

ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LOS VERTISOLES DE ENTRE RÍOS EN UN SISTEMA ARROCERO REGADO CON AGUA SUBTERRÁNEA*

CERANA, J.A.¹; WILSON, M.^{1y2}; DE BATTISTA, J.J.³; NOIR, J.⁴; QUINTERO, C.¹

RESUMEN

El sistema de producción de arroz (*Oryza sativa* L.) en Entre Ríos ha cobrado importancia en los últimos años, siendo muy exigente respecto a los dos recursos naturales principales utilizados: el suelo y el agua. La producción de arroz tiene características diferentes al de otros sistemas productivos. Requiere de un excesivo laboreo para la preparación de la cama de siembra, tareas de construcción y nivelación de camellones, mientras que la cosecha se realiza en condiciones de saturación del perfil. En el área arrocera núcleo se utiliza para el riego agua subterránea, bicarbonatada sódica. El objetivo fue evaluar los efectos del riego y la intensificación del sistema de producción de arroz sobre la estabilidad estructural de Vertisoles. Se utilizaron los índices de Hénin y otras variables físico-químicas del suelo. El sistema de producción de arroz regado con agua bicarbonatada sódica provocó la pérdida de materia orgánica y el aumento del sodio de intercambio en el suelo,

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. CC 24 (3100) Paraná, Entre Ríos.

Proyecto FONCYT «Sustentabilidad del cultivo de arroz en la provincia de Entre Ríos».

² Grupo Recursos Naturales y Factores Abióticos EEA INTA Paraná. Correo electrónico:

mwilson@parana.inta.gov.ar

³ Área Suelos EEA INTA Concepción del Uruguay.

⁴ Becario de Iniciación a la Investigación UNER.

*Este trabajo de investigación constituye parte de la Tesis de Maestría del segundo autor FCA UNRC.

problema que se acentuó cuando la participación del arroz fue mayor en la rotación. Los índices de estabilidad estructural de Hénin constituyeron buenos indicadores que reflejaron el deterioro de la condición del suelo. Los agregados estables al benceno y agregados promedio fueron sensibles y mostraron que la participación en menos del 20% de arroz en la rotación, no produjo deterioro significativo sobre la estructura con respecto a lotes agrícolas sin arroz.

Palabras clave: *estabilidad estructural: Vertisoles, arroz, riego, calidad del agua.*

ABSTRACT

SOIL STRUCTURAL STABILITY OF VERTISOLS IN ENTRE RÍOS PROVINCE, ARGENTINA, UNDER RICE PRODUCTION IRRIGATED WITH HIGH SODIUM BICARBONATE WATER

Rice production in Entre Ríos Province, Argentina, differs from other farming crops systems. This is so because of excessive soil tillage, leveling and irrigation systematization, frequently waterlogged soils at rice harvest and the use of heavy farm machinery. In addition, soil deterioration in Vertisols increases with the application of sodium bicarbonate waters. The objective of this work was to evaluate changes in soil structural stability of Vertisols, because of the production of rice irrigated with high sodium bicarbonate water. Soil organic matter decreased and exchangeable sodium increased, in fields with high participation of rice in crop rotations. Structural stability (Henin) indices were sensible to soil deterioration. Benzene stable aggregates showed high correlation with organic matter content, and K index with exchangeable sodium values. These changes were caused by the effect of irrigation water in the rice crop. Crop rotation with less 20% irrigated rice did not show structural deterioration.

Key words: *structural stability, vertisols, irrigation, rice, water quality.*

INTRODUCCIÓN

El sistema de producción de arroz en Entre Ríos es muy exigente respecto a los dos principales recursos naturales involucrados: el suelo (Vertisoles con alta proporción de arcillas expansibles) y el agua (por cuanto se requiere de grandes volúmenes para el mantenimiento de una lámina de inundación permanente durante un período prolongado).

A fines de la década pasada, se produjo un cambio en el modelo arrocero tradicional (ganadero/arroz), que pasó a un sistema más intensivo de secuencias de cultivos, con numerosos casos de arroz/arroz, siste-

ma arroz/ray grass (*Lolium multiflorum* L.)/arroz y escasa rotación con praderas. El área cultivada con arroz fue ocupando una mayor superficie en la rotación avanzando sobre las tierras con montes nativos. Esto trajo aparejado además que se concentrara la extracción de importantes volúmenes de agua subterránea en un reducido territorio.

El exceso de tránsito y laboreo, que tiene como finalidad buscar un tamaño reducido de agregados para facilitar las tareas de nivelación del lote y construcción de camellones, le otorga características distintivas al sistema de producción de arroz respecto de otros cultivos con efectos negativos para el uso sustentable del suelo. Asimismo, la cosecha constituye una importante agresión, ya que requiere del uso de maquinarias de gran peso y la operación se realiza bajo condiciones de saturación del perfil. Ello trae como consecuencia más directa la compactación del suelo (Pozzolo *et al.*, 2001).

El arroz es una planta semiacuática y necesita de condiciones de suelo inundado durante gran parte de su desarrollo. El manejo tradicional del cultivo en la provincia consiste en regar a los 25-30 días de la siembra, utilizando el método de riego por inundación de melgas en contorno. Se comienza con una lámina que oscila entre 5 y 12 cm según el ciclo, por un período de 90 a 100 días, a partir del cual se drena el lote previamente a la cosecha. Ello representa un consumo de agua de 1000 a 1300 mm anuales.

El riego en el cultivo de arroz, requiere de suelos que mantengan el agua de inundación, y en tales condiciones se producen cambios físicos, químicos y biológicos. El Plan Mapa de Suelos de Entre Ríos (1984), considera que los Vertisoles hidromórficos del centro-norte y nordeste de la provincia, clasificados como Peludertes argiacuólicos (Vertisoles hidromórficos), Argiudoles vérticos y Argiacuoles vérticos (Gley subhúmicos), reúnen condiciones óptimas para el cultivo de arroz fundamentándose en la permeabilidad muy lenta de los horizontes, pendientes muy suaves, que no sufren problemas de erosión y poseen acuíferos de gran volumen y calidad. Corresponde al Departamento San Salvador el 81% de la superficie de suelos aptos y muy aptos para el uso específico con arroz (Plan Mapa de Suelos de Entre Ríos, 1999).

La calidad del agua subterránea utilizada para el riego, al ser bicarbonatada sódica provoca la dispersión de los coloides del suelo, hecho que se acentúa cuando predominan arcillas montmorillonitas (Ayers

y Westcot, 1976). Las modificaciones sobre las propiedades físicas por acción del sodio intercambiable en Vertisoles fueron ampliamente descritas por So y Aylmore (1993) y Warkentin y Yong (1962), Dowdy y Larson (1971) citados por Blokhuis (1982).

Es importante comprender la interacción que existe entre las cargas negativas de los coloides de las partículas de arcilla y la distribución del balance de contorno de los cationes intercambiables que controla los procesos de floculación y dispersión (So y Aylmore, 1993). So y Cook (1993) estudiaron el efecto del incremento del catión sodio y su relación con la conductividad hidráulica en Vertisoles y demostraron que el aumento del contenido de sodio de intercambio provocó la dispersión de arcillas y la consiguiente inestabilidad estructural.

La estabilidad estructural (EE) es un atributo sensible que puede indicar tendencias a la recuperación o degradación por ser de carácter dinámico (Doran y Parkin, 1994). Orellana y Pilatti (1994) consideran la EE como un componente importante de la calidad del suelo, dado que sus valores son resultantes de la calidad de los poros, el aporte orgánico y la actividad biológica. Para Vázquez *et al.* (1990) la estabilidad estructural fue el indicador más sensible en función del uso del suelo, trabajando con Molisoles de Buenos Aires. Por otro lado, Wilson *et al.* (2000) evaluaron atributos físicos, químicos y biológicos del suelo e identificaron los más sensibles a los cambios ocasionados por el uso y manejo en suelos vertisólicos sobre rotación agrícola-ganadera, resultando la materia orgánica y la estabilidad estructural las variables más apropiadas para ser utilizadas como indicadores de calidad y sostenibilidad, mientras que el K de percolación de Hénin no reflejó los efectos de deterioro. En el mismo sentido, Arias y De Battista (1984) hallaron que el uso agrícola continuo de Vertisoles de Entre Ríos mostró una marcada degradación de los agregados respecto a los suelos bajo pradera o campo natural.

En estudios realizados en diferentes regiones agrícolas del país y utilizando diferentes métodos de determinación, Pecorari (1988), Vázquez *et al.* (1990), Carlevaro *et al.* (1991), Orellana y Pilatti (1994) y Urricariet y Lavado (1999) destacaron a la estabilidad estructural como variable afectada por el uso en función de la agricultura practicada y del número de años, dependiente a su vez del tipo de suelo.

Alconada y Lavado (1992/93), evaluaron la estabilidad estructural en un Natracualf típico de la Pampa Deprimida, por medio de distintas téc-

nicas analíticas y concluyeron que el valor de cambio de diámetro medio ponderado (De Leenheer y De Boodt 1958), no reveló el estado de degradación observable a campo y apreciable en otras propiedades físicas y químicas. Por el contrario, los índices de dispersión de arcillas y de inestabilidad estructural (Is) y K de percolación (Hénin *et al.*, 1958), resultaron adecuados para evaluar la estabilidad de este tipo de suelos sódicos.

La combinación de pretratamientos de la muestra de suelo en el índice de inestabilidad (Is) permite clasificar globalmente distintos suelos y compararlos entre sí. Sin embargo, cada uno de ellos tiene un sentido por sí mismo y es interesante considerar esos valores separadamente, para poder establecer las causas de la inestabilidad estructural de un suelo dado (Mathieu y Pieltain, 1998). En tal sentido, Marassi y Benavidez (1988) comprobaron que dichos índices fueron sensibles y detectaron estados de deterioro físico de suelos sujetos a diferentes tratamientos de uso y manejo del cultivo de arroz. Asimismo, De Datta y Hundal (1984), mencionan que el uso arrocero provoca el deterioro de la estructura del suelo causando efectos negativos para la implantación del cultivo de arroz al reducir la emergencia de plántulas por encostramiento, pudiendo llegar a ser perjudicial para otros cultivos no regados intervinientes en la rotación.

La hipótesis de trabajo es que el aumento de la participación del arroz en la rotación en Vertisoles regados con agua bicarbonatada sódica provoca el deterioro de la estructura del suelo a nivel superficial. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es conocer y cuantificar el efecto de la intensificación del uso arrocero en Vertisoles de Entre Ríos regados con agua de origen subterráneo, con la finalidad de establecer cuál debería ser la participación del arroz en la rotación en un planteo sustentable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en la zona arrocera núcleo de Entre Ríos, ubicada entre los ríos Uruguay y Gualeguay entre los paralelos 31° y 33° de latitud sur, donde predomina el uso de agua de origen subterráneo para el riego. En la Tabla 1 se presenta una caracterización de la calidad del agua utilizada.

Los suelos han sido clasificados en general como Peludertes argiacuólicos (Vertisoles hidromórficos), particularmente utilizados para el cultivo de arroz; Argiudoles y Argiacuoles Vérticos (Plan Mapa de Suelos de Entre Ríos, 1984).

Tabla 1. Caracterización físico-química del agua para riego de origen subterráneo del área arrocera núcleo de Entre Ríos, n = 35. Tomado de Wilson *et al.*, (2002).

	pH	CE μScm ⁻¹	Ca ⁺² mg l ⁻¹	Mg ⁺² mg l ⁻¹	Na ⁺ mg l ⁻¹	CO ₃ H ⁻ mg l ⁻¹	RAS	RAS ajust.
Promedios	6.81	753.9	46.1	6.1	118.9	440.9	4.72	9.66
Máximos	7.70	1067.0	88.2	14.6	207.0	732.2	8.52	18.27
Míminimos	6.2	550.0	20.0	0.5	28.8	244.1	0.74	1.76

Se seleccionaron 10 sitios de muestreo con diferentes historias agrícolas (Figura 1) donde se utiliza para el riego agua de origen subterráneo, con dominancia de bicarbonato de sodio (HCO₃Na). Se tomaron muestras de suelo no disturbado, compuestas (0-12 cm). En cada sitio de muestreo se seleccionaron las siguientes situaciones por comparar: inalterada (No-La), laboreado nunca arroz (No-Az) y laboreado con diferente participa-



Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo en el área núcleo de producción de arroz.

ción del arroz en la rotación, ubicadas a una distancia no menor de 1000 m entre sí. Las rotaciones incluyeron praderas con alfalfa o trébol rojo como base y secuencias de cultivos de soja, arroz, maíz y sorgo. Es común la siembra de *ray grass* durante el invierno en las secuencias arroz/ arroz.

El muestreo fue realizado en la loma y media loma alta de los lotes, previo a la siembra de cultivos de verano, en el año 1999 (18 muestras) y año 2000 (36 muestras) totalizando 54 muestras.

Se determinó la Inestabilidad estructural (Is) por el método de Hénin *et al.* (1958), basado en el uso de pretratamientos que impiden o acentúan los procesos de degradación de la estructura (con agua, alcohol etílico y benceno). Los valores así obtenidos son considerados representativos del estado inicial de la estabilidad. En el denominador se utiliza el valor promedio de los tres pretratamientos:

$$Is = \frac{\% \text{ máximo de fracción inestable (A + L)}}{\text{Promedio de agregados estables (\%) - (0.9 \% \text{ de arena gruesa})}$$

donde A: arcilla y L: limo

Se determinó el Índice K de percolación (Hénin *et al.*, 1958) obtenido a través del pasaje de agua por una columna de suelo, en un determinado tiempo.

Por otra parte, se determinó la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y sodio de intercambio (Na^+), calculándose el porcentaje de sodio de intercambio (PSI). Se obtuvo Materia Orgánica (%MO), Nitrógeno total (Nt) y, del extracto de saturación, se determinó pH (pHE), conductividad eléctrica (CEE) (Richards, 1970), cationes solubles según Jackson (1976) y se calculó la relación de adsorción del sodio (RASE) (USSL Staff, 1954).

Los datos fueron sometidos a análisis utilizando el programa estadístico InfoStat Versión 1.1 (2002).

Se realizó Análisis Multivariado de Componentes Principales (ACP), con el fin de determinar cuáles constituían los atributos más sensibles al uso arrocero. Se ordenaron los datos con la siguiente numeración: 0-9 inalterado, 10-20 laboreado sin arroz, 21-36 < 40% de arroz y 37-54 más de 40% de arroz. En la Figura 2 los números están ordenados en la serie natural y los valores 0 del biplot de los ejes X e Y se ubican en el centro de dicha figura.

Se evaluaron las variables de Hénin en función de: a) la situación de manejo (Tabla 2) y b) la participación del cultivo de arroz en la rotación, expresado en porcentaje.

Tabla 2. Ordenamiento jerárquico en función de la situación de manejo.

Situación de manejo	
<i>Inalterado</i>	Corresponde a campo natural, bajo alambrado o monte
<i>No Az</i>	Agricultura sin arroz (praderas, cultivos, descanso, etc.)
<20%	Idem anterior más; 1 año arroz
20-40%	Agricultura o pradera con más de 2 ó 3 años de arroz
40-60%	El arroz ocupa aproximadamente la mitad del tiempo de la rotación
>60%	Arroz continuo o con descanso, u otro cultivo en menos de 50%

Para la comparación de las situaciones de manejo se tomaron los valores absolutos de las variables y se realizó el ANOVA, graficándose el test de comparación múltiple de medias para las correspondientes categorías (LSD 5%).

Para el análisis de la participación del arroz en la rotación (%), se llevaron los datos originales de cada variable a valores relativos, expresados en porcentajes de la situación inalterada de cada sitio de muestreo, anulando de esta manera la variabilidad correspondiente a los diferentes sitios. Con dichos valores se obtuvieron los análisis de regresión lineal y exponencial, lográndose los R^2 , pendientes y significancias. Se seleccionó la regresión de mayor ajuste con la variable en estudio en función de los diferentes porcentajes de arroz en la rotación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presenta la caracterización de la condición inalterada en los sitios de estudio, observándose que corresponden a la clase textural Arcillo-Limoso, a excepción de Campo La Isleta de textura Franco-Arcillo-Limosa. La condición inalterada presentó valores aceptables de pH, MO y PSI, para el uso agrícola.

El uso arrocero produjo un fuerte impacto sobre las variables físicas y físico-químicas, mostrando un deterioro generalizado del suelo. En la Figura 2 y en la Tabla 4 puede observarse que con el Componente 1 (CP1)

Tabla 4. Análisis de componentes principales del sistema arrocero en suelos vertisólicos regados con agua bicarbonatada sódica.

Lambda	Valor	Proporción	Prop. acum.	Variables	e1	e2
1	8.13	0.63	0.63	AGU	-0.33	0.07
2	1.55	0.12	0.74	BEN	-0.32	0.17
3	0.92	0.07	0.82	Fi	0.29	-0.29
4	0.79	0.06	0.88	MED	-0.34	0.10
5	0.43	0.03	0.91	Is	0.30	-0.19
6	0.34	0.03	0.94	K	-0.29	0.10
7	0.24	0.02	0.95	MO	-0.26	0.15
8	0.22	0.02	0.97	CSI	0.26	0.37
9	0.18	0.01	0.98	PSI	0.26	0.25
10	0.10	0.01	0.99	Nt	-0.25	0.13
11	0.08	0.01	1.00	CEE	0.08	0.65
12	0.02	0.00	1.00	pHE	0.26	0.20
13	0.00	0.00	1.00	RASE	0.27	0.35

se logró diferenciar del resto hacia la izquierda a las situaciones inalteradas y agricultura No-Az. Ellas se relacionaron con las variables MO, Nt y los agregados estables (AGU, ALC, BEN, MED), junto al K de percolación. Hacia la derecha se diferenciaron los sitios con mayor proporción de arroz, destacándose aquellas variables donde participa el sodio (CSI, PSI, RASE, pHE) y la fracción inestable junto al índice de inestabilidad.

En el Componente 2 (CP2) fueron importantes la Fi y el Is, los cuales están asociados con los sitios 10 a 20 (agrícolas sin arroz en la rotación). La propiedad dominante fue la CEE, la cual se asoció con el riego y a aquellas variables involucradas con el sodio. En el ACP, el CP1 explica el 63% de la variación de la información y con la inclusión del CP2 es posible explicar el 74% de la variación total, demostrando la buena asociación entre las variables analizadas y los sitios seleccionados.

El índice Is aumentó conforme a la disminución del contenido de MO ($y = 2,32 e^{-0,48x}$ $R^2 = 0,64$) y la pérdida de permeabilidad (medida con el

índice K), debido al aumento en el contenido sodio de intercambio en suelos arroceros ($y = 19,70 x^{-1,76} R^2 = 0,65$), (Figura 3). Hénin *et al.*, (1972) sostienen que la influencia de iones alcalinos o un exceso de sal actúan más fuertemente sobre la permeabilidad que sobre la estabilidad de agregados, mientras que la materia orgánica modifica los resultados de los agregados estables más que a la permeabilidad.

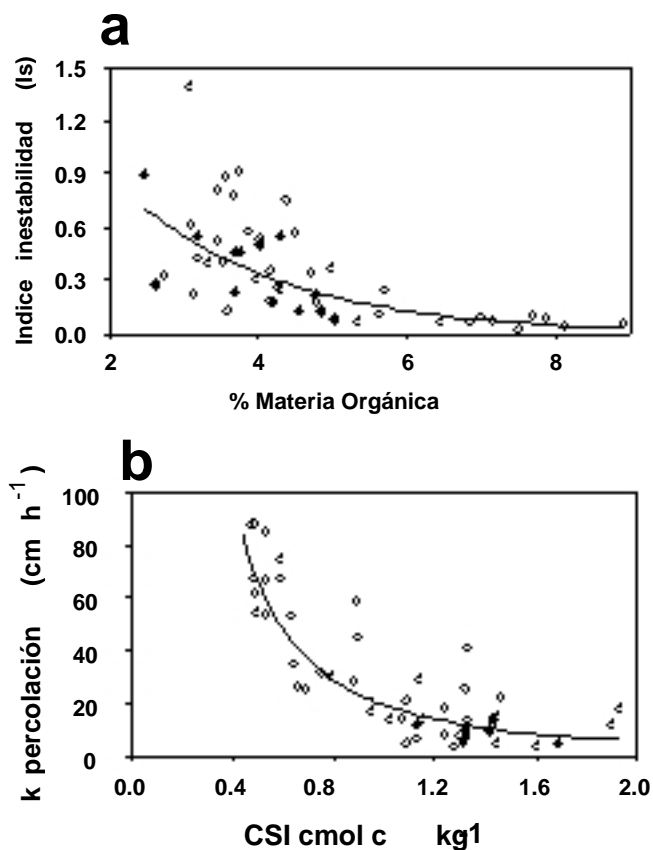


Figura 3. Efecto del contenido de materia orgánica y de sodio intercambiable sobre la estabilidad estructural de los suelos arroceros regados con agua subterránea en Entre Ríos.

Los síntomas detectados de deterioro edáfico están relacionados a la pérdida de materia orgánica debido al excesivo laboreo y la intensificación del sistema productivo, además de los problemas provocados por la calidad del agua utilizada para el riego. En un amplio estudio realizado en Punjab, Pakistán, sobre utilización de agua subterránea para el riego de arroz, Jehangir *et al.* (2002), indican que ésta provocó salinidad y sodicidad. Ello dio como resultado un incremento de tierras improductivas y costos extras para mejorar la calidad del agua y la recuperación de los suelos. Por otra parte, el riego en el Sahel (África) con aguas de RAS de 10 a 50 y pH de 8,5 a 10, durante más de 30 años, provocó la pérdida de macroporosidad, reduciendo la permeabilidad del suelo. En los suelos se forma una costra compacta que dificulta las labores, la plantación y la penetración de las raíces. A su vez, el elevado pH reduce en el suelo la utilización de nutrientes e incrementa las pérdidas por volatilización (WARDA, 1993).

El agua subterránea del área arrocerá de Entre Ríos es de salinidad media a alta y de baja RAS (Tujchneider, 1987), con altos contenidos de bicarbonato. De acuerdo con las normas del USSL Staff (1954) en suelos de textura fina y drenaje restringido, el agua presenta peligro de sodificación. Asimismo, Wilson *et al.* (2002) evaluaron la calidad del agua subterránea de la zona arrocerá y que coincide con el área de estudio del presente trabajo (Tabla 1). Al tomar en consideración los umbrales de deterioro para suelos con dominancia de arcillas montmorilloníticas (RAS ajustada) propuesto por Ayers y Westcot (1976), donde se corrige la RAS en función de la concentración de carbonatos y bicarbonatos en el agua de riego, el 91% de las aguas analizadas superó el umbral crítico de la RAS ajustada = 6, de las cuáles el 57% presentó valores mayores a 9, que advierte sobre graves problemas de dispersión que afectan la permeabilidad del suelo. Este efecto se vio reflejado en el aumento del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) al incrementarse la participación del arroz en la rotación, con una sodificación que alcanzó valores cercanos a 15%. A su vez, existe un desequilibrio entre la RAS y la salinidad (valores comprendidos entre 550 y 1067 mScm⁻¹ de conductividad eléctrica), que magnifican los efectos de sodificación de suelos. La conductividad hidráulica del suelo disminuye cuando se incrementa la RAS y decrece la concentración salina (Curtin *et al.*, 1994). Altos niveles de electrolitos en la superficie del suelo previenen los efectos negativos del sodio sobre las propie-

dades del suelo. Sin embargo, constituyen un peligro potencial para cultivos sensibles a las sales como el caso de la soja (Beecher, 1991).

La presencia de sodio en la superficie de las arcillas provoca su dispersión y efectos adversos sobre los macroagregados (Cook *et al.*, 1992; So y Cook, 1993; Levy y Torrento, 1995; Field *et al.*, 1997), produciendo inestabilidad de los macroporos, asociado a una baja infiltración y drenaje restringido (Jayawardane y Chan, 1994), reflejado en aspectos agronómicos (Gutiérrez Boem y Lavado, 1996).

En la Figura 4 puede observarse que los agregados estables al agua difirieron significativamente entre la condición inalterada (más de 65% de agregados estables) y el resto de las situaciones de manejo. Lo mismo ocurrió entre No-Az (laboreado no arroz) respecto al resto de los tratamientos donde se incluyó el cultivo de arroz. Por otro lado, entre las situaciones de <20%, 20-40% y 40-60% de arroz en la rotación no existieron diferencias significativas, difiriendo a su vez de >60% de arroz, el cual presentó valores inferiores al 30% de agregados estables.

Para los agregados estables al benceno y agregados promedios (Figura 4, Tabla 5) se registraron 5 categorías estadísticas, logrando de esta manera una gran diferenciación y mostrando una buena sensibilidad. Como en el caso anterior, la condición inalterada presentó los mejores registros con más del 60% de agregados estables, diferenciándose significativamente del resto. El tratamiento No-Az (laboreado no arroz) junto con <20% de arroz no difirieron estadísticamente entre sí, mientras que este último tampoco se diferenció de 20-40%.

El resto de las variables analizadas mostraron la misma tendencia observada en los casos anteriores, aunque con una menor sensibilidad de los datos.

Respecto al K de percolación de Hénin, el mismo presentó una buena sensibilidad, logrando marcar diferencias significativas entre la condición inalterada y el resto, no así entre No-Az (laboreado no arroz) y <20%. El K de percolación es un método indirecto utilizado para evaluar la estabilidad de la estructura del suelo, particularmente el efecto sobre el sistema poroso. Determina la percolación poniendo en evidencia el mecanismo de estallido que produce el hinchamiento de las partículas, ya que la estabilidad estructural del suelo está condicionada esencialmente por dos propiedades físicas: la mojabilidad (factor de degradación) y la cohesión al estado húmedo (factor de resistencia). Suelos con estructura poco es-

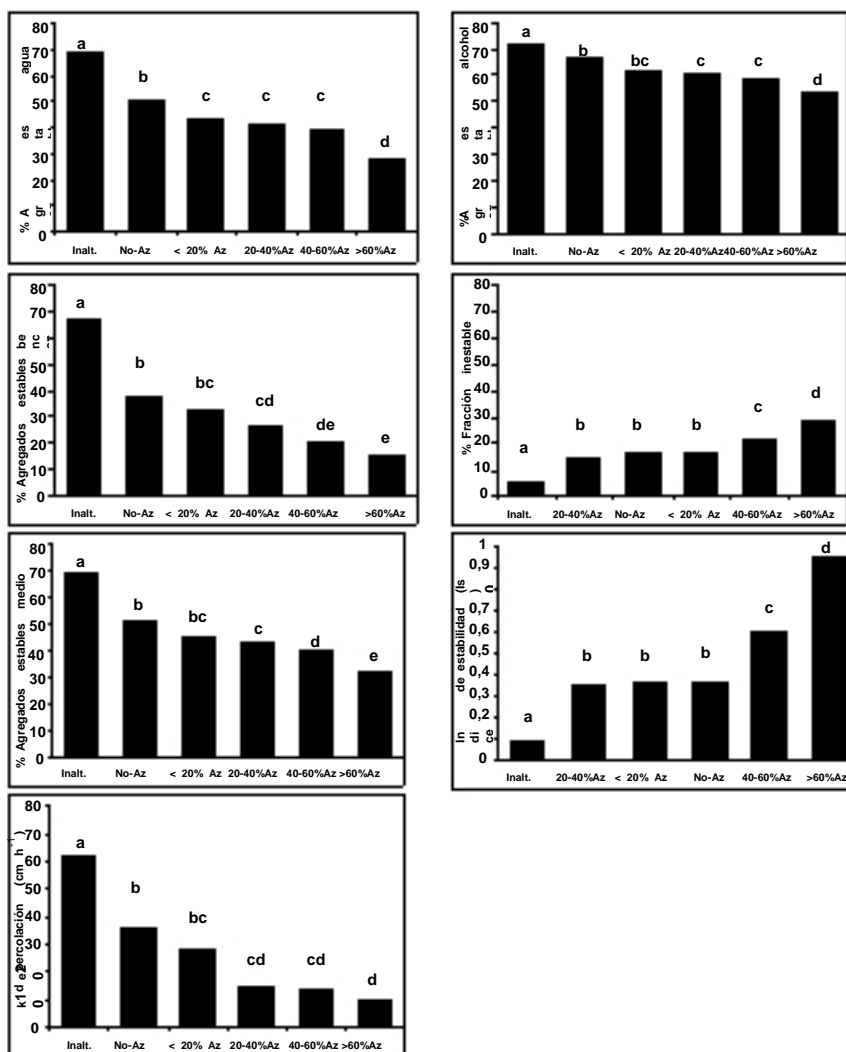


Figura 4. Estabilidad estructural de Vertisoles determinado a través de las variables de Hénin, en diferentes condiciones de manejo arrocero.

Tabla 5. Comparación de las variables de estabilidad estructural analizadas.

Variable	R ²	Pendiente	Significancia	Categorías
Agregados estables al Agua	0,31	-0,41x	0,0001	4
Agregados estables al Alcohol	0,29	-0,27x	0,0001	4
Agregados estables al Benceno	0,40	-0,31x	0,0001	5
Fracción inestable (Fi)	0,31	-0,19x	0,0001	4
Agregados estables al Promedio	0,40	-0,31x	0,0001	5
Is (índice de inestabilidad)	0,40	-0,01x	0,0001	4
K de Percolación	0,40	-0,72x	0,0001	4

table forman una masa compacta, siendo poco permeables al agua. Este índice es influenciado fuertemente por la cantidad de limo y el efecto desagregante del sodio de intercambio (Hénin *et al.*, 1958, 1972), se bloquean los poros impidiendo de esta manera el pasaje de aire y agua, produciendo una importante caída de los valores de dicha variable.

En la Tabla 5 se puede observar que las variables obtenidas a partir del método de Hénin presentaron buena sensibilidad (significancia y categorías de división estadística), y una fuerte pendiente, tomada en todos los casos de la regresión lineal, indicando ésta la disminución de la variable indicadora de estabilidad estructural por cada incremento unitario en el porcentaje de arroz en la rotación.

Las variables que mejor indicaron el deterioro de la estructura, según el ajuste de los datos, la pendiente y las categorías diferenciadas fueron, el K de percolación ($R^2 = 0,40$, pendiente = $-0,72x$ y 4 categorías diferenciadas), los agregados estables al benceno ($R^2 = 0,40$, pendiente = $-0,31x$ y 5 categorías diferenciadas) y los agregados promedio ($R^2 = 0,40$, pendiente = $-0,31x$ y 5 categorías diferenciadas). Esto demuestra que los agregados promedios están explicados en su mayor parte por los agregados estables al benceno.

La degradación de la estructura del suelo durante el proceso de humedecimiento, es más notorio en suelos con bajos contenidos de materia orgánica, habiendo un mayor control de la conductividad hidráulica con mayores niveles salinos (Lado *et al.*, 2004). So y Aylmore (1993) plantearon un esquema donde se muestran los posibles mecanismos mediante los cuales el sodio afecta el comportamiento físico de los suelos. Cuando

un suelo seco se humedece rápidamente y si a ello le sigue la dispersión, se producirá la formación de un sello en la superficie. El corolario es una conductividad hidráulica reducida. Esto dará lugar a su vez a tasas reducidas de infiltración, problemas en la redistribución del agua en el perfil, con alta evaporación desde la superficie del suelo. Se trata de procesos fundamentales que determinan la proporción de recarga de agua en el subsuelo y, en síntesis, de los mayores determinantes del crecimiento y rendimiento de los cultivos.

La estabilidad estructural es un componente importante de la calidad del suelo que resume tanto los efectos negativos como los positivos de los sistemas agrícolas. El suelo debe presentar una estructura física que permita la circulación, retención y transferencia de fluidos (aire y agua), nutrientes y otras sustancias, para que la exploración y la actividad de las raíces de los cultivos sean óptimas (Orellana *et al.*, 1997). Amézketa (1999), cita a Arshad y Coen (1992), quienes proponen a la estabilidad estructural como una de las propiedades físicas que puede ser utilizada como indicador de la calidad, mientras que Bezdicsek *et al.*, (1996), la toman como uno de los potenciales indicadores para evaluar la resiliencia de los suelos.

Los indicadores seleccionados mostraron que la condición de menos de 20% de arroz en la rotación no produjo efectos significativos en la estabilidad estructural, respecto a la condición No-Az. Es decir que, al poner en producción agrícola los Vertisoles de Entre Ríos (condición inalterada), se produce una caída importante de los valores de estabilidad estructural. Asimismo, se alcanza un nuevo estado de equilibrio dado por la agricultura sin arroz y que podría contemplar a su vez la participación del arroz, aunque en baja proporción.

El manejo de los Vertisoles, para lograr que el sistema de producción de arroz sea sustentable, debería perseguir como premisas el incremento de los niveles de materia orgánica y la eliminación de los excedentes de sodio de intercambio. En el primer caso, la inclusión de pasturas en las rotaciones ha permitido mantener los valores de los indicadores de calidad de suelo cercanos a los iniciales (Morón, 2003; De Battista, 2004). La utilización de agua para riego de buena calidad, como así la utilización de enmiendas químicas (como el caso del yeso), pueden ser efectivos para reestablecer la estructura y la conductividad hidráulica del suelo (Summer, 1992; Wallace, 1994; Sasal *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

La intensificación del uso arrocero regado con agua bicarbonatada sódica, afectó negativamente la condición física de los Vertisoles de Entre Ríos. La pérdida de materia orgánica y el aumento del sodio de intercambio en el suelo, provocaron la caída de la estabilidad estructural, problema que se acentuó cuando la participación del arroz fue mayor en la rotación.

Una rotación que incluya 50 a 60% de pasturas y 40 a 50% de agricultura, con una participación del arroz inferior al 20%, sería aconsejable para el mantenimiento de las buenas condiciones estructurales de estos suelos.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de la Nación que mediante un subsidio permitió la ejecución del presente trabajo y a la Fundación Pro Arroz que financió la última etapa del estudio. Al Dr. René A. Benavidez y a los Sres. evaluadores por los aportes y sugerencias brindados, y por último a la Prof. Adriana Gigena por la traducción del *abstract*.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCONADA, M.; LAVADO, R. 1992/93. Comparación de distintas técnicas analíticas de evaluación de la estabilidad estructural en un Natracualf típico. *Ciencia del Suelo* 10-11: 1-6.
- AMÉZKETA, E. 1999. Soil aggregate Stability: areview. *Jour. of Soustainable Agriculture* 14: 83-150.
- ARIAS, N.; DE BATTISTA, J.J. 1984. Evaluación de métodos para la determinación de estabilidad estructural en Vertisoles de Entre Ríos. *Ciencia del Suelo* 2: 87-92.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. 1976. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO: Riego y drenaje. Paper N° 29. FAO. Roma. 85 p.
- BEECHER, H.G. 1991. Effect of saline water on rice yields and soil properties in the Murrumbidgee Valley. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 31(6) 819 - 823.
- BEZDICEK, D. ; PAPENDICK, R. ; LAL, R. 1996. Introduction: Importance of soil quality, to health and sustainable land management. In: *Methods for assessing soil*

- quality. J.W. Doran and A.J. Jones Ed. 1-8.
- BLOKHUIS, W.A. 1982. Morphology and genesis of Vertisols. In *Vertisols and Rice Soils of Tropics*. 12th International Congress of Soil Science New Delhi India 23-47.
- CARLEVARO, L.; SENSEVER, M.; BENAVIDEZ, R.; MELÉNDEZ, J. 1991. La estabilidad estructural del suelo como parámetro de los efectos de su laboreo y cultivo. *Gaceta Agronómica XI* 64:395-405.
- COOK, G.D.; SO, H.B.; DALAL, R.C. 1992. Structural degradation of two Vertisols under continuous cultivation. *Soil and Tillage Res.* 24: 47-64.
- CURTIN, D.; STEPPUHN, H.; SELLES, F. 1994. Structural stability of Chernozemic soils as affected by exchangeable sodium and electrolyte concentration. *Can. J. Soil Sci.* 74:157-164.
- DE BATTISTA, J.J. 2004. Manejo de Vertisoles de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8 (1): 37-43.
- DE DATTA, S.; HUNDAL, S. 1984. Effects of organic matter management on land preparation and structural regeneration in rice based cropping systems. In *Organic Matter and Rice*. IRRI, Filipinas. 399-416.
- DE LEENHER, L.; DE BOODT, M. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Inter. Symp. On Soil Structure*. Medeligen. Rykslandbouwhogeschool, Gent. Belgie, 24: 290-300.
- DORAN, J.; PARKIN, T. 1994. Defining and assessing soil quality. *Soil Sci Soc* 677: 3-21.
- FIELD, D.J.; MC KENZIE, D.C.; KOPPI, A.J. 1997. Development of an improved Vertisol stability test for Soilpak. *Aust. J. Soil Res.* 35: 843-52.
- GUTIÉRREZ BOEM, F.H.; LAVADO, R.S. 1996. The effects of soil sodicity on emergence, growth, development and yield of oilseed rape (*Brassica napus*). *J. Agricultural Sci., Cambridge*. 126: 169-173.
- HENIN, S.; MONNIER, G.; COMBEAU, A. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 9: 73-92.
- HÉNIN, S.; GRAS, R.; MONNIER, G. 1972. El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España. 340 pp.
- INFOSTAT. 2002. InfoStat, versión 1.1. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina. 266 p.
- JACKSON, M.L. 1976. Análisis químico de suelos. Tercera Edición. Ed. Omega S.A. Barcelona, España. 662 pp.
- JEHANGIR, W.A.; QURESHI, A.S.; ALI, N. 2002. Conjunctive Water Management in the Rechna Doab: An Overview of Resources and Issues. IWMI Working paper No. 48.
- JAYAWARDANE, N.S.; CHAN, K.Y. 1994. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils - A review. *Aust. J. Soil Res.*

- 32: 13-44.
- LADO, M.; PAZ, A.; BEN-HUR, M. 2004. Organic matter and aggregate - size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 234-242.
- LEVY, G.J.; TORRENTO, J.R. 1995. Clay dispersion and macroaggregate stability is affected by exchangeable potassium and sodium. *Soil Sci.* 160: 352-358.
- MARASSI, J.; BENAVIDEZ, R.A. 1988. Influencia da cultura da arroz (Oriza sativa, L.) irrigado sobre a estabilidade structural dos solos. *Anales 17.º Reunión de Cultivo de arroz irrigado. Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.* 6p.
- MATHIEU, C. ; PIELTAIN, F. 1998. *Analyse physique des sols: Méthodes choisies.* Lavoisier Tec. Doc. París, London, New York. 275p.
- MORÓN, A. 2003. Principales contribuciones del experimento de rotaciones cultivos - pasturas de INIA La Estanzuela, en el área de fertilidad de suelos (1963-2003). *Simposio 40.º años de rotaciones agrícola-ganaderas.* Uruguay, INIA Serie Técnica 134: 1-7.
- ORELLANA DE, J. ; PILATTI, M.A. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- ORELLANA DE, J.; PILATTI, M.A.; GRENÓN, D. 1997. Soil quality: An approach to physical state assessment. *Journal of sustainable agriculture.* The Haworth Press, Inc. 9: 91-108.
- PECORARI, C. 1988. Inestabilidad estructural de los suelos de la Pampa Ondulada. *Informe Técnico EEA INTA N.º 216.*
- PLAN MAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS. Convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos (1984). «Suelos y erosión de la provincia de Entre Ríos». Segunda Ed. Tomo I. Serie Relevamiento de Recursos Naturales (1) INTA-EEA Paraná. Entre Ríos. 112 pp.
- PLAN MAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS. Convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos (1999). Carta de Suelos de la República Argentina. San Salvador, Entre Ríos. Relevamiento de Recursos Naturales (18) INTA EEA Paraná. 74 pp.
- POZZOLO, O.; WILSON, M.; DE BATTISTA, J.J.; CERANA, J. 2001. El tránsito de maquinaria en suelos inundados. Efectos sobre la impedancia en el perfil edáfico. *IV Congreso internacional de Ingeniería Agrícola.* Chillán, Chile. 5 p.
- PLAN MAPA DE SUELOS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS. CONVENIO INTA-GOBIERNO DE ENTRE RÍOS. 1984. Suelos y erosión de la provincia de Entre Ríos. Segunda Ed. Tomo I. Serie Relevamiento de Recursos Naturales (1) INTA-EEA Paraná. Entre Ríos. 112 p.
- RICHARDS, L. 1970. Suelos salinos y sódicos. Diagnóstico y rehabilitación. *Manual de Agricultura N.º 60.* 172 p.
- SASAL, C.; ANDRIULO, A.; GALETTO, M.; FERREYRA, C.; ABREGO, F.; BUENO, M.; Rimatori, F.; DE LA CRUZ, M.A. 2000. Efecto de la cobertura y de dos niveles de

- yeso sobre un suelo sodificado por riego complementario. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 8 p. Trabajo en CD.
- SO, H.B.; AYLMOORE, L.A.G. 1993. How do sodic Soils Behave? The effects of sodicity on soil physical behaviour. *Aust. J. Soil Res.* 31:761-778.
- SO HB, COOK GD. 1993. The effect of slaking and dispersion on the hydraulic conductivity of clay soils. In *Soil Surface sealing and crusting* (J.W.A. Poesen and M.A. Nearing, Eds.). Cremlingen, Germany. *Catena Supplement* 24: 55-64.
- SUMMER, M.E. 1992. The electrical double layer and clay dispersion. In: M.E. Summer, B.A. Stewart (Eds.). *Advances in Soil Science*. Lewis Publishers. Boca Ratón. MI. USA. 372 p.
- URRICARRIET, S.; LAVADO, R. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la pampa ondulada. *Ciencia del suelo* 17: 37-44.
- USSL STAFF. 1954. US Salinity Lab. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook N.º 60.
- TUJCHNEIDER, O. 1987. Hidroquímica. Capítulo VI. En *Geohidrología de la Hoja* 3160-30 San Salvador, Provincia de Entre Ríos. Ed. Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Entre Ríos. Serie Técnica N.º 2. 25-56.
- VÁZQUEZ, M.; BERASATEGUI, L.; CHAMORRO, E.; TAQUINI, L.; BARBERIS, L. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencia del Suelo* 8: 203-210.
- WALLACE, A. 1994. Use of gypsum on soil where needed can make agriculture more sustainable. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25 (1 and 2). 109-116.
- WARDA. 1993. West Africa Rice Development Association. Annual Report. 01 Bouaké, B.P. 2551, Ivory Coast.
- WILSON, M.; QUINTERO, C.; BOSCHETTI, N.; BENAVIDEZ, R.; MANCUSO, W. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Revista Facultad de Agronomía UBA.* 20 (1): 23-30.
- WILSON, M.; CERANA, J.; VALENTI, R.; DÍAZ, E.; DUARTE, O.; DE BATISTA, J.J.; RIVAROLA, S.; BENAVIDEZ, R. 2002. Evaluación de la calidad del agua para riego en el área arrocería de Entre Ríos. *Cuadernos del CURIHAM* 8: 31-39.

Original recibido en octubre de 2004 y aprobado en abril de 2006.