el mismo volteo. El uso del subsolador tiene como objetivo descompactar la capa del suelo entre 30 y 50 cm.

Históricamente la preparación de suelos que se ha venido aplicando en el ISC por lo general consiste de los siguientes pasos: 36"- 32"- subsolar - 32"- 26". En los suelos más pesados se daban de dos a cuatro pases más de rastra y en algunos casos un pase adicional de subsolador, mientras que en los suelos más livianos se omitían el subsolador. En el año 2003 empezamos a cuestionar dos aspectos del sistema de preparación de suelos del ISC: 1) La excesiva

disminución del tamaño de terrones y 2) el pase de subsolador sin una previa evaluación del grado de compactación del suelo.

Con el objetivo de determinar el efecto de una labranza menos intensiva sobre el desarrollo del cultivo se instalaron dos experimentos en dos lotes con diferente textura de suelo: franco y franco arcilloso. Se evaluaron tres tratamientos. El tratamiento 1 (testigo) fue la preparación de suelos que históricamente se ha venido utilizando, en el tratamiento 2 se eliminó un pase de rastra de 32" y en el tratamiento 3 se eliminó, además del pase de rastra de 32", el paso del subsolador. Cada lote se dividió en tres áreas y se aplicó un tratamiento a cada una. Los lotes eran de 10 a 12 ha y se dividieron en áreas de 3 a 5 ha para aplicar cada tratamiento.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en dos lotes

Lote	Tratamiento 1 (Testigo)	Tratamiento 2	Tratamiento 3
010401			
(Franco)	36" - 32" – sub - 32" - 26"	36" – sub - 32" - 26"	36" - 32" - 26"
090602			
(Franco arcilloso)	36" - 32" – sub - 32" - 26"	36" – sub - 32" - 26"	36" - 32" - 26"

Después de cada pase de rastra se midió el tamaño de los terrones que quedaron en la superficie del suelo. Para tomar las muestras se utilizó un cuadro de un área de 0.25 m² (0.5m x 0.5m) que se lanzaba en el área de cada tratamiento de manera que el muestreo fuese al azar, así tomando 10 muestras por tratamiento tratando de abarcar todo el área experimental. En cada muestra, se contaron los terrones encontrados en la superficie dentro del cuadro y se los clasificó según su tamaño en cinco categorías: 2-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm y >20 cm. Los agregados de menos de 2 cm se clasificaron en pulverizadas y no pulverizadas.

Para evaluar el efecto de la preparación de cama a la tapada de la semilla, se midió el área de semilla destapada después del primer riego en 10 puntos de 10 m cada uno, en cada tratamiento. A los 45 días después de la siembra se midió la población de brotes por metro para evaluar la facilidad de emergencia del cultivo en los diferentes tratamientos. Para este

fin, se contaron los brotes existentes en 10 puntos de 10 m cada uno en el área de cada tratamiento.

Para evaluar el grado de compactación del suelo, medimos la DA del suelo. El método más común de muestreo de suelo para la medición de DA es con el anillo de volumen conocido. La desventaja de este método es la lentitud con la que se hace el muestreo debido a la necesidad de hacer calicatas y a la dificultad para introducir el anillo en un suelo seco. Con el objetivo de implementar un método de monitoreo de la DA del suelo que permita obtener resultados de forma rápida, económica y confiable, se evaluó el muestreo de suelo con barreno tubular para dicha medición. Con un barreno tubular se puede muestrear el perfil del suelo a diferentes profundidades con mayor facilidad, y conociendo el diámetro de la punta del barreno y la altura de la muestra, se puede determinar el volumen de la misma.

Para comparar los dos métodos de muestreo, se tomaron muestras de suelo en seis sitios a ocho profundidades hasta 90 cm de profundidad, y tres repeticiones de cada muestra, tanto con el anillo desde una calicata, como con el barreno al lado de la calicata. De las 48 comparaciones, en 43 no se encontraron diferencias significativas entre ambos métodos de muestreo, solamente en 5 casos la DA fue mayor con el muestreo con el barreno tubular. Los resultados obtenidos en el comparativo indicaban que es confiable utilizar el muestreo con barreno para medir la DA del suelo.

Con base en los resultados de ese comparativo, se decidió realizar el muestreo de suelo para DA con el barreno tubular en lugar del anillo. La evaluación del grado de compactación siempre se hizo en el surco por donde pasan los tractores y equipos de cosecha, lo cual representa el peor caso posible de compactación (McGarry et al., 1997)

Resultados y discusión

No se encontraron diferencias significativas ($P < 5\%$) entre los tratamientos para la distribución del tamaño de terrones presentes en la superficie del suelo después de concluida la labranza, en ninguno de los dos lotes. Esto indica que tres pases de rastra en lugar de cuatro podrían ser suficientes para dejar el suelo en la misma condición.

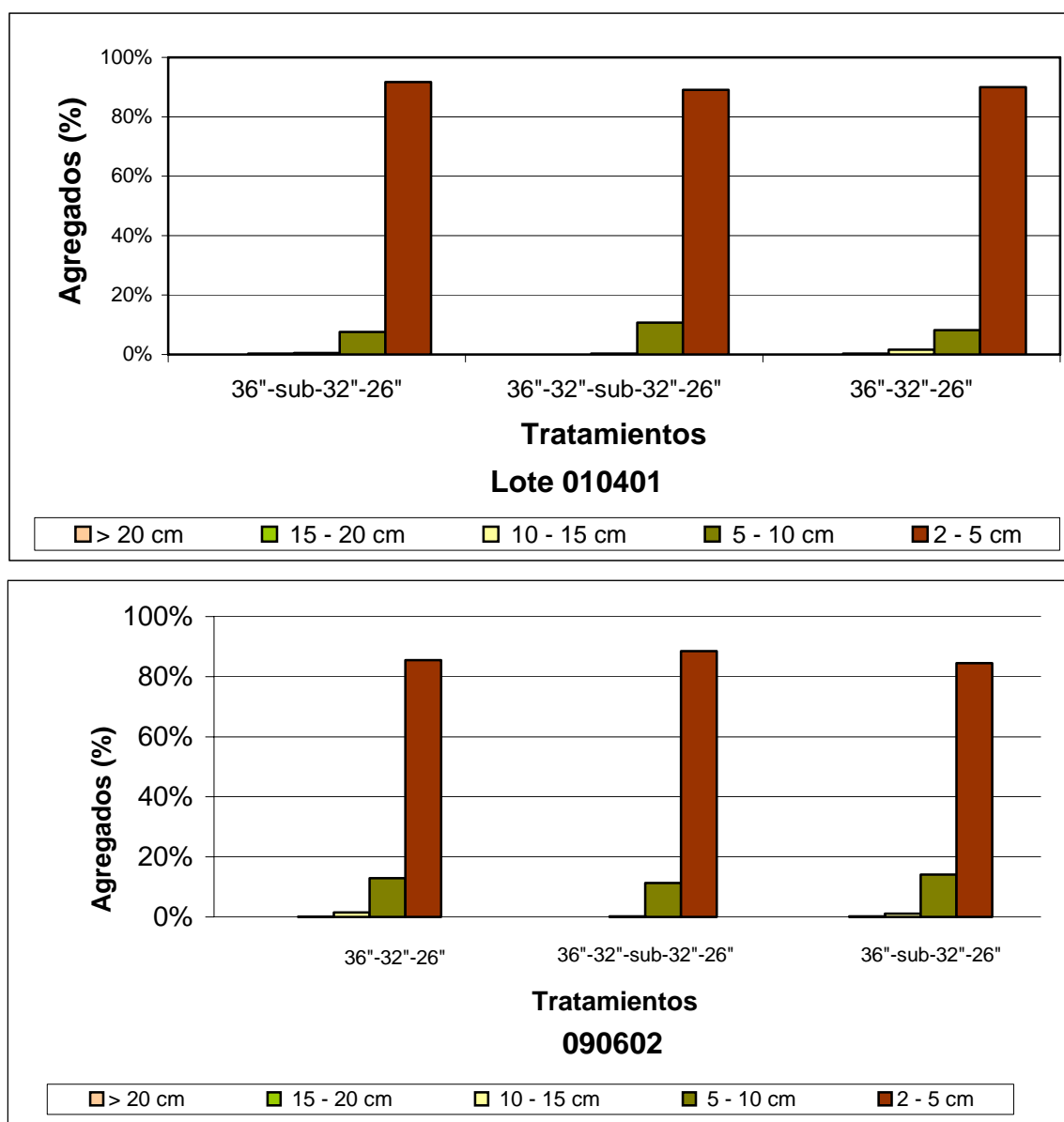


Gráfico 1. Distribución del tamaño de terrones (%) presentes en los diferentes tratamientos al finalizar la labranza en cada tratamiento en el lote 010401 (arriba) y el lote 090602 (abajo).

En el lote 010401 de textura franco, los tres tratamientos terminaron con 89 a 92% de terrones de 2 a 5 cm, mientras que en el lote 090602 de textura franco arcilloso los tres tratamientos tuvieron de 85 a 88% de estos terrones una vez concluida la labranza (Gráfico 1).

Los diferentes tratamientos de preparación de suelo no resultaron en diferencias significativas para el área de caña destapada (%) después del primer riego en ambos lotes, lo cual era de esperar dado que no existieron diferencias entre tratamientos en el tamaño de los terrones que quedaron en el suelo. La población de brotes a los 45 días después de la siembra también fue igual entre los tratamientos en ambos lotes. Esto último confirma que es posible eliminar el pase adicional de rastra de 32" que se da en el tratamiento testigo sin afectar la germinación de la caña (Cuadro 2).

Cuadro 2. Área de caña destapada después del primer riego y población de brotes a los 45 días después de la siembra.

	Lote 010401			Lote 090602		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Área de caña destapada (%)	28 a	38 a	26 a	33 a	25 a	27 a
Población (Brotos/m)	5.1 a	5.3 a	4.3 a	4.5 a	4.4 a	5.3 a

*Promedios del mismo lote seguidos de la misma letra no difieren estadísticamente según prueba de Duncan al 5% de probabilidad.

Las mediciones de DA del suelo cada 10 cm hasta 90 cm de profundidad indicaban que no existía compactación antes de la labranza en ninguno de los lotes evaluados según los umbrales de DA que se presentan en el Cuadro 3, establecidos con base en resultados de Trowse y Humbert (1961). En los Gráficos del 2 al 7 se presentan los resultados (promedios con su desviación estándar) de DA antes y después de la labranza para cada tratamiento en los dos lotes. A pesar de no presentar compactación antes de la labranza en los tratamientos evaluados en los experimentos, se observa que la labranza sí reduce la DA del suelo hasta la profundidad a la que trabajan los implementos en cada tratamiento. Sin embargo, es importante destacar que no cuestionamos la efectividad de la labranza, sino más bien la necesidad.

Cuadro 3. Niveles críticos de DA según la textura del suelo

Textura	Nivel crítico de DA (compactación)
Arcilloso, arcillo limoso	1.44
Franco arcilloso, franco arcillo limoso	
Franco limoso, franco	1.54
Franco arenoso	1.64
Arenoso, Areno limoso	No se compacta

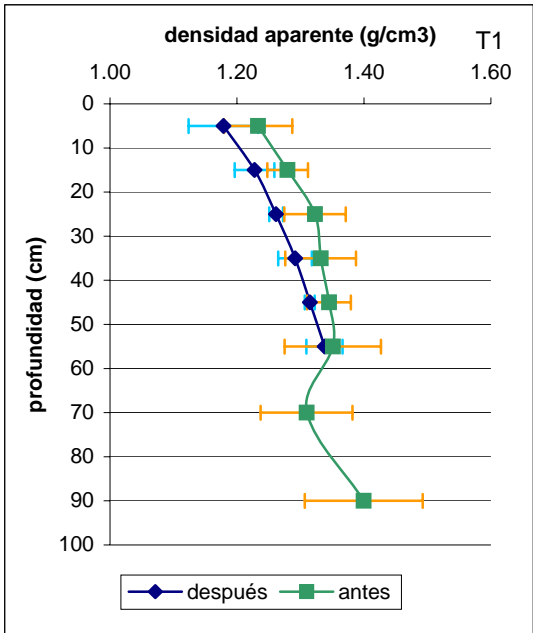


Gráfico 2. DA antes y después de realizado el tratamiento 1 en el lote 010401.

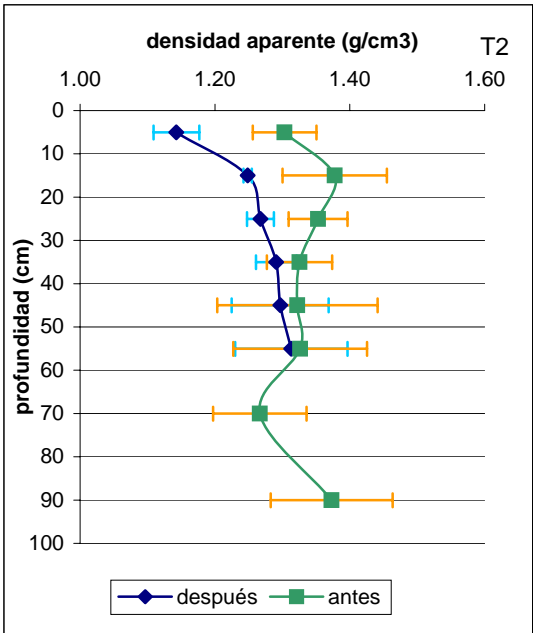


Gráfico 3. DA antes y después de realizado el tratamiento 2 en el lote 010401.

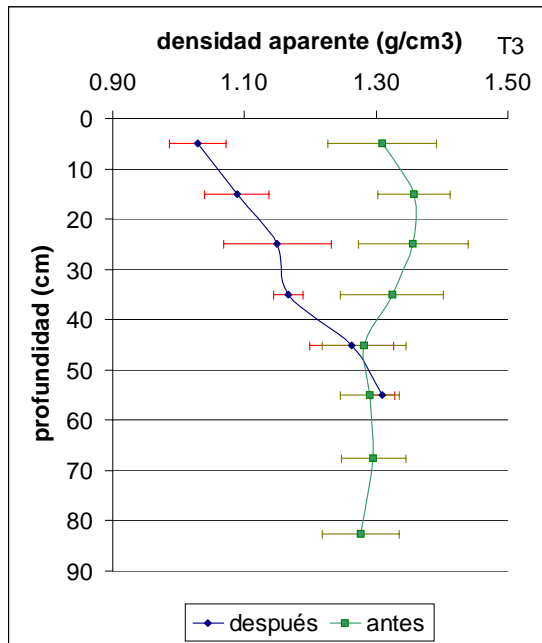


Gráfico 4. DA antes y después de realizado el tratamiento 3 en el lote 010401.

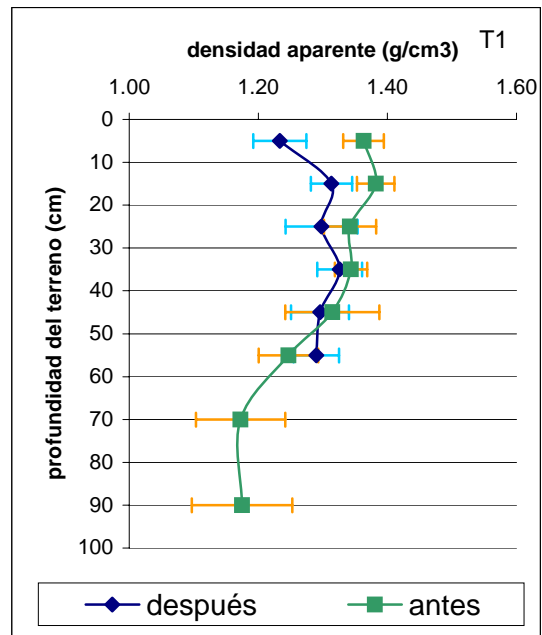


Gráfico 5. DA antes y después de realizado el tratamiento 1 del lote 090602

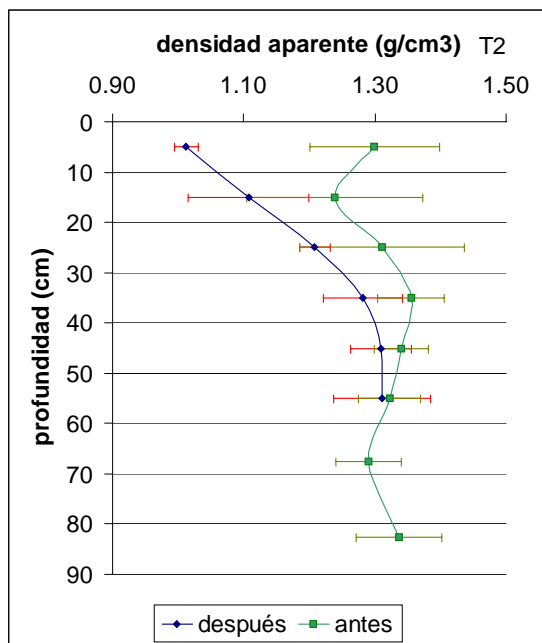


Gráfico 6. DA antes y después de realizado el tratamiento 2 en el lote 090602.

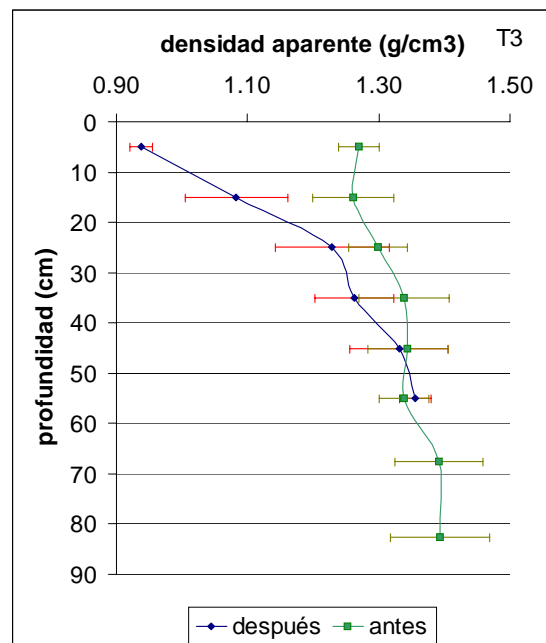


Gráfico 7. DA antes y después de realizado el tratamiento 3 del lote 090602.

No se pudo hacer un análisis estadístico de la productividad de caña (TCH) debido a que no se cosecharon repeticiones en cada tratamiento, sino que se cosechó toda el área de cada

tratamiento para obtener un dato de cosecha más representativo (Cuadro 4). A pesar de que no se puede ser concluyente respecto a la productividad de caña por falta de repeticiones, se puede observar que aparentemente la reducción de la intensidad de la labranza no afectó negativamente la productividad de caña obtenida en la primera cosecha.

Cuadro 4. Productividad de caña en toneladas de caña por hectárea (TCH)

	Lote 010401			Lote 090602		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
TCH	72	74	77	57	48	64

Aplicación y seguimiento a escala comercial

Con base en los resultados de estos experimentos, se decidió modificar la preparación de suelos a escala comercial. Se modificaron dos aspectos: 1) se hizo una reducción en el número de pases de rastra y 2) se implementó un sistema de monitoreo de la DA del suelo para utilizar este valor como criterio para decidir si es o no necesario subsolar.

Con respecto al número de pases de rastra, se observa una reducción en los años posteriores a esta investigación. Cuando en los años previos a esta investigación (2002 y 2003) se daba un promedio de 5 pases de rastra, en los años posteriores (2004 y 2005) el promedio fue 3.7 pases.

En el 2004 fue el primer año en que se determinó la DA del suelo de todos los lotes programados para ser sembrados, a la profundidad de 30-50 cm. La medición se hizo antes de la labranza y se utilizó el valor de DA como criterio para decidir si se necesita subsolar o no. Cuando la DA del lote era mayor que el nivel crítico establecido según su textura (Cuadro 3), se recomendó subsolar. Se hizo un seguimiento de la DA cuatro y once meses después de la siembra (Gráfico 8). Se observa que la DA antes de la labranza fue significativamente mayor en los lotes que se subsolaron, ya que esa fue la razón por la que se recomendó subsolarlos. Los lotes subsolados mantuvieron su nivel de DA 4 meses después de la siembra, mientras que en los no subsolados el valor de DA incrementó en 0.22 g/cm^3 . Entre los cuatro y los 11

meses después de la siembra, sin embargo, los dos tratamientos (subsolados y no subsolados) presentaron una reducción de su nivel de DA, lo cual ocurre posiblemente por el efecto descompactador del desarrollo del sistema radicular del cultivo. Es interesante también la semejanza de los valores de DA en suelos subsolados y no subsolados 11 meses después.

En el 2005, los resultados del seguimiento a la DA de los lotes sembrados indican que a los cuatro meses, en los lotes subsolados se registró una reducción de la DA de 0.1 g/cm^3 con respecto al valor que se obtuvo antes de la labranza, reflejando el efecto de la subsolada (Gráfico 9). En los lotes no subsolados, la DA a los cuatro meses fue ligeramente mayor que la existente antes de la siembra. Al igual que en el año anterior, existió una reducción de la DA del suelo entre los cuatro y los once meses después de la siembra, probablemente debido al desarrollo del sistema radicular del cultivo.

En los años 2002 y 2003 se subsolaba el 83% del área de siembra, mientras que en los años 2004 y 2005 se subsoló solamente el 20% del área de siembra como consecuencia de la implementación del sistema de monitoreo de la DA previo a la siembra. Esto no solamente ahorra dinero, sino también preserva la estructura y el nivel de materia orgánica del suelo por la fuerza física y la inyección de oxígeno que causa el subsolador.

Los resultados a nivel comercial concuerdan con los resultados de un diagnóstico de la compactación de suelo en el ISC que se realizó en el 2002, en el cual mediante mediciones de la DA detalladamente a través de todo el perfil del suelo en más de 80 calicatas, rara vez se encontraron valores superiores a los considerados tolerables por el cultivo de caña.

Concluimos que la compactación no es un fenómeno que afecta, de manera generalizada, los suelos del ISC. Eso es de esperar porque la zafra es durante el verano cuando los suelos están secos y por tanto sostienen la presión ocasionado por los equipos de cosecha sin compactarse.

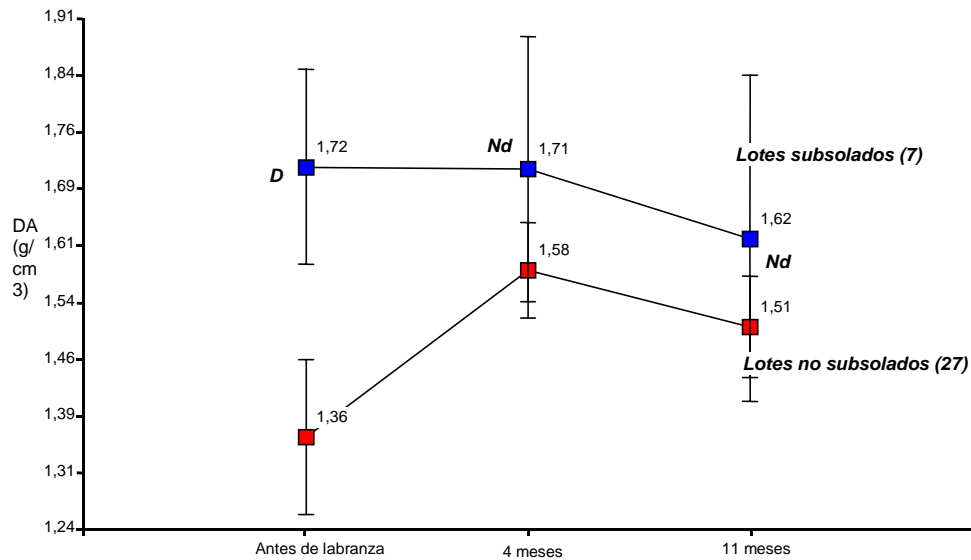


Gráfico 8. DA de suelo en tres épocas en lotes subsolados y no subsolados. Año 2004. Datos son promedios con su desviación estándar. “D” indica diferente y “Nd” indica no diferente (P<5%).

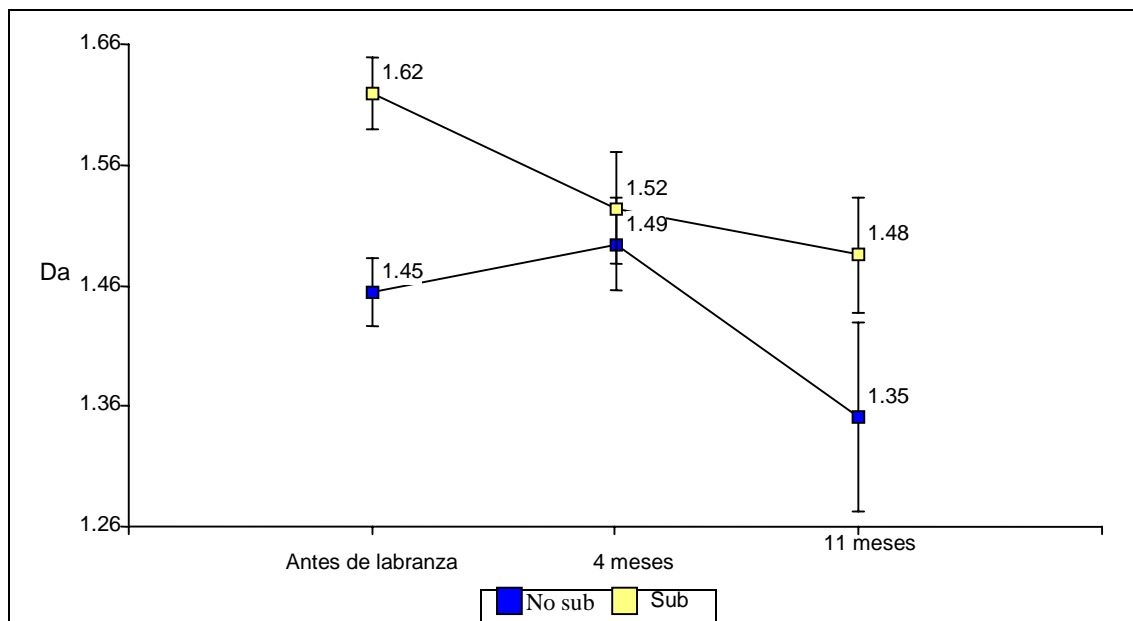


Gráfico 9. DA de suelo en tres épocas en lotes subsolados y no subsolados. Año 2005. Datos son promedios con su desviación estándar.

Se hizo un seguimiento de la productividad de caña en toneladas de caña por hectárea (TCH) y el rendimiento azucarero en libras de azúcar por tonelada (lb.az./ton) obtenido en los lotes evaluados. En los dos años (2004 y 2005) no se presentaron diferencias significativas entre

tratamientos para TCH y lb.az./ton. En el 2004, la productividad de caña promedio en los lotes subsolados fue 105 TCH y en los lotes no subsolados 107 TCH, mientras que el rendimiento azucarero fue de 175 lb.az./ton y 170 lb.az./ton, respectivamente. En el siguiente año, los lotes subsolados produjeron 100 TCH y los no subsolados 103 TCH, y el rendimiento fue 227 lb.az./ton para los subsolados y 222 lb.az./ton para los no subsolados. Estos resultados indican que la reducción de la labranza no afecta negativamente la producción de caña.

CONCLUSIONES

Aplicando los conceptos de Agricultura de Precisión, hemos diseñado una labranza óptima para cada lote del Ingenio San Carlos. Los resultados indican que se puede reducir la intensidad de la labranza sin que esto afecte negativamente la productividad de la caña de azúcar, siempre considerando las características y condiciones específicas de cada tipo de suelo. La labranza óptima con precisión ha disminuido significativamente los costos de preparación de suelo antes de la siembra y esperamos a largo plazo ver los efectos positivos en una mejor estructura de suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Brady, N. C. y R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soil. Prentice-Hall, New Jersey. 12^{va} edición.

McGarry, D., M.V. Braunack, G. Cunningham, N. Halpin, M. Sallaway, D. Waters, and B.T. Egan. 1997. Comparison of soil physical properties of row and interrow; basis for control traffic in cane. Proc. Sugarcane Tech. Aust. Soc. Conf., BSES, Queensland, Australia. pp 263-269.

Spaans, E. y L. Estrada. 2004. Sense and non-sense of satellite navigation for precision agriculture in the tropics. European Journal of Navigation 2(3): 71-76.

Spaans, E. y Oscar Nuñez. 2006. Haciendo realidad la agricultura de precisión en el Ingenio San Carlos. Memorias de 6to Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe ATALAC, Guayaquil, 12-15 sept., 2006.

Trouse, A. and Humbert, R. 1961. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. Soil Science 91(3): 208-217.