

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso. Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo: Consolidación unidimensional (II).

Omar Tesouro¹ / Enrique Fernández de Ullivarri² / Leonardo Venturelli¹ / Marcos Roba¹ /
Angel Romito¹

Instituto de Ingeniería Rural - CIA - CNIA

¹Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos

²EEA Famaillá (Tucumán)

Informe Técnico N° 35
Junio 2018



Ediciones

Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Informe Técnico Nº 35

ISSN 1852-3080

Junio 2018

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso.
Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo:
Consolidación unidimensional (II)

Programa Nacional de Cultivos Industriales

Proyecto Integrador
Estrategias de manejo de sistemas productivos resilientes

Proyecto Específico
Optimización del ciclo de vida de los cultivos industriales

Módulo
Alternativas tecnológicas y optimización de los sistemas de manejo en cultivos industriales.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Instituto de Ingeniería Rural

Editor responsable: Ing. Agr. Mario Omar Tesouro

Av. Pedro Díaz 1798
Hurlingham - Buenos Aires - Argentina
C.C. 25 B1712 JHB Castelar
Tel. 4621-1447/1448/1668

iir.cd@inta.gob.ar
www.inta.gob.ar/unidades/222000

ÍNDICE GENERAL

Resumen	2
1. Introducción	3
2. Materiales y Métodos	5
3. Resultados	7
4. Consideraciones Finales	12
5. Bibliografía	13

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso.

Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo: Consolidación unidimensional (II)

RESUMEN

Entre los meses de junio y julio de 2013 se inició un ensayo de larga duración en la EEA Famaillá (Tucumán) a fin de probar diferentes tecnologías de cultivo en caña de azúcar. El área experimental posee suelos argiudoles ácuicos, con un prolongado historial de monocultivo de caña con el manejo tradicional de la zona. Los dos años anteriores al inicio del ensayo, en el sitio experimental se realizó un cultivo de soja implantado con siembra convencional, siendo posteriormente abandonado durante aproximadamente un año a la vegetación natural de pastizal.

La compactación excesiva del suelo puede tener efectos adversos sobre la emergencia de las plántulas y el desarrollo radical. Puede también aumentar el riesgo de escurrimiento superficial del agua debido a la disminución de la infiltración. La prueba de compresión uniaxial es un método de diagnóstico de este fenómeno y se utiliza para caracterizar la compresibilidad del suelo.

Se determinaron la relación carga-deformación, las tensiones de precompresión y los índices de compresión utilizando muestras de suelo inalteradas obtenidas del horizonte Bt₁ en el tercer año del ensayo y los resultados fueron comparados con los obtenidos en la situación de base.

El procedimiento de prueba utilizado se basó en la metodología descrita en la Norma ASTM D 2435-03. Las muestras de suelo fueron puestas en contacto con una película de agua durante 48 horas, a fin de alcanzar el estado de saturación, antes de ser colocadas en el aparato de compresión uniaxial y sometidas como mínimo a presiones verticales de 6, 19, 34, 62, 113, 210, 400, 760 y 1478 kPa. El tiempo de aplicación de cada nivel de carga, fue el necesario para permitir el drenaje del agua excedente de la muestra de suelo. Cuando el avance del pistón se aproximó a cero, para cada nivel de carga, fue graficada la deformación de la muestra de suelo en función del logaritmo del tiempo. Luego de haber sometido cada muestra de suelo a la totalidad de las cargas preestablecidas se estableció la relación de vacíos en función del logaritmo de la presión y, a partir de esta función, fueron calculados los parámetros mencionados.

Los resultados actuales indican que gran parte de las cargas aplicadas en el transcurso de la cosecha ya han sido transferidas a la matriz del suelo. Lo que inicialmente se consideró como un riesgo a su integridad física, se presenta ahora como una consecuencia concreta del manejo tradicional del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es una de las formas más importantes de degradación física de los suelos (Pagliai et al., 2004). Este fenómeno altera la estructura de los suelos cultivados, modificando varias propiedades clave para el mantenimiento del ambiente y la producción de los cultivos (Soane and van Ouwerkerk, 1994; Chan et al., 2006). La compactación excesiva del suelo puede tener efectos adversos sobre la emergencia de las plántulas y el desarrollo radical. Causa una reducción en la difusión del oxígeno favoreciendo la denitrificación (Czyz, 2004). Puede también aumentar el riesgo de escurrimiento superficial del agua debido a la disminución de la infiltración.

Soane and van Ouwerkerk (1994) concluyen que la intensidad de la compactación es debida a dos tipos de factores: (I) las cargas aplicadas que dependen de las características de la maquinaria (peso por eje, dimensiones del neumático, presión de inflado y velocidad de avance) y (II) la resistencia mecánica del suelo, que está condicionada con sus características intrínsecas como la textura, con sus propiedades casi permanentes como el contenido de carbono y con otras más dinámicas, como su tenor de humedad y su estado de agregación. En referencia a lo anterior, Trautner and Arvidsson (2000) informan que las tensiones observadas en un suelo expansivo arcillo limoso, sometido a cargas de 14 toneladas por eje, variaron de 300 a 650 kPa a 0,3 m de profundidad y de 70 a 270 kPa a 0,7 m, dependiendo del contenido de humedad. A igual carga aplicada, la relación tensión deformación es menor bajo labranza reducida que con labranza convencional, debido a la mayor resistencia del suelo (Lipiec and Hatano, 2003; Horn and Baumgartl, 1999; Horn and Rostek, 2000). Resulta obvia la importancia de controlar el impacto del tránsito de la maquinaria agrícola sobre la estructura del suelo a fin de mantener la ocurrencia de este proceso dentro de niveles aceptables (Alakukku et al., 2003).

La compactación del suelo ha sido sujeto de estudio durante muchos años debido a su implicancia en el rendimiento de los cultivos. Varios métodos han sido desarrollados para evaluar su efecto sobre la calidad del suelo (Alakukku et al., 2003; Lipiec and Hatano, 2003) y existe un creciente interés en mejorar la precisión de los métodos de diagnóstico de este fenómeno (Cavaliere et al., 2008).

La prueba de compresión uniaxial, desarrollada por Terzaghi (1936), es utilizada para caracterizar la compresibilidad del suelo. Las relaciones entre carga y deformación se describen generalmente en base a dos tipos de modelos: (I) los elastoplásticos y (II) los de forma de "S" (S shaped). En los modelos elastoplásticos, de forma bilinear, la curva de compresión definida en general como la relación de vacíos "e" en función del logaritmo de la presión vertical " σ_v " puede ser

dividida en dos partes: una elástica, a bajos niveles de tensión y que constituye el tramo de recompresión y otra lineal, a mayores tensiones, llamada la parte de compresión virgen (Figura 1.1a).

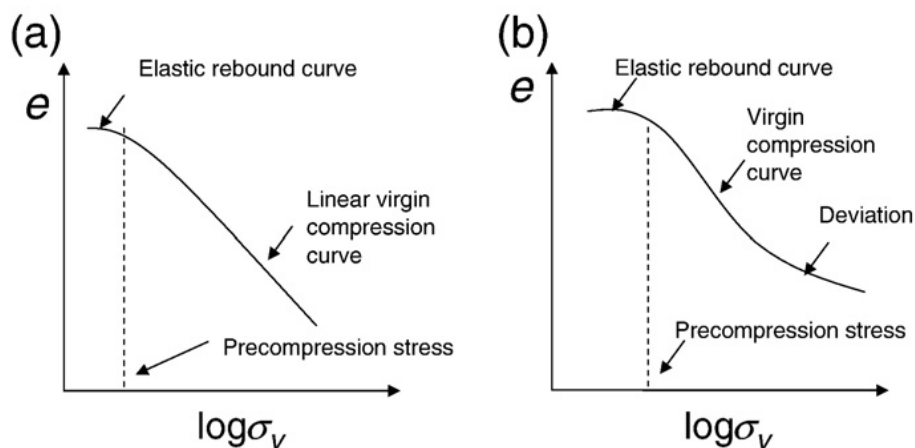


FIGURA 1.1: Formas principales de la curva de compresión uniaxial: (a) curva bilinear; (b) curva en forma de “S”.

La transición entre ambas partes se denomina *tensión de precompresión* o *carga de preconsolidación*. Los modelos elastoplásticos son los más comúnmente utilizados para interpretar los resultados de la prueba de compresión uniaxial (Défossez and Richard, 2002; Pereira et al., 2007; Mosaddeghi et al., 2007; entre otros). Estos modelos consideran que la pendiente es constante en la parte de compresión virgen. Sin embargo, algunos resultados experimentales muestran que en ciertos tipos de suelos la pendiente de este tramo disminuye a elevadas tensiones (modelos en forma de “S” figura 1.1b). Varios métodos son utilizados para determinar la tensión de preconsolidación (Casagrande, 1936; Dawidowski and Koolen, 1994; Arvidsson and Keller, 2004; Imhoff et al., 2004), y pueden cometerse errores significantes en su estimación si la curva de compresión se desvía de su tendencia lineal a elevadas tensiones. Autores como Keller et al. (2004) no consideran esta parte de la curva en dicha determinación, o utilizan funciones polinomiales o sigmoidales para ajustar su forma (Baumgartl and Köck, 2004; Gregory et al., 2006).

La *tensión de precompresión* es considerada por numerosos autores como la capacidad del suelo de soportar carga y consecuentemente, como el riesgo de compactación de los sitios cultivados (Veenhof and McBride, 1996; Horn and Fleige, 2003; Imhoff et al., 2004; Rucknagel et al., 2007). Otros lo interpretan como un indicador de la resistencia y la estabilidad mecánica del suelo (Arvidsson et al., 2001; Berli, 2001). En un sentido más estricto, la tensión de precompresión representa el historial de cargas que ha sufrido el suelo a lo largo de su historia geológica mientras que, la pendiente del tramo virgen o compresibilidad del suelo, indicaría el riesgo de compactación (Terzagui and Peck, 1976; Juárez Badillo y Rodríguez, 1972). Independientemente de la

interpretación que se haga de este punto, existe una opinión casi unánime acerca de que, si las cargas aplicadas son menores a la tensión de preconsolidación, el suelo se deforma y se recupera elásticamente. Si en cambio, las cargas ejercidas exceden la tensión de preconsolidación, la deformación sufrida en el suelo a expensas de la reducción de su espacio poroso es irreversible (Lebert and Horn, 1991).

El objetivo de este trabajo fue reflejar la evolución del historial de las cargas ejercidas sobre el suelo, a través de pruebas de consolidación unidimensional, para evidenciar las consecuencias del manejo tradicional del mismo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas se realizaron utilizando muestras de suelo inalteradas obtenidas del horizonte Bt₁ en el tercer año del ensayo que se lleva a cabo en la EEA Famailá (Tucumán) desde el año 2013. En la situación de base el sitio experimental presentaba un prolongado historial de monocultivo de caña de azúcar, bajo el método tradicional de producción. En los últimos dos años previos a la preparación de las parcelas y de las subparcelas, fue realizado un cultivo de soja implantado con siembra convencional y laboreo del suelo en 2011 y cosechado en 2012, permaneciendo posteriormente bajo vegetación natural de pastizal durante aproximadamente un año. Las muestras se extrajeron de sitios que permanecen sin disturbar en el área experimental desde el inicio del ensayo y continúan abandonados a la vegetación natural.

La secuencia de horizontes y el resultado del análisis textural del área bajo estudio se detallan en la tabla 2.1. La zona más profunda del horizonte A y del B_{t1} del sitio experimental presenta una densificación característica, que se manifiesta también en prácticamente la totalidad del área cañera de Tucumán como consecuencia del manejo convencional del cultivo (Informe Técnico Nº 25).

Horizonte	Ap	A	Bt ₁	Bt ₂	BC
Profundidad (cm)	0 - 5	5 - 25	25 - 40	40 - 62	62 - 85
Arena (%)	20,7	20,7	18,7	14,7	14,7
Limo (%)	46,0	46,0	42,0	46,0	70,0
Arcilla (%)	33,3	33,3	39,3	39,3	15,3
Clase textural	Franco arcilloso	Franco arcilloso	Franco arcillo limoso	Franco arcilloso	Franco limoso

TABLA 2.1: Secuencia de horizontes y clases texturales del suelo del área experimental.



FIGURA 2.1: a) Muestra de suelo después de la prueba de precompresión, cilindros de acero inoxidable y una muestra de suelo extraída del sitio experimental, antes de la inmersión. b) Vista del equipo en su conjunto.

Para extraer las muestras fueron utilizados cilindros de acero inoxidable tarados de 110 milímetros de diámetro interno por 32 milímetros de altura, permaneciendo contenidas en estos aros durante todo el proceso de preparación y de prueba. Para obtener las curvas de presión - deformación, las cargas de preconsolidación y el índice de compresión se siguió la metodología descrita en la Norma ASTM D 2435-03. Previamente a su colocación en el aparato de compresión uniaxial, desarrollado en el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos -LTI- (IIR-CIA-CNIA-INTA), las muestras de suelo fueron puestas en contacto con una película de agua durante 48 horas a fin de alcanzar el estado de saturación. Posteriormente fueron sometidas como mínimo a presiones verticales de 6, 19, 34, 62, 113, 210, 400, 760 y 1478 kPa. Se relevaron más puntos cuando se lo juzgó necesario a partir de las deformaciones observadas en el transcurso de cada una de las pruebas. El tiempo de aplicación de cada nivel de carga fue el necesario para permitir el drenaje, tanto por la cara superior como por la inferior, del agua excedente de la muestra de suelo. El avance del pistón, equivalente a la compresión de la muestra y a la pérdida de volumen de vacíos, se midió con un comparador electrónico digital con una resolución de 0,01 mm y los datos se enviaron mediante una interfaz a una PC donde fueron almacenados. Cuando el avance del pistón se aproximó a cero para cada nivel de carga, se determinó gráficamente la deformación de la muestra de suelo en función del logaritmo del tiempo.



FIGURA 2.2: Comparador centesimal para medir deformación de la muestra de suelo. Puede verse la interfase para conexión a PC.

Luego de haber sometido cada muestra de suelo a la totalidad de las cargas preestablecidas, fue graficada la relación de vacíos en función del logaritmo de la presión utilizando polinomios de cuarto grado para el ajuste de los resultados. A partir de estas funciones se determinó matemáticamente el punto de curvatura máxima. En este punto se calculó la pendiente de la tangente, se trazó una línea paralela al eje de las abscisas y se estableció la bisectriz del ángulo conformado por dichas rectas. La carga de preconsolidación quedó definida en el punto de intercepción de la bisectriz y la tangente a la parte de la curva correspondiente al tramo de compresión virgen. La pendiente de la tangente, equivalente al índice de compresión (C_c), fue calculada en todas las muestras de suelo ensayadas.

3. RESULTADOS

En las figuras 3.1 a 3.3 pueden observarse las relaciones presión deformación de las muestras de suelo obtenidas del horizonte Bt_1 entre 300 y 400 mm. Los parámetros característicos de estas curvas se encuentran resumidos en la tabla 3.1. En ella puede observarse que la relación de vacíos de las muestras saturadas al inicio del ensayo fue prácticamente coincidente en los tres bloques, pero difirieron sustancialmente al alcanzar las presiones de preconsolidación (P_c). A su vez, es notable la relación negativa existente entre las presiones de preconsolidación y las relaciones de vacíos alcanzadas en esos puntos.

Bloque	Relación de vacíos en el origen	Punto de máxima curvatura	Presión de preconsolidación (Pc)		Relación de vacíos en Pc	Índice de compresión (Cc)	
	cm ³ /cm ³	(log kPa)	(log kPa)	(kPa)	cm ³ /cm ³	($\Delta\gamma/\Delta x$)	(grados)
I	1,035	2,59	2,80	631,0	0,701	-0,0886	-5,06
II	1,068	2,14	2,38	240,0	0,8191	-0,0818	-4,68
III	1,080	2,48	2,77	588,8	0,788	-0,0989	-5,65

TABLA 3.1: Principales parámetros obtenidos de la relación presión - deformación de las muestras obtenidas en el horizonte Bt₁ en el rango de profundidad de 300 a 400 mm.

Los índices de compresión (Cc) alcanzados en los diferentes bloques resultaron prácticamente idénticos. Esto debe ser así pues la compresibilidad del suelo es función de su composición orgánica y mineral y en este aspecto, el área experimental es texturalmente homogénea. Sin embargo, al considerar los resultados obtenidos en las pruebas de consolidación efectuadas en la situación de base, también pudo verificarse que el efecto residual de las labranzas tiene una influencia notable sobre este parámetro ya que las pendientes de los índices de compresión se redujeron sensiblemente (Informe Técnico N° 31). Esta es una situación inusual en las pruebas clásicas de mecánica de suelos, debido a que normalmente se trabaja sobre muestras de suelos obtenidas a considerables profundidades y, en consecuencia, no disturbadas.

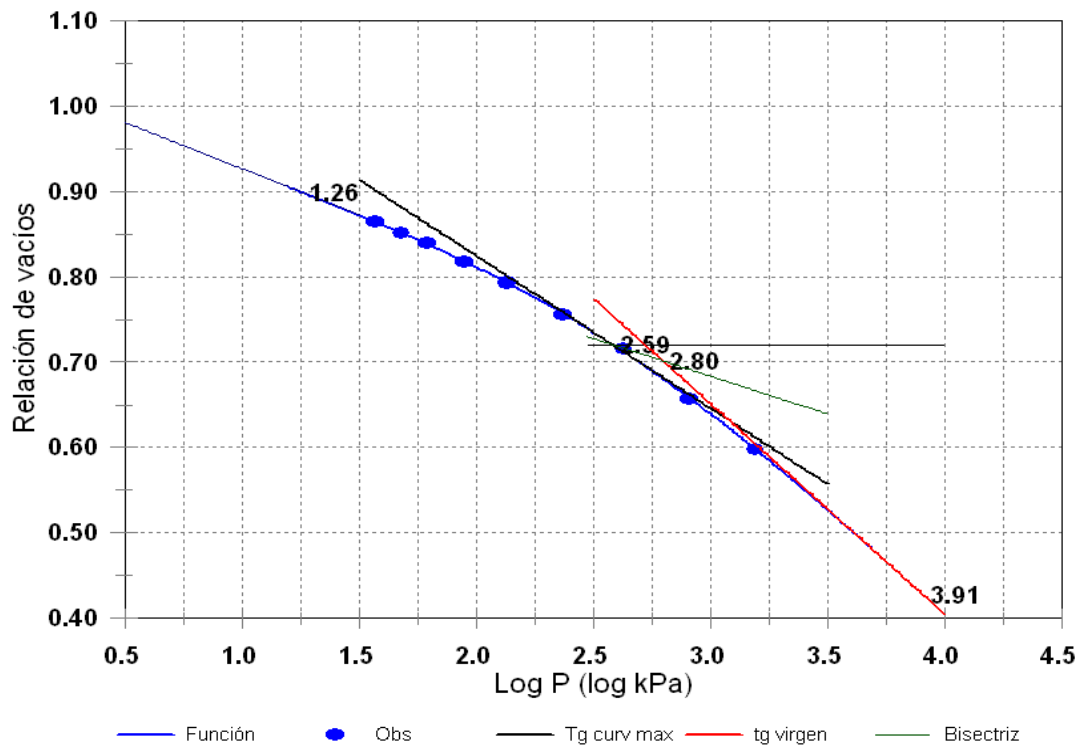


FIGURA 3.1: Relación presión – deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra obtenida en el bloque I horizonte Bt₁ entre 300 y 400 mm de profundidad.

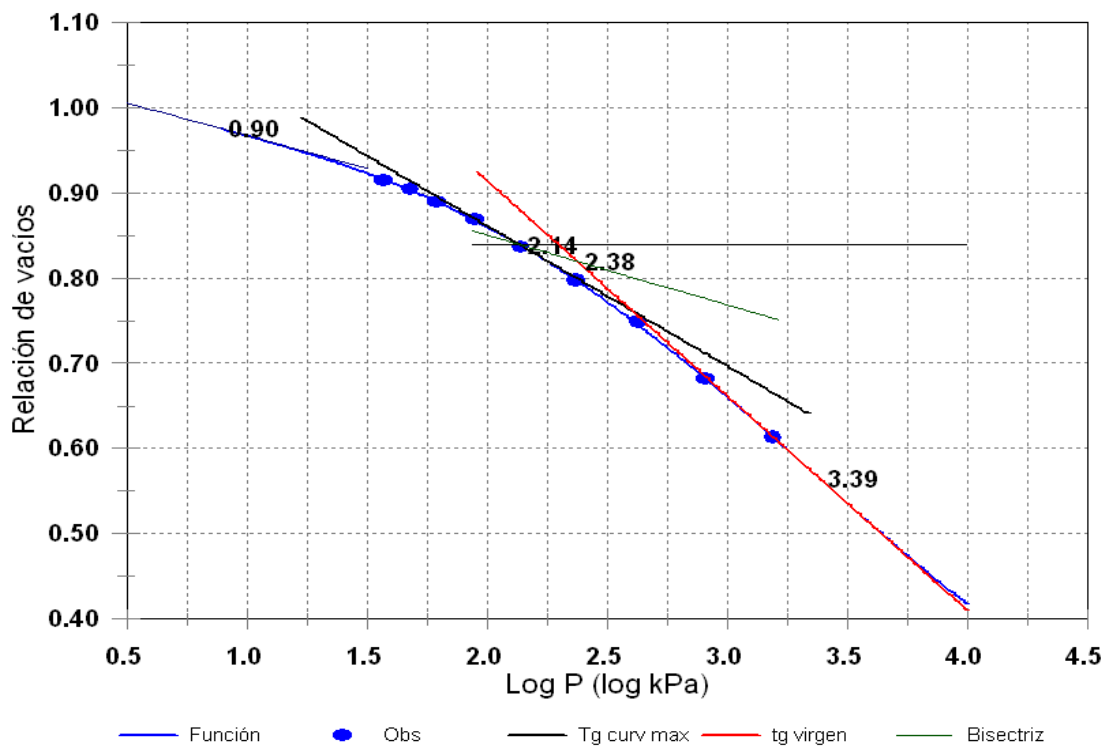


FIGURA 3.2: Relación presión – deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra obtenida en el bloque II horizonte Bt₁ entre 300 y 400 mm de profundidad.

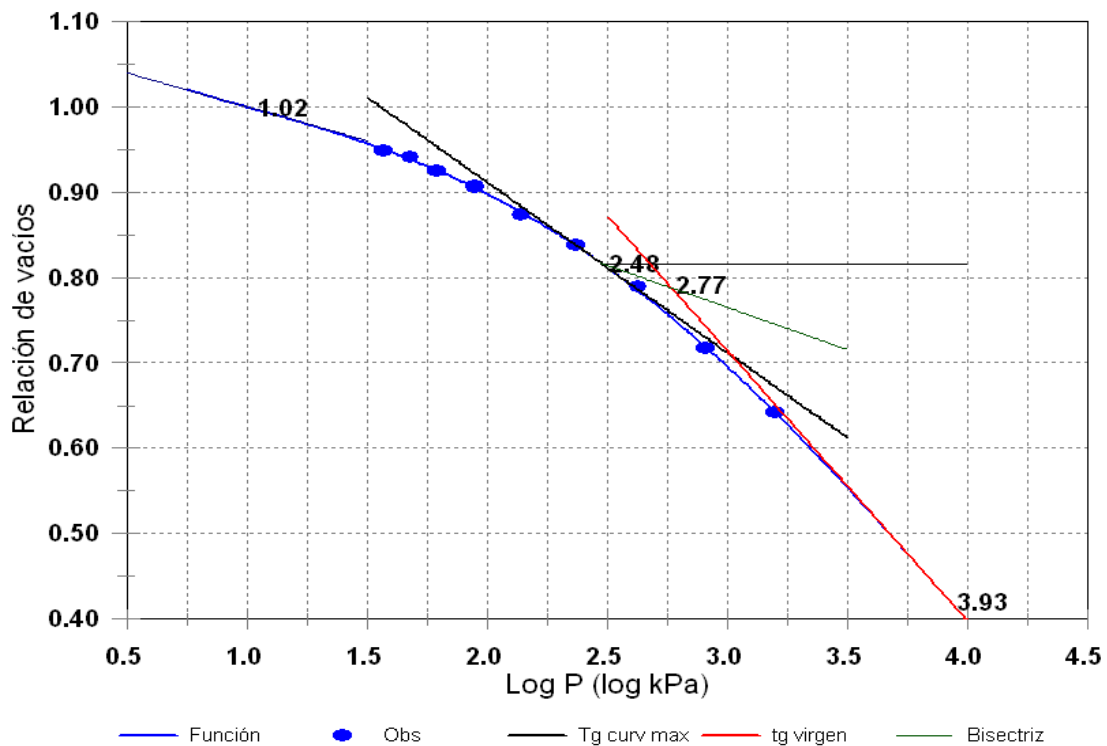


FIGURA 3.3: Relación presión – deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra obtenida en el bloque III horizonte Bt₁ entre 300 y 400 mm de profundidad.

Las presiones de preconsolidación tendieron a superar a las obtenidas en la situación de base, aunque se mantuvieron dentro del mismo orden de magnitud, manifestando nuevamente la presencia del factor antrópico. Si el suelo se encuentra normalmente consolidado, como es el caso del área experimental donde se lleva a cabo este ensayo, los valores de P_c deben responder a la presión ejercida por la tapada actual y a las fuerzas capilares que generan su contracción durante la pérdida de humedad. El peso de esta capa de suelo, de un espesor medio de 350 mm, puede calcularse en base a los datos de densidad aparente (Informe Técnico N° 25) y se la estimó en un valor de $40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ equivalente a 4,0 kPa. Las tensiones capilares que se desarrollan durante la desecación, las cuales generan gran parte de la fuerza necesaria para que se produzca la contracción, también aportan a la consolidación del suelo. El cálculo de la tensión neutra al inicio de la entrada de aire en el suelo y de su fase de contracción residual realizado en el LTI arrojó para el horizonte Bt₁ un valor aproximado a los 16 kPa ($pF = 2,2$ equivalente a 158,5 cm de altura de columna de agua). Hacia el fin del período de contracción residual (20% de humedad gravimétrica $pF = 3,00$ o 1000 cm de columna de agua) este valor puede alcanzar a 100 kPa. La sumatoria de estos factores, capa de suelo y fuerzas capilares, es notablemente inferior a los valores de P_c obtenidos mediante la prueba de consolidación unidimensional. La diferencia entre el P_c calculado, respecto de los observados, obedece a las cargas aplicadas sobre el suelo al utilizar el método tradicional de cosecha. Las

máquinas cosechadoras de mayor uso en la zona cañera de Tucumán pesan entre 12 y 16 toneladas y la mayoría de su masa gravita sobre el tren trasero. Estas máquinas circulan a escasa velocidad y cosechan de a un surco, por lo cual cada entresurco o trocha es pisada dos veces en el transcurso de la labor. Además, el acarreador que transporta el material cosechado hacia los carros tolva o los camiones, desplaza lateralmente el centro de gravedad provocando que más de la mitad del peso total de la máquina sea ejercido alternativamente sobre una de las dos ruedas traseras. Debido a esto, las máquinas se encuentran equipadas con neumáticos extraviarios no agrícolas ya que, no existe un neumático agrícola que sea capaz de soportar cargas semejantes. En cualquier tipo de neumático, su capacidad de soportar carga es función de la presión de inflado. Los neumáticos agrícolas utilizan bajas presiones de inflado debido a que éstos cumplen una función de amortiguación, que se logra a partir de la deformación de sus flancos. En los extraviarios, por el contrario, con presiones de inflado de 350 a 400 kPa se comportan como una rueda rígida, por lo cual no tienen condiciones para amortiguar cargas ni vibraciones y las transmiten por completo al suelo. Peor aún es el caso de los neumáticos viales utilizados por los camiones, en los cuales las presiones pueden alcanzar valores de 650 a 700 kPa. Haciendo una simplificación de esta temática, puede asumirse que la presión de inflado es la que se transmite al suelo. Este nivel de tensiones fue observado en algunos sitios del área experimental.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Los primeros resultados, obtenidos de las pruebas de consolidación en la situación de base, ya habían insinuado las consecuencias del historial de cargas ejercido sobre el suelo. Sin embargo, en ese momento aún persistía en el área experimental el efecto de las labranzas realizadas en 2011, situación ésta que se hizo evidente a partir de los muestreos realizados luego del año 2014. La residualidad de las labores mantuvo en el suelo porosidad de escasa resistencia mecánica, reduciendo los valores de P_c en todo el perfil evaluado y principalmente en el horizonte A. En este horizonte, las muestras inalteradas utilizadas para esta prueba tuvieron un comportamiento semejante a las remoldeadas y, por este motivo, no han vuelto a ser empleadas en estas pruebas. En cambio, en el horizonte Bt_1 , mucho menos disturbado que el A, las curvas presión - deformación manifestaron claramente el inicio de la consolidación del suelo, al presentar una notable reducción en su etapa de deformación plástica y paralelamente, un elevado gradiente para que este proceso continúe progresando. También, en la situación de base, tendieron a ser minimizadas las estimaciones de la reducción de la relación de vacíos en equilibrio con las cargas ejercidas por los neumáticos, de 400 kPa, ya que este umbral fue superado en el presente relevamiento.

Los resultados actuales indican que gran parte de las cargas aplicadas ya han sido transferidas a la matriz del suelo. Lo que inicialmente se consideró un riesgo a su integridad física, se presenta ahora como una consecuencia concreta del manejo tradicional del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alakukku, L., P. Weiskopf, W.C.T. Chamen, F.G.J. Tjink, J.P. van der Linden, S. Pires, C. Sommer and G. Spoor. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.* 73: 145-160.

Arvidsson, J. and T. Keller. 2004. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Till. Res.* 77: 85-95.

Arvidsson, J., A. Trautner, J.J.H. van den Akker and P. Schjønning. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil Tillage Res.* 60: 79-89.

ASTM D2435. 2003. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soil. American Society of testing material.

Berli, M. 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. PhD dissertation. 14132. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 55 pp

Baumgartl, T. and B. Köck. 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 57-65.

Cavaleri, K. M., J. Arvidsson, A., Pires da Silva and T. Keller. 2008. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research* 98 (2008) 17-26

Casagrande, A. 1936. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. *Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics Foundation Engineers Cambridge, MA.* Vol. 3, p. 60.

Chan, K.Y., A. Oates, A.D. Swan, R.C. Hayes, B.S. Dear and M.B. Peoples. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till. Res.* 89: 13-21.

Czyz, E.A. 2004. Effect of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil Till. Res.* 79: 153-166.

Dawidowski, J.B. and A.J. Koolen. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil Till. Res.* 31: 277-282.

Défosse, P. and G. Richard. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.* 67: 41-64.

Gregory, A.S., W.R. Whalley, C.W. Watts, N.R.A. Bird, P.D. Hallet and A.P. Whitmore. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Till. Res.* 89: 45-57.

Horn, R. and T. Baumgartl. 1999. Dynamic properties of soils. In: Sumner, M.E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, A19-A53.

Horn, R. and H. Fleige. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Till. Res.* 73: 89-99.

Horn, R. and J. Rostek. 2000. Subsoil compaction processes. In: Horn, R.; van den Akker, J.; Arvidsson, J. (Eds.). *Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences. Advances in Geocology* 32. IUSS: 44-54.

Imhoff, S., A.P. Da Silva and D. Fallow. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 17-24.

Juárez Badillo, E. y A. Rodríguez. 1972. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa. 414 pp.

Keller, T., J. Arvidsson, J.B. Dawidowski and A.J. Koolen. 2004. Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res.* 77: 97-108.

Lebert, M. and R. Horn. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.* 19: 275-286.

Lipiec, J. and R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116 (2003) 107-136

Mosaddeghi, M.R., A.J. Koolen, A. Hemmat, M.A. Hajabbasi and P. Lerink. 2007. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. *J. Terramechs.* 44: 53-63.

Pagliai, M., N. Vignozzi and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research* 79 (2004) 131-143

Pereira, J.O., P. Défossez and G. Richard. 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *Eur. J. Soil Sci.* 58 (1): 34-44.

Rucknagel, J., B. Hofmann, R. Paul, O. Christen and K.J. Hülsbergen. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil Till. Res.* 92: 213-220.

Soane, B.D. and C. van Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction and Crop Production. Developments in Agricultural Engineering*, vol. 11. Elsevier, Amsterdam, 1-21.

Terzaghi, K. 1936. Simple tests determine hydrostatic uplift. *Engineering News Record*, 116 (25): 872-875.

Terzaghi, K. and R.B. Peck. 1976. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Editorial El Ateneo. 750 pp.

Trautner, A. and J. Arvidsson. 2000. Subsoil compaction caused by machinery traffic at different soil water contents. In: Arvidsson, J., van den Akker, J.J.H., Horn, R. (Eds.), *Proc. 3rd Workshop of the Concerted Action "Experiences with the Impact of Subsoil Compaction on Soil, Crop Growth and Environment and Ways to Prevent Subsoil Compaction"* 14-16 June 2000, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 122-130.

Veenhof, D.W. and R.A. McBride. 1996. Overconsolidation in agricultural soils. I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 362-373.

La presente publicación integra una serie de Informes Técnicos editada por el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos del Instituto de Ingeniería Rural. Estos informes tienen como finalidad poner a disposición de los profesionales oficiales y privados, la información generada en los trabajos de investigación llevados a cabo por el mismo.



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación