

Energía demandada por las labores y efecto sobre las propiedades físicas del suelo del sistema de cultivo predominante en caña de azúcar

Omar Tesouro / Marcos Roba / Enrique Fernandez Ullivarri / Lidia Donato / Angel Romito / Juan Vallejo / Juan D'Amico

Instituto de Ingeniería Rural - CIA - CNIA - INTA Castelar
Proyecto Específico Innovaciones en Implantación para la Producción de Granos y Forrajes

Informe Técnico de Siembra N° 17
Marzo 2011



Ediciones

Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Informe técnico de siembra
ISSN 1852-3080
No. 17, marzo, 2011

Energía demandada por las labores y efecto sobre las propiedades físicas del suelo del sistema de cultivo predominante en caña de azúcar

Instituto de Ingeniería Rural
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Editor responsable: Ing. Agr. Mario Omar Tesouro

Avda. Pedro Díaz 1798

Hurlingham - Buenos Aires - Argentina

C.C. 25 B1712 JHB Castelar

Tel/fax 4665-0495

ingrura@cnia.inta.gov.ar
<http://www.inta.gov.ar/iir>

Contenido

I. Introducción	2
II. Materiales y Métodos	3
III. Resultados y Discusión	4
III.1. Demanda tractiva, consumo de combustible y energía requerida por las labores	4
III.2. Estado del suelo y efecto de las labores	9
IV. Consideraciones Finales	16
V. Bibliografía	18

I. Introducción

A diferencia de lo sucedido en la mayoría de los cultivos argentinos, en los que las formas tradicionales de manejo dieron paso a la siembra directa, en el cultivo de la caña de azúcar los sistemas tradicionales mantienen su vigencia. La importancia de la mecanización se ha visto incrementada y predomina actualmente no sólo en el esquema productivo argentino, sino también en el ámbito cañero mundial. En este escenario, la secuencia de labores tiene una incidencia aproximada entre un 30 y un 35% en los costos de producción. (6 a y 6 b)

Las labores realizadas para la sistematización de los campos cañeros, requieren grandes aportes de energía. La intensidad y las elevadas profundidades de trabajo utilizadas incrementan esta demanda proporcionalmente (3). Los trabajos realizados para la implantación de la caña y el escarificado de la trocha, son las labores con mayor demanda energética. La potencia requerida, y por ende el combustible consumido, guarda una relación directa con la velocidad y la profundidad de trabajo (3). En estudios realizados en diversas zonas cañeras argentinas, se ha estimado que el cultivo de caña de secano demanda entre 3,8 y 4,5 UTAs, lo que significa un consumo de 45,6 a 54 litros de gas-oil por hectárea por año (14).

Los suelos con historial de monocultivo de caña de azúcar suelen caracterizarse por su pobre estructura y alta densidad aparente, como resultado de la combinación de las labranzas durante las épocas de cultivo y la compactación causada por el tránsito pesado e intensivo durante la cosecha (2, 8). El uso continuo de la maquinaria agrícola para crear las condiciones apropiadas para el desarrollo del cultivo, ha causado daños irreversibles sobre la estructura de algunos suelos agrícolas (11). La pérdida de la porosidad en un suelo agrícola, afecta considerablemente el normal movimiento y almacenamiento de aire y agua, necesarios para el desarrollo de los cultivos (13). Varios autores han señalado que estos parámetros físicos afectados, son algunos de los indicadores utilizados para determinar la calidad del suelo agrícola. (5, 9, 15). Otro aspecto importante asociado con el monocultivo de la caña de azúcar es el impacto a largo plazo que tiene esta actividad sobre la salud biológica del suelo (8).

El objetivo de este trabajo fue analizar los sistemas mecanizados comúnmente utilizados en caña de azúcar en lo que respecta a su demanda energética, a la calidad de las labores y a su efecto sobre la salud del suelo.

II. Materiales y Métodos

Durante la campaña 2009/2010 se realizaron ensayos de tracción en lotes productivos del área de influencia de la EEA INTA Famaillá (provincia de Tucumán). Los ensayos se llevaron a cabo en los departamentos de Cruz Alta (fincas La Florida y La Tala), con predominio de Hapludoles y Haplustoles, y de Leales (fincas Mercedes y María Elena) sobre Argiudoles. Se midió la demanda tractiva de diversas máquinas utilizadas para la labranza primaria, secundaria, labores de cultivo y fertilización profunda. Para ello se empleó una celda de carga electrónica de 5000 kilogramos de capacidad intercalada entre el tractor y la máquina evaluada y un sistema electrónico de almacenamiento de datos diseñado en el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos del Instituto de Ingeniería Rural (INTA Castelar). Cada determinación fue repetida cuatro veces sobre parcelas de 100 metros de longitud. Además del esfuerzo de tracción, se midió el tiempo empleado en recorrer dicha distancia, a fin de determinar la velocidad efectiva de avance del equipo y la potencia demandada al tractor en la barra de tiro. Con estos datos se calculó la energía requerida por hectárea para realizar cada labor, las cuales fueron posteriormente convertidas a consumo de combustible en litros por hectárea, utilizando un modelo desarrollado en dicho laboratorio, que considera el tipo de tracción del tractor utilizado, su eficiencia tractiva y el rendimiento termodinámico del motor.

Para la evaluación de la resistencia del suelo antes y después de haber realizado las labores, se utilizó un penetrómetro estandarizado electrónico (ASAE Standard S.313. 1992). Las mediciones se efectuaron sobre 3 transectas perpendiculares a la dirección de avance de los equipos. En las labores realizadas sobre la trocha, como las de cultivo y de fertilización profunda, la penetrometría fue llevada a cabo a lo largo de las transectas en los centros de los surcos, bordes de los surcos y centros de las trochas. En los trabajos que implicaron la remoción de la totalidad del suelo, como las de labranza primaria y secundaria, la penetrometría fue efectuada a intervalos de 0,10 m.

Para determinar la densidad aparente se utilizó el método de cilindro, relevándose el perfil del suelo en forma previa a los trabajos realizados por los distintos equipos. Las muestras fueron obtenidas en rangos de 10 centímetros, hasta alcanzar las profundidades de operación para las cuales fueron reguladas las máquinas. Las mismas muestras fueron utilizadas para establecer la humedad gravimétrica del suelo al momento de realizar las labores.

Inmediatamente después del pasaje de las máquinas se realizaron trincheras perpendiculares a sus trayectorias, removiendo la totalidad del suelo disturbado, a fin de determinar la profundidad efectiva de trabajo y la sección de suelo disturbada.

Relacionando la demanda tractiva y la sección de suelo efectivamente laboreado, fue calculado el coeficiente de labranza de las distintas máquinas, en cada uno de los lotes. Este coeficiente representa el volumen laboreado por unidad de energía consumida (1). Esta metodología permite comparar los diversos

implementos en distintos ambientes, teniendo en cuenta los factores influyentes del suelo: textura, humedad, contenido de materia orgánica, grado de compactación y los parámetros suelo/interfaz.

Finalmente, se realizó un estudio del estado de la porosidad del suelo sobre muestras inalteradas extraídas de la finca La Tala, en un lote con una historia de 12 años continuos de caña de azúcar con un manejo convencional. Las muestras de suelo se extrajeron antes de las labores de descepado, en 4 intervalos de profundidad: 0 a 0,10; 0,10 a 0,20; 0,20 a 0,30 y 0,30 a 0,40 m. En el laboratorio, fueron pesadas en húmedo y luego se secaron en estufa a 105 °C hasta constancia de peso. Con los datos del peso y de los volúmenes medidos luego del secado y a fin de considerar la contracción del suelo, se calculó el porcentaje de humedad, la porosidad total y la densidad aparente. Sobre las muestras de suelo inalteradas, se efectuaron curvas de retención hídrica mediante un equipo extractor de presión membrana. En base a los resultados obtenidos en dichas curvas y a los datos de densidad aparente, se determinó la distribución de tamaños de poros, el porcentaje de poros con aire a capacidad de campo, el agua útil y el contenido de humedad cuando el 10% de los poros se encuentran con aire.

III. Resultados y Discusión

III.1. Demanda tractiva, consumo de combustible y energía requerida por las labores

Labranza con arado de cinceles: La demanda de tracción de esta máquina alcanzó, en promedio, a 4046 kg con un coeficiente de variación (CV) inferior al 5 %. Este valor de esfuerzo tractivo fue obtenido con una velocidad de avance efectiva de 1,71 m/s (6,15 km/h) y con una profundidad media de las púas de 0,29 m. Considerando el ancho efectivo de labor de 3,58 m, la energía requerida para efectuar esta labor fue de 41,9 CVh/ha. Teniendo en cuenta las diferentes configuraciones que puede adoptar un equipo de labranza, esta cantidad de trabajo fue convertida en consumo de combustible en litros por hectárea en función de sus respectivas eficiencias (Cuadro 1). Al variar la velocidad de avance de 1,71 m/s a 1,96 m/s (7,06 km/h) la fuerza de tracción se incrementó un 8 %.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	18,4	20,0	21,7
	Media	16,6	18,0	19,5
	Alta	15,1	16,4	17,7
Asistida	Baja	14,3	15,5	16,8
	Media	13,4	14,5	15,7
	Alta	12,6	13,7	14,8
Doble	Baja	12,2	13,3	14,3
	Media	11,5	12,5	13,5
	Alta	10,8	11,7	12,7

Cuadro 1. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para la labranza con arado de cinceles con rolo de barras, Condiciones operativas: profundidad media de las púas del arado: 0,29 m; velocidad efectiva de avance: 6,15 km/h. Finca La Florida. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Labranza con rastra de discos: Dos rastras excéntricas, de similares características, fueron ensayadas en distintas condiciones de suelo y en diferentes labores. En el caso de la prueba efectuada en la finca La Florida, la máquina trabajó sobre un suelo que previamente había sido rastreado en dos oportunidades y luego cincelado. Bajo estas condiciones, la fuerza media de tracción requerida fue de 2981 kg con un CV inferior al 5 %. La velocidad de avance fue de 2,08 m/s (7,50 km/h) y la profundidad media de labor alcanzó los 0,21 m. La demanda de energía de la labranza fue de 29,52 CVh/ha, correspondiéndole los consumos de combustibles indicados en el cuadro 2. El incremento de la velocidad de avance del equipo de 2,08 m/s a 2,50 m/s (9,00 km/h) no modificó en forma apreciable la fuerza de tracción necesaria para realizar la labor. En el primer ensayo realizado en la finca La Tala, la máquina trabajó en el borrado de los surcos (descepe), mientras que en el segundo, lo hizo sobre los sitios descepados. Las fuerzas de tiro fueron de 2209 kg (CV = 10%) y de 2089 kg (CV = 6,3 %) respectivamente. Para el cálculo de la energía requerida por la labor, en el caso del descepado, se consideró un ancho de labor efectivo de 4,8 m en lugar de los 3,8 m de ancho normal de trabajo de la rastra, con lo cual se obtuvo un valor de 17,05 CVh/ha. La demanda de energía de la segunda labor fue de 20,36 CVh/ha. Los consumos de combustible estimados para estas dos tareas pueden observarse en los cuadros 3 y 4. Es conveniente mencionar que, en ambos trabajos, la profundidad de labor estuvo determinada por la capacidad de penetración de la rastra. El tren rodante fue elevado de modo tal que las ruedas de transporte permanecieron suspendidas y separadas de la superficie del suelo. En el caso del descepe, los discos se apoyaron en los entresurcos sin efectuar una remoción apreciable en estos sitios mientras que, en la segunda labor, roturaron una sección del suelo consolidado subyacente con una profundidad media de 0,05 m. En los dos trabajos, la velocidad de avance efectiva fue del orden de los 6 km/h.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	13,0	14,1	15,3
	Media	11,7	12,7	13,7
	Alta	10,6	11,5	12,5
Asistida	Baja	10,1	10,9	11,8
	Media	9,4	10,2	11,1
	Alta	8,8	9,6	10,4
Doble	Baja	8,6	9,3	10,1
	Media	8,1	8,8	9,5
	Alta	7,6	8,2	8,9

Cuadro 2. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para la labranza con rastra excéntrica en función del tipo y la eficiencia de tracción y el rendimiento termodinámico del motor. Condiciones operativas: profundidad media de labor: 0,21 m; velocidad efectiva de avance: 7,5 km/h. Finca La Florida. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	7,5	8,2	8,8
	Media	6,7	7,3	7,9
	Alta	6,1	6,7	7,2
Asistida	Baja	5,8	6,3	6,8
	Media	5,4	5,9	6,4
	Alta	5,1	5,6	6,0
Doble	Baja	5,0	5,4	5,8
	Media	4,7	5,1	5,5
	Alta	4,4	4,8	5,2

Cuadro 3. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para descepeado con rastra excéntrica. Condiciones operativas: velocidad efectiva de avance: 6,0 km/h. Finca La Tala. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	8,9	9,7	10,5
	Media	8,1	8,8	9,5
	Alta	7,3	8,0	8,6
Asistida	Baja	6,9	7,6	8,2
	Media	6,5	7,1	7,6
	Alta	6,1	6,6	7,2
Doble	Baja	5,9	6,4	7,0
	Media	5,6	6,1	6,6
	Alta	5,2	5,7	6,1

Cuadro 4. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para el laboreo con rastra excéntrica luego del descepe. Condiciones operativas: profundidad media de labor: 0,05 m en suelo consolidado; velocidad efectiva de avance: 5,8 km/h. Finca La Tala. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Fertilización y escarificado de los entresurcos: En la finca La Tala fue ensayada una máquina para realizar trabajos simultáneos de fertilización profunda y subsolado. Las pruebas se realizaron con topes para limitar la profundidad de labor y sin ellos, y con diferentes nivelaciones longitudinales, ya que éstas son las regulaciones utilizadas habitualmente en dicha finca. Los esfuerzos de tracción sobre surcos crudos fluctuaron entre un mínimo de 2794 kg, con un tope y la máquina regulada para picar rastrojo, y de 3478 kg con la máquina sin topes y con regulación para alcanzar una mayor profundidad de los subsoladores. En el primer caso el subsolador trabajó a una profundidad de 0,13 m y el equipo se desplazó a una velocidad efectiva de 1,37 m/s (4,9 km/h) mientras que en el segundo, la profundidad fue de 0,22 m y la velocidad efectiva de 1,21 m/s (4,3 km/h). Aunque esta máquina actúa sobre dos franjas de suelo de un ancho levemente superior a la separación entre las púas que conducen el fertilizante, el ancho efectivo de trabajo es de 3,2 m. La energía demandada fue de 32,34 CVh/ha para el esfuerzo mínimo y de 40,22 CVh/ha para el máximo. Los consumos

de combustible correspondientes pueden observarse en los cuadros 5 y 6. Al cargar la tolva con fertilizante y acoplar el tren cinemático de los dosificadores, la fuerza de tracción máxima se incrementó un 12 %.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	14,2	15,5	16,7
	Media	12,8	13,9	15,0
	Alta	11,6	12,6	13,7
Asistida	Baja	11,0	12,0	13,0
	Media	10,3	11,2	12,1
	Alta	9,7	10,5	11,4
Doble	Baja	9,4	10,2	11,1
	Media	8,9	9,7	10,4
	Alta	8,3	9,0	9,8

Cuadro 5. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para fertilización. Condiciones operativas: profundidad media del subsolador: 0,13 m; velocidad efectiva de avance: 4,9 km/h. Finca La Tala. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	17,7	19,2	20,8
	Media	15,9	17,3	18,7
	Alta	14,5	15,7	17,0
Asistida	Baja	13,7	14,9	16,1
	Media	12,8	14,0	15,1
	Alta	12,0	13,1	14,2
Doble	Baja	11,7	12,7	13,8
	Media	11,0	12,0	13,0
	Alta	10,3	11,2	12,1

Cuadro 6. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para fertilización y subsolado. Condiciones operativas: profundidad media del subsolador: 0,22 m; velocidad efectiva de avance: 4,3 km/h. Finca La Tala. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	13,1	14,3	15,4
	Media	11,8	12,8	13,9
	Alta	10,7	11,7	12,6
Asistida	Baja	10,2	11,1	12,0
	Media	9,5	10,4	11,2
	Alta	8,9	9,7	10,5
Doble	Baja	8,7	9,4	10,2
	Media	8,2	8,9	9,6
	Alta	7,7	8,3	9,0

Cuadro 7. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para el escarificado de entresurcos mediante cinceles. Condiciones operativas: profundidad media de las púas: 0,26 m; velocidad efectiva de avance: 3,9 km/h. Finca Mercedes. Celdas sombreadas: resultado más probable según el tipo de tracción.

En la finca Mercedes fue probado un escarificador de seis cinceles, ordenados en dos paquetes de tres unidades separadas entre sí a 0,375 m. Trabajando sobre entresurcos crudos a una velocidad media de avance de 1,10 m/s (3,9 km/h) y con una profundidad media de las púas de 0,26 m, la fuerza de tracción media alcanzó los 2586 kg (CV = 12,8 %) con picos superiores a los 3800 kg. Estos picos demuestran que la máquina trabajó al límite de su resistencia mecánica. La energía demandada fue de 29,9 CVh/ha. En el cuadro 7 pueden observarse los consumos de combustible estimados para llevar a cabo esta labor.

Tareas de cultivo con máquina de discos: En la finca María Elena la máquina trabajó sobre entresurcos previamente escarificados y la fuerza de tracción media requerida fue de 572 kg (CV = 8,8 %), operando a una profundidad media de 0,09 m y a una velocidad efectiva de avance de 2,65 m/s (9,5 km/h). La demanda de energía alcanzó a 13,25 CVh/ha para una ancho de labor efectivo de 1,6 m. Los consumos de combustible estimados se encuentran en el Cuadro 8.

Tipo de tracción	Eficiencia tractiva	Rendimiento termodinámico del motor		
		Alto	Medio	Bajo
Simple	Baja	5,8	6,3	6,8
	Media	5,2	5,7	6,2
	Alta	4,8	5,2	5,6

Cuadro 8. Consumo de combustible estimado en litros por hectárea para el cultivador de discos. Condiciones operativas: profundidad media: 0,09 m; velocidad efectiva de avance: 9,5 km/h. Finca María Elena. Celdas sombreadas: resultado más probable.

En el cuadro 9 se presentan los coeficientes de labranza calculados a partir de los ensayos de tracción. Varios de ellos alcanzaron el umbral de los 200 kg/dm², por lo que superaron holgadamente los valores esperados para estas clases texturales de suelos. Los coeficientes de labranza obtenidos justifican los elevados consumos de combustible estimados. Ahora bien, los coeficientes de labranza, que caracterizan una labor determinada, pueden incrementarse debido a un aumento en la demanda de tracción, a una reducción de la sección de suelo removida o a la modificación simultánea de ambas variables. La interacción entre el suelo y los implementos agrícolas ha merecido siempre un análisis particular. La terramecánica ocupa parte de su espectro de acción en estudiar y evaluar la acción recíproca de los órganos de las máquinas en contacto con el suelo, para poder determinar y eventualmente aumentar, su efectividad en ciertas condiciones operativas. Es importante conocer los efectos de los órganos activos para poder decidir, no sólo el implemento a utilizar, sino el momento, alistamiento y regulaciones a efectuar para alcanzar una labor óptima. La resistencia a la penetración, la densidad aparente, la porosidad y la permeabilidad al agua y al aire, son algunos de los parámetros físicos que pueden utilizarse tanto para estimar las demandas de tracción involucradas, como así también para valorar el efecto de la labor. Tal como se discutirá en la sección siguiente, los resultados alcanzados en este estudio indican que los elevados coeficientes de labranza obedecen tanto a la alta resistencia mecánica del suelo, como a la relativamente escasa sección de suelo efectivamente trabajada producto de la poca aptitud de las máquinas utilizadas para realizar las labores.

Máquina	Sección (dm ²)	Coef. Lab (kg/dm ²)	Máquina	Sección (dm ²)	Coef. Lab (kg/dm ²)
Arado de cinceles	61.3	71	Fertilizadora (La Tala)	14.1	198
Rastra excéntrica (La Florida)	78.5	38	Fertilizadora (La Tala)	19.9	175
Rastra excéntrica (La Tala)	21.0	105	Escarificador (Mercedes)	12.8	203
Rastra excéntrica (La Tala)	19.8	106	Cultivador (María Elena)	7.2	79

Cuadro 9. Coeficientes de labranza

III.2. Estado del suelo y efecto de las labores

La resistencia a la penetración (IC) en los sitios donde se evaluaron las labores de cultivo, pueden observarse en las figuras 1 a 3. Los tres gráficos corresponden a testigos, esto es, se realizaron con datos obtenidos antes de efectuar las labores cuya fuerza de tracción se quería medir. Dos aspectos de estas figuras merecen ser destacados. Uno de ellos son los elevados índices de resistencia registrados en el suelo en las condiciones normales en que se realizan las labores en la caña de azúcar.

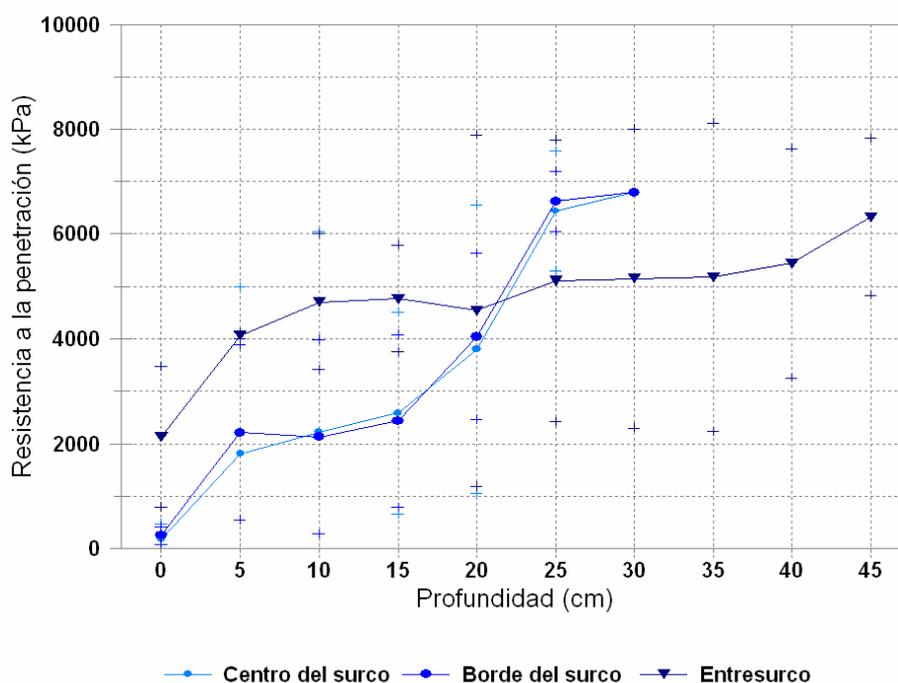


Figura 1. Resistencia a la penetración, promedio de tres transectos perpendiculares a los surcos, obtenida en forma previa a la realización de las labores en la finca La Tala (Testigo).

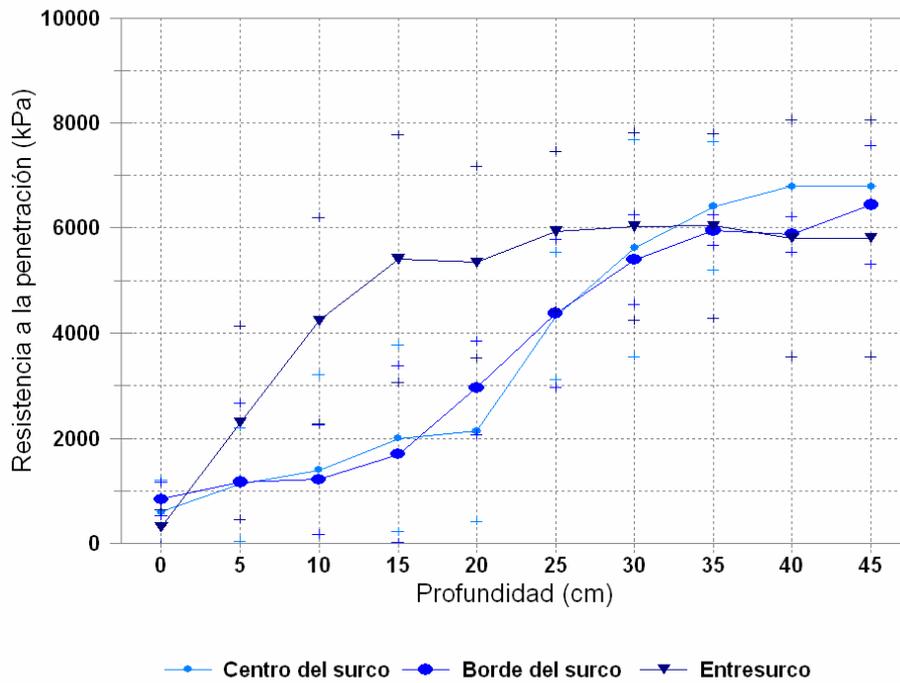


Figura 2. Resistencia a la penetración, promedio de tres transectas perpendiculares a los surcos, obtenida en forma previa a la realización de las labores en la finca Mercedes (Testigo).

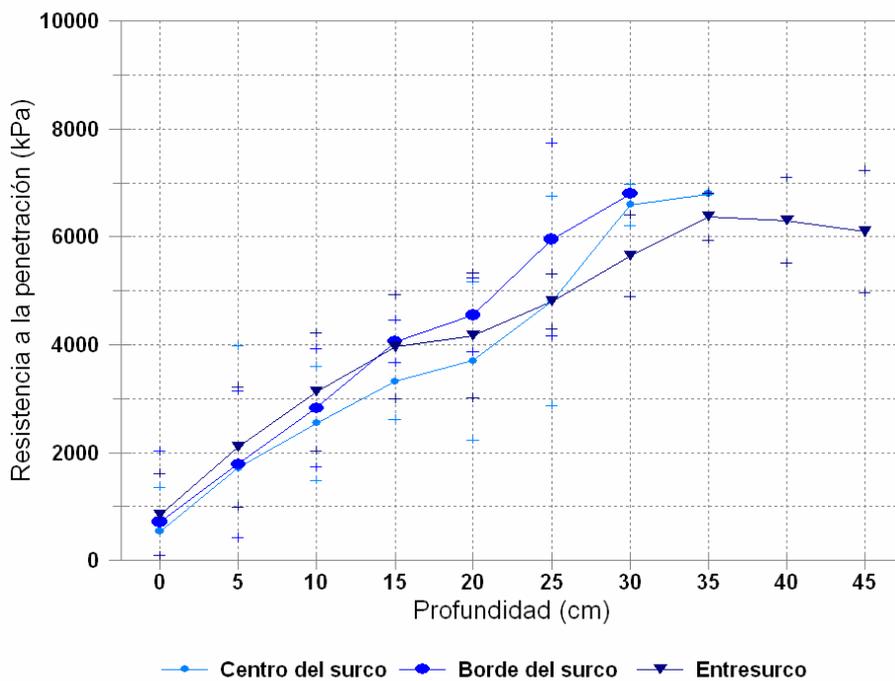


Figura 3. Resistencia a la penetración, promedio de tres transectas perpendiculares a los surcos, obtenida en forma previa a la realización de las labores en la finca María Elena (Testigo).

Aunque es cuestionable, en general se admite que un IC superior a 2 MPa representa una restricción al desarrollo radicular del cultivo. El otro aspecto a considerar es que, en dos de los tres sitios, la resistencia a la penetración de los entresurcos supera holgadamente a la de los surcos y los bordes de los surcos. La

excepción a este patrón se observa en la finca María Elena (Figura 3) pero aquí, los entresurcos habían sido escarificados con poca anterioridad a la realización de estas determinaciones. En este último caso, el gráfico parece indicar que el efecto del escarificado sólo sirvió para equiparar las resistencias de los entresurcos con los surcos y con los bordes de los surcos. Similar tendencia se observó en la finca Mercedes, luego de haber efectuado el escarificado de los entresurcos con el cultivador de cinceles (Figura 4). Es posible que la labranza contribuya a mantener una condición física apropiada en los entresurcos transitados, favoreciendo la infiltración y el desarrollo del cultivo. Pero a juzgar por lo visto en los testigos, también es lógico especular con que la disminución de la capacidad portante del suelo por efecto de la remoción, puede estar favoreciendo su densificación ante la acción de las cargas ejercidas por el tránsito. Los elevados índices de cono y coeficientes de labranza y la ausencia de raíces de caña en la trocha, son posibles indicadores de lo expresado en último término.

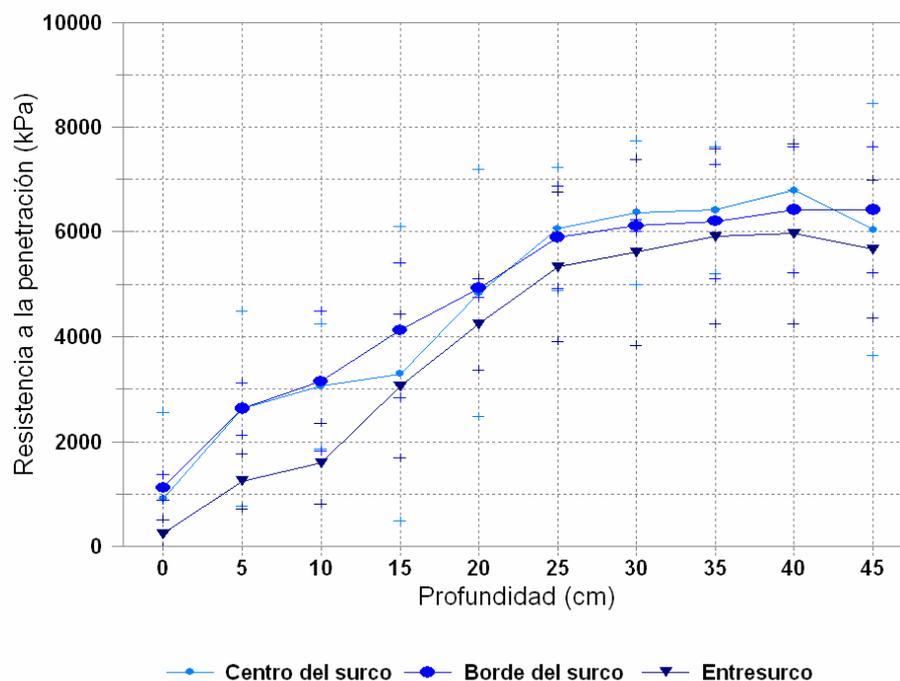


Figura 4. Resistencia a la penetración, promedio de tres transectas perpendiculares a los surcos, obtenida inmediatamente después de la realización del escarificado de los entresurcos en la finca Mercedes.

En el caso recién mencionado de la finca Mercedes, los cinceles trabajaron a una profundidad superior a los 0,25 m, pero el efecto de la labor sólo adquirió importancia en los primeros 0,15 a 0,20 m del perfil. Por otra parte, el arado de cinceles evaluado en la finca La Florida, lo hizo a casi 30 centímetros de profundidad. Si bien es razonable una acción moderada de esta máquina en la primera capa del perfil, debido a que el mismo había sido rastreado en dos oportunidades y luego cincelado, fue también poco perceptible en el límite de la profundidad de trabajo donde la labor debería haber tenido un efecto importante (Figura 5). Ashburner (1) sostiene que el volumen de suelo alterado por un diente angosto, como es el caso de los cinceles evaluados, depende de tres factores: profundidad de trabajo, el largo de ruptura y el ancho de la zona alterada. En el caso de los dientes angostos, el incremento de la profundidad de operación, no aumenta

en forma proporcional el volumen de suelo alterado. Este efecto también depende del estado de agregación, se genera menor disturbación en los suelos sueltos. En este estudio, en todos los casos en que se utilizaron cinceles en forma profunda, al evaluar el perfil laboreado se observó que las máquinas habían superado el umbral de la profundidad crítica. En estas condiciones de operación, la masa de suelo ubicada en profundidad entre dos arcos sucesivos, puede presentar una disturbación mínima o nula (Figura 6 a, b y c).

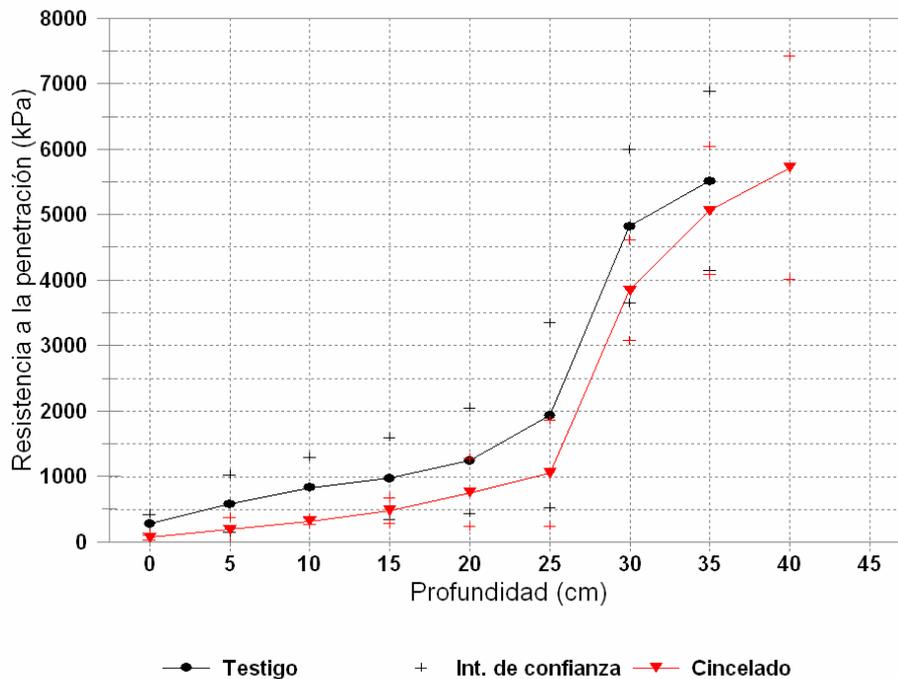


Figura 5. Resistencia a la penetración, promedio de tres transectas perpendiculares a la trayectoria la máquina de labranzas del ensayo realizado en la finca Florida.

Según Ortíz Cañavate y Hernáez (7), cuando un diente excede una profundidad de 3 o 4 veces su ancho, dependiendo del tipo de suelo, aparece una zona de compactación lateral sin que el suelo a su alrededor se vea alterado. Dicho de otra forma, se consume energía sin alcanzar el objetivo de la labor. Para ejemplificar esta situación, en la Figura 6 se esquematiza el desempeño de un diente angosto.

Un comentario aparte merece la observación realizada con el subsolador en la Finca La Tala (Figura 6 b) Con esta máquina, que posee en su parte inferior dos alas de aproximadamente 0,20 m de extensión, se logró una importante disturbación del entresurco pero el coeficiente de labranza fluctuó entre los 175 kg/dm² y 198 kg/dm². Tanto en este caso como en los anteriores, se superaron holgadamente los coeficientes de labranza más elevados, que corresponden a los suelos vertisólicos.

Las máquinas de discos también presentaron elevados coeficientes de labranza, fluctuando entre un mínimo de 38 kg/dm² sobre un suelo que había recibido cuatro labores previas y un máximo del orden de los 100 kg/dm² en trabajos de descepe.

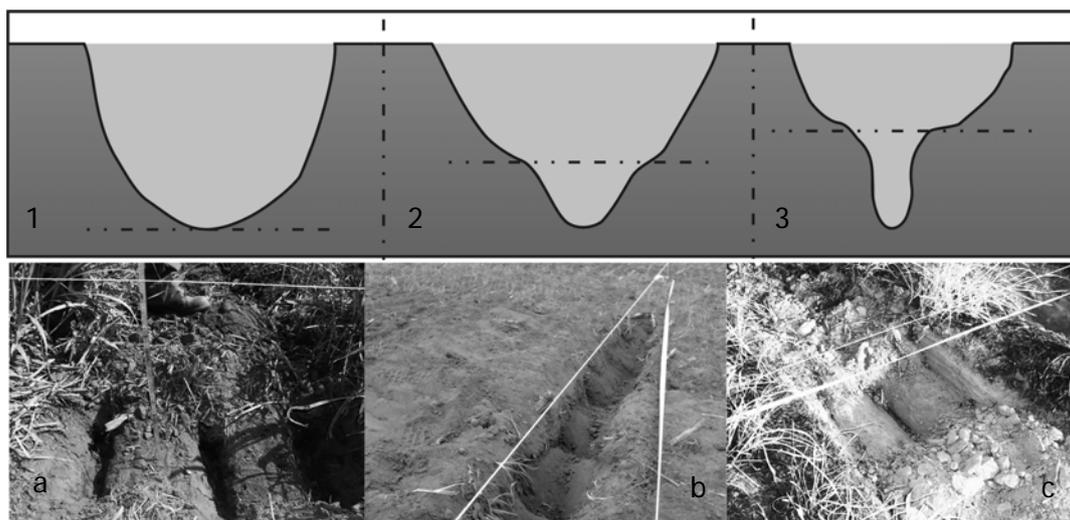


Figura 6. Arriba: Esquematación de la acción de un escarificador y sección de suelo trabajada. En (3) se superó el umbral de profundidad crítica. Abajo: imágenes de tres situaciones en caña de azúcar: (a) Subsolador Finca Mercedes (b) Cincel en Finca La Florida, y (c) Subsolador Finca La Tala.

En el cuadro 10 se detallan la densidad aparente y el análisis textural de las muestras de suelo obtenidas en la finca La Tala. Puede apreciarse que la densidad aparente aumenta a medida que lo hace la profundidad, aunque no fue posible detectar cambios significativos en este parámetro ($F=1,26$; $Pr>F= 0,2940$). En cambio, sí se observaron modificaciones sustanciales en el estado del sistema poroso. Las curvas de retención hídrica (Figura 7) muestran que la humedad gravimétrica del suelo a valores de pF inferiores a 2,52 es inversamente proporcional a la profundidad considerada.

Rango de profundidad (cm)	Densidad aparente (g/cm^3)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
0 a 10	1,304 a	23,8	51,6	24,6	Fr. limoso
10 a 20	1,351 a	25,3	51,5	23,2	Fr. limoso
20 a 30	1,344 a	27,8	53,5	18,7	Fr. limoso
30 a 40	1,390 a	28,6	54,8	16,7	Fr. limoso

Cuadro 10. Densidad aparente, gravimétrica y contenido porcentual de las fracciones de arena, limo y arcilla..

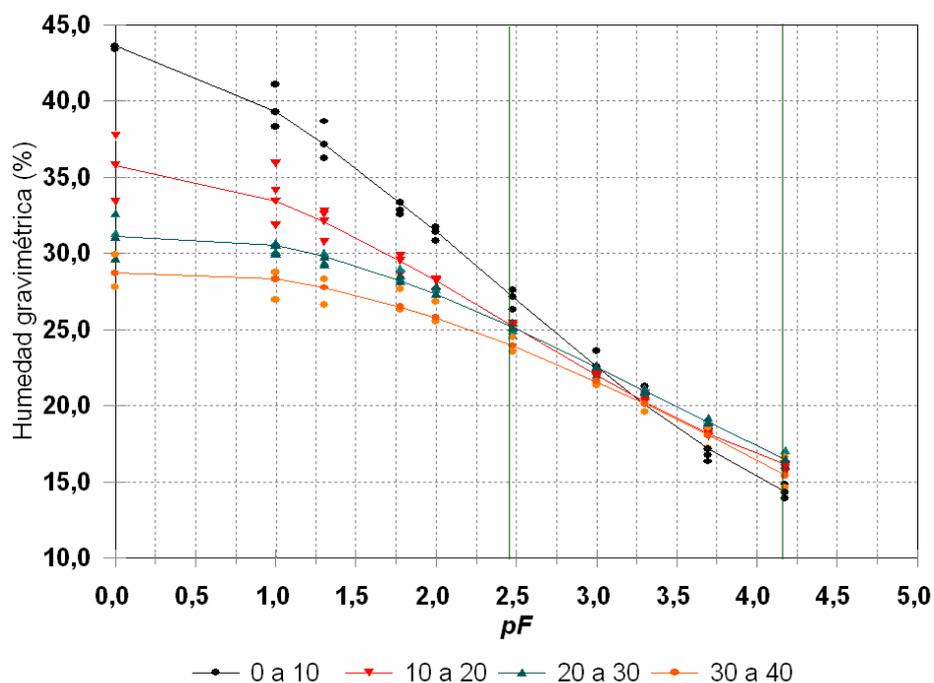


Figura 7. Curvas de retención hídrica del suelo a distinta profundidades.

Los contenidos de humedad volumétrica hallados a capacidad de campo fueron prácticamente coincidentes (Cuadro 11). Pero la cantidad de agua residual por debajo del punto de marchitez permanente fue significativamente inferior en los primeros 10 cm de suelo, respecto de la existente en las capas más profundas. En consecuencia, se detectó una mayor capacidad de almacenaje en el rango de 0 a 10 cm que en el resto del perfil evaluado. Paralelamente, el menor porcentaje de saturación con agua a capacidad de campo en las capas más superficiales indica, en principio, la existencia de una distribución de tamaño de poros más favorable en relación a la dotación y abastecimiento de agua y aire para los cultivos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Hussain et al. (4), quienes observaron efectos negativos de la densificación particularmente sobre la capacidad de almacenamiento y en la provisión de agua y nutrientes.

Rango de profundidad (cm)	Capacidad de Campo (cm ³ /cm ³)	Coefficiente de Marchitez Permanente (cm ³ /cm ³)	Agua Útil (cm ³ /cm ³)	Saturación (%)
0 a 10	0,340	0,183	15,61 a	63,28 a
10 a 20	0,325	0,210	11,58 b	72,09 ab
20 a 30	0,336	0,225	11,06 b	82,87 b
30 a 40	0,335	0,221	11,46 b	85,46 b

Cuadro 11. Valores de humedad volumétrica en capacidad de campo y en coeficiente de marchitez permanente, agua útil y porcentaje de saturación.

En suelos de esta clase textural los poros que poseen diámetros superiores a 50µm, son los responsables de mantener una buena capacidad de aireación del suelo (10). Al analizar los mayores tamaños de poros pudo observarse que, en el estrato más superficial del suelo, esta fracción representa aproximadamente el 13% de la porosidad total. Este valor, llamativamente elevado para la clase textural del suelo, contrasta

notablemente con lo encontrado a mayores profundidades (Cuadro 12 y Figura 8). Al comparar este rango de tamaño de poros con la porosidad total del suelo pudo observarse que la reducción del espacio poroso al incrementarse la profundidad, se produjo fundamentalmente en los mesoporos mayores y en los macroporos que constituyen la fracción de aireación. Estas apreciaciones coinciden con lo hallado en experimentos realizados por Soares et al (12) en establecimientos cañeros de Brasil, quienes concluyeron que las cargas ejercidas por el tránsito de la maquinaria y el sistema de labranza utilizado generaron un desarreglo en la estructura porosa y otras alteraciones del estado físico del suelo.

Rango de profundidad (cm)	Volumen de poros >50µm (cm ³ /cm ³)	Porosidad >50 µm (%)	Porosidad Total (%)
0 a 10	0,134 a	13,12	53,65
>10 a 20	0,079 b	8,33	50,41
>20 a 30	0,031 c	3,33	49,30
>30 a 40	0,023 c	2,49	47,60

Cuadro 12. Volumen de poros mayores a 50µm, su contribución porcentual y porosidad total según profundidad

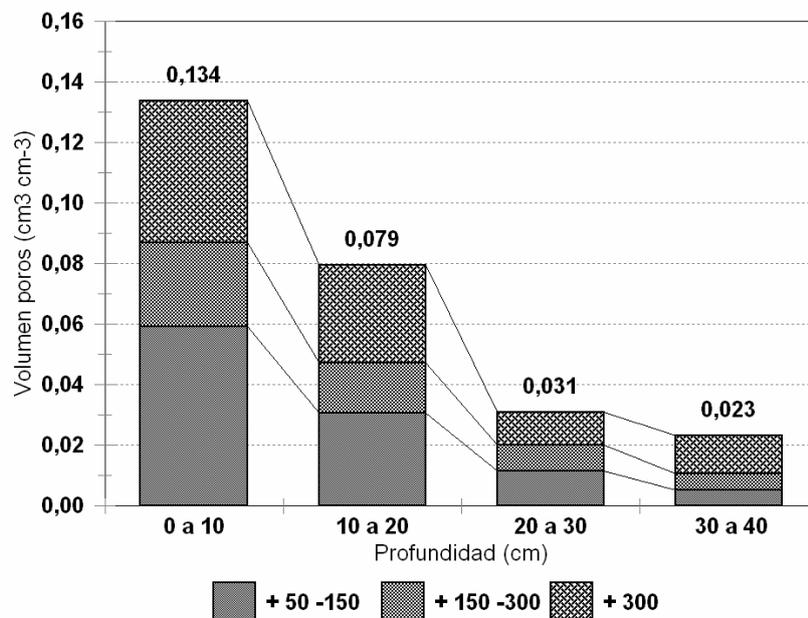


Figura 8. Capacidad de aireación del suelo a diferentes profundidades.

IV. Consideraciones Finales

La demanda de energía y el consumo de combustible, de las labores involucradas en la implantación y el mantenimiento del cultivo de la caña de azúcar en el área de influencia de la EEA Famaillá, resultan superiores a las observadas en trabajos equivalentes y en suelos de similares características texturales de la región pampeana.

Debería evaluarse la sustentabilidad y la conveniencia económica de continuar con el sistema de manejo del suelo utilizado para la implantación y el mantenimiento del cultivo de la caña de azúcar en el área de influencia de la EEA Famaillá.

Las máquinas comúnmente utilizadas para efectuar las labores de labranza en el área relevada, poseen escasa aptitud tanto desde el punto de vista del aprovechamiento energético como así también, de la calidad del trabajo realizado.

El sistema de manejo del suelo utilizado compromete la integridad del sistema poroso del suelo, pudiendo afectar el normal abastecimiento de aire, agua y nutrientes hacia el cultivo.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en colaboración y con financiación del Proyecto Específico N 1411 - Residuos y cultivos agrícolas para la producción de bioenergía; bajo la coordinación de la Ing. Agr. Lidia Beatriz Donato.

Se agradece la participación y colaboración de la Lic. Adriana Peralta, responsable de la Biblioteca del Instituto Ingeniería Rural.

V. Bibliografía

- (1) Ashburner, J. E. y Sims, B. G. 1984. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. IICA, Costa Rica. 474p.
- (2) Bell, M. J.; Stirling, G. R. y Pankhurst, C. E. 2007. Management impacts on health of soils supporting Australian grain and sugarcane industries. *Soil & Tillage Research* 97: 256–271.
- (3) Hilbert, J.A. y Tesouro, M.O. 2002. Demanda energética e impacto sobre el suelo de subsoladores de arco curvo cultivie. III Congreso argentino de Ingeniería Rural, Buenos Aires.
- (4) Hussain, I., Olson, K.R. y Siemens, J. 1998. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. *Soil Sci.* 163 (12): 970-981.
- (5) McVay, K.A., Budde, J.A., Fabrizzi, K., Mikha, M.M., Rice, C.W., Schlegel, A.J., Peterson, D.E., Sweeney, D.W. y Thompson, C. 2006. Management Effects on Soil Physical Properties in Long-Term Tillage Studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:434–438. *Soil & Water Management & Conservation*. doi:10.2136/sssaj2005.0249.
- (6 a) Márgenes Agropecuarios, 2007. Año 22 N 262.
- (6 b) Márgenes Agropecuarios, 2010. Año 26 N 308.
- (7) Ortiz-Cañavate, J. y Hernánz, J. L. 1988. Técnica de la mecanización agraria. Ediciones Mundi Prensa. ISBN: 84-7114-215-5
- (8) Pankhurst, C.E., Magarey, R.C., Stirling, G.R., Blair, B.L., Bell, M.J. y Garside, A.L. 2003. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. *Soil & Tillage Research* 72: 125–137
- (9) Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Fox, C.A., Tan, C.S. y Zhang, T.Q. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil & Till. Res.* 96, 316–330.
- (10) Ruud, P.B., Witte, Jan-Philip, M., van Bodegom, P.M., van Dam, J.C. y Aerts, R. 2008. Critical soil condition for oxygen stress to plant roots: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal de Hydrology.* 360, 147-165.
- (11) Silva, R.B., Lancas, K.P., Miranda, E.E.V., Silva, F.A.M. y Baio, F.H.R. 2009. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State. *Soil & Till. Res.* 103, 265-270.
- (12) Soares, J.L.N., Espindola, C.R. y Matos Pereira, W.L. 2005. Physical properties of soils under intensive agricultural management. *Soils and plant nutrition. Scientia Agricola* - doi: 10.1590/S0103-90162005000200012
- (13) Soane, B.D. y Van Ouwerkerk, C. 1994. Compaction problems in world agriculture.1-21. En: Soane, B. D. and Van Ouwerkerk, C (Edit.) *Soil compaction in crop production*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Holanda.
- (14) Sopena, R. A. y Teran, C. H. 2008. Relevamiento sobre el consumo de gas-oil en el cultivo de caña de azúcar en el país. Informe EEA INTA FAMAILLA, Tucumán, Octubre de 2008.

(15) Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M. y Carter, M.R. 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. In: Developments in Soil Science, vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp.

La presente publicación integra una serie de Informes Técnicos publicada por el Proyecto Específico Innovaciones en Implantación para la Producción de Granos y Forrajes. Estos informes tienen como finalidad poner a disposición de los profesionales oficiales y privados, la información generada en el Instituto de Ingeniería Rural y en las Estaciones Experimentales que integran el mencionado proyecto.



**Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca**
Presidencia de la Nación