

# Alteración de las propiedades mecánicas de un Ustochrept Udértico tratado con agua enriquecida en sodio

MELANI, E.<sup>1</sup>; DRAGHI, L.<sup>2</sup>; JORAJURIA COLLAZO, D.<sup>2</sup>; PALANCAR, T.<sup>2</sup>

## RESUMEN

El riego con aguas con alto contenido de sodio puede provocar el deterioro de las propiedades físico-mecánicas de los suelos. En el presente trabajo se trató de evidenciar el efecto del tratamiento con agua rica en sodio sobre esas propiedades en un Ustochrept Udértico en dos tratamientos con distinta relación de adsorción de sodio (valor RAS) de 5 y 45. Se evaluó el comportamiento a la compresión y al corte obteniéndose los parámetros cohesión y coeficiente de fricción interna. En el ámbito de la Teoría de Estado Crítico (EC) se analizaron las líneas vírgenes de ambos tratamientos y el comportamiento expansivo/compresivo al corte mediante la ubicación de la línea de EC. El aumento de la concentración de sodio provocó la densificación del suelo, mayor resistencia a la compresión (-0,023  $\lambda$  sódico vs. -0,094  $\lambda$  no sódico), aumento de la cohesión (263 kPa sódico vs. 114,5 kPa no sódico) y esfuerzo cortante (363 kPa sódico vs. 250 kPa no sódico). Dentro de la Teoría de EC se evidenció una mayor capacidad expansiva del tratamiento más sódico durante el corte en términos relativos. Los cambios hallados repercuten sobre el potencial productivo y la energía necesaria para las labranzas en el suelo estudiado.

**Palabras clave:** teoría del estado crítico, cohesión, compresión uniaxial, tensión de preconsolidación, riego con aguas sódicas.

## ABSTRACT

*Irrigation waters high in sodium can cause deterioration of the physical-mechanical properties of soils. In this paper we tried to demonstrate the effect of treatment with water rich in sodium on these properties in a Ustochrept Udértico two treatments with different sodium adsorption ratio (SAR value) of 5 and 45. Behavior was assessed to compression and shear strength and obtaining the coefficient of cohesion and internal friction parameters. In the frame of Critical State Theory (EC) the virgin lines of both treatments and expansive / compressive shear behavior by placing Line EC were analyzed. Increasing the sodium concentration caused soil densification, compressive strength greater (-0.023 sodium  $\lambda$  -0.094 vs. no sodium  $\lambda$ ), increasing the cohesion (263 kPa sodium vs. 114.5 kPa no sodium) and shear strength (363 kPa sodium vs. 250 kPa no sodium). Within the EC theory more expansive capacity of more sodium treatment was evident during the shear in relative terms. The changes found impact on the productive potential and the energy needed for crops in the soil studied.*

**Keywords:** Critical State Theory, cohesion, uniaxial compression, preconsolidation pressure, irrigation with sodic waters.

<sup>1</sup>INTA EEA Cuenca del Salado, CT Cuenca Norte. Mitre N.º 202, Chascomús, Buenos Aires. melani.esteban@inta.gob.ar

<sup>2</sup>Mecánica Aplicada. Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal. Universidad Nacional de La Plata. Avenida 60 y 119.

## INTRODUCCIÓN

La población mundial estimada en 9400 millones de personas para 2050 requerirá un aumento del 40 al 50% de la producción de alimentos (Lal, 2000). Se prevé el incremento de las dos terceras partes de la superficie arable incorporándose áreas desérticas mediante el riego.

Un manejo inadecuado del riego puede causar deterioros de la fertilidad física de los suelos con efectos muy difíciles de revertir (Vázquez *et al.*, 2008). Todas las aguas de riego, superficiales o subterráneas, contienen en mayor o menor medida sales solubles (Rhoades, 1997). La existencia de altas concentraciones de Na<sup>+</sup> en la solución del suelo favorece la dispersión de las arcillas (Bronick y Lal, 2005).

La presencia de arcillas dispersas produce diversos efectos verificados sobre la mecánica de los suelos agrícolas. Dichos efectos son asociados a incrementos de la fuerza de tracción necesaria para la labranza, a la formación de costras que impiden la emergencia de las plantas y a una menor porosidad (Mzezega *et al.*, 2003), acompañada de un incremento en la cantidad de microporos (Ruiz Vera y Wu, 2006).

Además, los ciclos de humidificación–deseccación, a los que son sometidos los suelos en los procesos productivos, producen cambios en las propiedades mecánicas como la resistencia a la penetración, adhesión, coeficiente de fricción interna y estabilidad de los agregados (Utomo y Dexter, 1981; Rajaram y Erbach, 1999).

La teoría del estado crítico (modificada por Hettiaratchi y O'Callaghan, 1980) brinda la posibilidad de estudiar los suelos dentro del espacio p-q-v, siendo p la tensión normal, q la tensión de corte y v el volumen específico (1/densidad). Esa teoría establece que los suelos bajo deformación de corte, finalmente alcanzan un estado crítico en el que fluyen sin nuevos cambios en p–q-v.

En un gráfico v–ln(p) la línea de estado crítico (EC) y la línea virgen (LV) son representadas como dos líneas rectas paralelas (Hettiaratchi, 1987) definidas por las ecuaciones:

$$EC: v = \Gamma - \lambda \cdot \ln(p) \quad [1]$$

$$LV: v = N - \lambda \cdot \ln(p) \quad [2]$$

Siendo  $\Gamma$  y  $N$  los términos independientes de ambas rectas y  $\lambda$  la pendiente.

Para un suelo a una humedad determinada, el muro vertical imaginario que se obtiene proyectando EC sobre el plano q=0 divide el espacio en dos secciones llamadas supercrítica y subcrítica. Por una parte, partiendo de un punto ubicado en el dominio supercrítico, cualquier tensión de corte aplicada (q) dará lugar a un aumento de volumen hasta alcanzar EC donde la acción de rotura continuará a volumen constante. Al contrario, partiendo de una condición subcrítica, la deformación redundará en una disminución de volumen. Por otra parte, la ley de Coulomb permite conocer otros parámetros importantes para la caracterización del suelo como son la cohesión (c) y el coeficiente de

fricción interna (tgφ). El objetivo del presente trabajo fue caracterizar el suelo a través de sus propiedades mecánicas evidenciando la acción negativa del sodio presente en la solución. Las hipótesis a contrastar fueron: a) El sodio incrementa la resistencia del suelo al corte y reduce la susceptibilidad a la compresión; b) El sodio modifica los parámetros de la teoría de estado crítico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la teoría del estado crítico para relacionar el cambio volumétrico del suelo en respuesta a fuerzas externas. Con este propósito se realizaron las pruebas de compresión y de corte directo que, junto con el cálculo de la variación de la altura durante el corte, permitieron la determinación de los parámetros principales de esta teoría, como también los de Coulomb.

### Suelo

Se utilizó material reconstituido en laboratorio de un Ustochrept Udértico correspondiente a la serie Ozzano (Italia). Las muestras fueron extraídas del horizonte Ap. Este suelo se caracteriza por poseer materiales no salinos, ricos en arcilla, pobres en sesquióxidos de hierro y aluminio, no calcáreo, con presencia de arcillas gris–amarillentas, próximas a la clase de colores 2,5Y. Los tipos de minerales de arcillas presentes son vermiculita, illita, esmectita y caolinita. (Patruno *et al.*, 2002). La composición química se presenta en la tabla 1. La clase textural es franco-arcillo-limosa, presentando un 13,7% de arena, 47,7% de limo y 36,6% de arcilla.

El suelo fue tratado con soluciones conteniendo NaCl y Cl<sub>2</sub>Ca, utilizando dos RAS (Relación de Adsorción de Sodio) de 5 y 45, y un nivel de salinidad único de 0,1 moles/l. Los análisis químicos y los tratamientos fueron efectuados en el Dipartimento di Scienze e Technologie Agroforestali de la Università di Bologna, Italia.

El material original fue dividido en partes iguales y sumergido en dos soluciones sodificantes durante 24 horas hasta su aparente saturación. A continuación se retiró del baño y se dejó drenar durante una hora para ser luego secado en estufa a 45 °C durante 72 horas. Transcurrido ese tiempo se repitió el proceso de inmersión en una nueva solución sodificante. Este ciclo se repitió 5 veces. Esta metodología se encuentra ampliamente detallada en Patruno *et al.* (2002). Como resultado se obtuvieron dos tratamientos: Ozzano A (OZA) y Ozzano B (OZB), presentando OZA un

Tratamiento	Ordenada al origen	Pendiente	Tensión Normal a EC (kPa)
OZA	0,145 b	-0,0242 a	401,8
OZB	-0,441 b	-0,0441 b	205,3

**Tabla 1.** Principales parámetros químicos del suelo original (OZO) y de ambos tratamientos (OZA y OZB).

mayor contenido de  $\text{Na}^+$  en solución que OZB. Los resultados de los análisis químicos de ambos tratamientos se muestran en la tabla 1.

Finalizados los procedimientos de sodificación, ambos tratamientos fueron tamizados con tamices de 3,36 mm y 2 mm de diámetro utilizándose la fracción comprendida en ese rango. Los agregados de un tamaño superior a 3,36 mm fueron pasados por un molino para su trituración y vueltos a tamizar.

### Procedimiento experimental

Los parámetros evaluados en el presente trabajo fueron: volumen específico final e inicial respecto a la compresión, tensión de preconsolidación ( $P_c$ ), líneas vírgenes (LV), tensión de corte, cohesión ( $c$ ), coeficiente de rozamiento Interno ( $\text{tg}\phi$ ) y líneas de estado crítico (EC). Las pruebas, a las que fueron sometidos ambos tratamientos, fueron realizadas mediante la utilización de una caja de corte directo. Las muestras que fueron sometidas a compresión y corte se extrajeron de contenedores (tortas) de 190 mm de diámetro donde previamente fue introducida una masa de 800 g de material.

Dentro de los contenedores de fondo perforado se colocaron papeles de filtro que permitieron el libre movimiento del agua, pero no la lixiviación de arcillas dispersas. Las tortas fueron llevadas a humedad de saturación por un lapso de 30 min. Este proceso se realizó por inmersión de estas en agua destilada. Luego, el material fue retirado y se lo dejó percolar durante 24 h y posteriormente se procedió a introducirlo en estufa a 45 °C hasta llegar a la humedad de 15% (p/p). Alcanzada la humedad objetivo, las tortas fueron extraídas de la estufa y selladas con película de nylon por 24 h. Se realizó una torta por cada uno de los tratamientos, extrayéndose cuatro muestras de cada una. Dichas muestras se extrajeron por medio de un cilindro a modo de saca bocados. Dicho cilindro poseía el mismo diámetro interno que la caja de corte directo, lo cual facilitó su inserción. Sobre la muestra se colocó una tapa vinculada a un brazo de palanca que permitió realizar la compresión a través de masas discretas conocidas. La compresión se realizó a tensiones normales progresivas hasta llegar a una presión de 605 kPa en un tiempo de 195 s.

El cálculo de la tensión de preconsolidación ( $P_c$ ) se realizó mediante el método de Casagrande (Rucknagel *et al.*, 2010).

Luego de la compresión se procedió al corte de las probetas. Los cortes se realizaron al 60% y 20% de relación de tensión (tensión normal al corte, expresada como porcentaje de la tensión normal máxima alcanzada en la compresión, 605 kPa). Fueron utilizadas dos probetas por cada una de las dos relaciones de tensión ensayadas. La humedad de las muestras fue determinada en forma gravimétrica luego del corte, introduciendo las mismas en estufa a 105 °C durante 48 h hasta peso constante.

La fuerza de corte, a partir de la cual se calculó luego la tensión de corte fue medida mediante una celda de

carga. Los cambios de altura de las probetas fueron medidos a través de transductores LVDT. El volumen específico seco ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ), fue analizado pre y pos compresión para ambos tratamientos (A y B) mediante análisis de la varianza utilizando el test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) al 5%. Este método estadístico fue utilizado también para analizar los parámetros  $P_c$  (tensión de preconsolidación),  $N$  y  $\lambda$  (término independiente y pendiente de la línea virgen) y tensión de corte. Las líneas vírgenes fueron, a su vez, evaluadas mediante regresión simple. Los parámetros de Coulomb ( $c$  y  $\text{tg}\phi$ ) y las rectas de comportamiento volumétrico durante el corte fueron evaluados a través de una regresión simple lineal. Se realizó una comparación estadística a través de la comparación de regresiones al 10%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Líneas de compresión

El tratamiento OZA presentó un valor significativamente menor de volumen específico inicial, no hallándose diferencias en los valores de volumen específico final respecto a OZB (tabla 2). Amioti y Bravo (2006) han encontrado que los suelos afectados por sodio se caracterizan por un aumento de su densidad. La reducción de volumen específico ante la aplicación de tensiones normales fue, entonces, menos pronunciada en el tratamiento OZA.

Posiblemente OZA presentó mayor cantidad de arcillas dispersas debido a la acción del  $\text{Na}^+$  y los ciclos humectación-deseccación. Dichas arcillas dispersas ubicadas en los espacios inter e intra-agregados habrían incrementado la tenacidad de las uniones favoreciendo así el aumento de la resistencia a la compresión además de provocar una densificación del material (Hettiaratchi, 1987). Es posible que la mayor porosidad inter e intra-agregados del tratamiento OZB le haya conferido mayor friabilidad y, por lo tanto, menor resistencia a la compresión uniaxial respecto a OZA.

### Tensión de preconsolidación

Los valores de  $P_c$  fueron superiores en el tratamiento OZA respecto a OZB siendo esta diferencia significativa ( $p < 0,005$ ) (tabla 2). La disminución del volumen específico inicial de OZA, debido a la pérdida de porosidad por efecto del sodio, pudo haber influido en el aumento de  $P_c$  de este tratamiento respecto a OZB.

### Líneas vírgenes

En concordancia con el análisis de volumen específico inicial, se observa claramente que el parámetro  $N$  fue mayor en el tratamiento OZB, lo que denota la mayor porosidad inicial respecto al tratamiento OZA (tabla 2). La mayor densidad inicial del tratamiento OZA estaría de acuerdo con lo descrito por Hutson (1971) quien demostró que utilizando aguas con valores altos de sodicidad se incrementó la densidad superficial del suelo.

Del análisis de la tabla 2 se desprende que el tratamiento OZA (con mayor contenido de sodio) presentó una pendiente ( $\lambda$ ) menos pronunciada que el tratamiento OZB.

Tratamiento	Tensión Normal (kPa)		c (kPa)	tg $\phi$
	372	124		
OZA	363,3 a	296,7 a	263,4 a	0,268 a
OZB	249,9 a	159,7 a	114,5 b	0,363 a

**Tabla 2.** Comparación entre los valores de volumen específico inicial (VEI) y final (VEF), Pc,  $\lambda$  y N entre OZA y OZB.

Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD  $p < 0,05$ )

Si bien en el material utilizado no puede hablarse de estructura como tal, debido a que se parte de suelo molido y tamizado, se puede hipotetizar que la acción del sodio en el tratamiento OZA ha conducido a un reordenamiento poroso en el material remanente disminuyendo el número de poros mayores más compresibles. Varallyay (2002) afirma que un alto porcentaje de sodio de intercambio ocasiona una significativa modificación de la estructura y, más concretamente, de la conformación del espacio poroso, modificando la compactibilidad de los suelos. Ante un incremento dado de tensión, los poros de mayor tamaño son comprimidos primero (Griffiths y Joshi, 1989).

Mitchell y Soga (2005) encontraron que una estructura de partículas floculadas presenta grandes poros, mientras que una estructura dispersa tiene numerosos microporos y a tensiones mayores que Pc el efecto de incrementos de tensiones es mayor sobre las estructuras floculadas que sobre las dispersas.

### Tensión de corte y parámetros de Coulomb

Se realizaron las regresiones lineales entre la tensión cortante y la tensión normal de ambos tratamientos obteniendo las rectas de Coulomb. Los términos independientes de las ecuaciones de las rectas de regresión entre los puntos indican los valores de cohesión (c), mientras que las pendientes representan las tangentes de los ángulos de rozamiento interno (tg $\phi$ ). De aquí se deducen, entonces, ambos valores que son volcados y comparados en la tabla 3 junto con los valores de tensión de corte a dos diferentes tensiones normales.

Los valores medios de humedad al corte fueron de 15,2% para OZB y 15,9% para OZA no habiéndose encontrado diferencias significativas.

La tabla 3 muestra que el tratamiento OZA presentó valores de tensión de corte más altos cuando se aplicaron las mayores tensiones normales, en concordancia con Spugnoli *et al.* (2002), mientras que no hubo diferencias a tensiones normales bajas. Asimismo, el tratamiento OZA presentó una cohesión superior a OZB, pero no existieron diferencias entre los valores de ángulo de rozamiento interno.

Por un lado, el aumento de la tensión cortante verificado en OZA, podría adjudicarse a un aumento de la cohesión superficial. La presencia del Na<sup>+</sup> habría favorecido el predominio de las fuerzas de repulsión durante la humectación a saturación, determinando un incremento de los coloides dispersos, con generación de poros pequeños, que derivaría en una mayor cohesión superficial a la humedad de corte (15%) y en una mayor tensión cortante. Rahimi *et al.* (2000) valoraron el efecto de la conductividad eléctrica y la RAS sobre suelos sometidos a ciclos humectación-desección. Estos autores encontraron que con el incremento de la RAS disminuyó la resistencia, explicando que estas diferencias de comportamiento son debidas a los ciclos de humectación-desección que redujeron la estabilidad de los agregados. Al igual que Kay y Dexter (1992), Utomo y Dexter (1981) coinciden en que los eventos de humectación y secado, pueden causar una disminución en la resistencia de los agregados. En efecto, en suelos sódicos Taboada y Lavado (1996) hallaron interacción entre los efectos del valor RAS y de la humedad en que el suelo es impactado por una fuerza, con disminuciones de módulo de ruptura cuando el impacto se produce en capacidad de campo.

Por otro lado, Rajaram y Erbach (1999) concluyen que un suelo arcilloso sometido a ciclos de humectación-desección sufrió un cambio en sus propiedades físicas incrementando la resistencia a la penetración, la cohesión, la adhesión, la fricción interna y el tamaño de sus agregados. Barzegar *et al.* (1994) explicaron que cuando los suelos son removidos en húmedo cierto contenido de arcillas es liberado de los agregados; luego, al secarse, se produce una reorganización en nuevos agregados donde los puntos de contacto entre partículas determinan el vínculo entre estas y, por lo tanto, la dureza del suelo. Altos contenidos de arcilla dispersa proveen mayor número de puntos de contacto entre partículas. En este sentido, los autores subrayaron que altos porcentajes de sodio de intercambio incrementan el contenido de arcillas dispersas y, por lo tanto, aumenta la dureza de los suelos.

Tratamiento	Compresión		Pc (kPa)	LV	
	VEI (cm <sup>3</sup> /g)	VEF (cm <sup>3</sup> /g)		$\lambda$	N
OZA	0,65 b	0,60 a	94,5 a	-0,023 a	0,75 b
OZB	0,88 a	0,61 a	55,4 b	-0,094 b	1,23 a

**Tabla 3.** Comparación entre OZA y OZB de las tensiones de corte (kPa), cohesión (kPa) y ángulo de rozamiento interno. Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD  $p < 0,05$ )

En el presente trabajo habría prevalecido el efecto cementante de la arcilla por sobre el efecto debilitante del proceso humectación-secado encontrado por Rahimi *et al.* (2000). El ciclo habría derivado en una mayor dispersión de las arcillas del tratamiento OZA. Durante la desecación, las arcillas ubicadas en los espacios interagregados provocaron la cementación del material generando mayor resistencia al corte.

### Líneas de estado crítico

#### a) Comportamiento volumétrico ante el corte

Con los datos de relación de tensión y relación de volumen (relación entre la diferencia de volumen posterior y previo al corte con el volumen previo al corte) se realizaron las regresiones para ambos tratamientos.

Las muestras de suelo, que experimentaron un desplazamiento positivo durante el corte, sufrieron una expansión con aumento de su volumen específico, mientras que aquellas que experimentaron un desplazamiento negativo se comprimieron.

Se hallaron diferencias entre ambos tratamientos (OZA y OZB) en las regresiones de las rectas de expansión-contracción al corte, existiendo una mayor tendencia a la expansión del tratamiento OZA. Esto se evidencia por la mayor tensión normal a la que se alcanza el estado crítico (tabla 4). Esto implica que en OZA la probabilidad de recibir compresiones adicionales al ser cortado disminuiría con respecto a OZB aumentando la posibilidad de expandirse con el corte (aumentaría el dominio supercrítico). Esta tendencia puede explicarse apelando al probable sistema poroso existente en este tratamiento, donde predominarían poros de menor diámetro de acuerdo con lo expuesto por Varallyay (2002). Los poros de menor diámetro de OZA no habrían tenido la capacidad de alojar pequeñas partículas minerales durante el corte, resultando en una tendencia mayor a la expansión respecto a OZB. El tratamiento OZB en cambio, con poros de dimensiones mayores, habría tenido más capacidad de alojar dichas partículas y consecuentemente mayor tendencia a comprimirse ante el esfuerzo cortante. Habría resul-

tado más sencillo, comprimir durante el corte un material donde predominan poros de mayor tamaño (OZB) que uno donde prevalecen los de menor tamaño (OZA).

#### b) Obtención de la línea de estado crítico

Con las ecuaciones de regresión de comportamiento volumétrico durante el corte se determinó la tensión normal máxima a la que se debería someter a la muestra durante el corte para que no existiese compresión o expansión durante la falla (Estado Crítico). La figura 1 muestra la posición de la línea de estado crítico respecto a la línea virgen para ambos tratamientos.

Las ecuaciones de las rectas de estado crítico para ambos tratamientos son:

$$\text{OZA: } v = 0,735 - 0,023\ln(p) \quad [3]$$

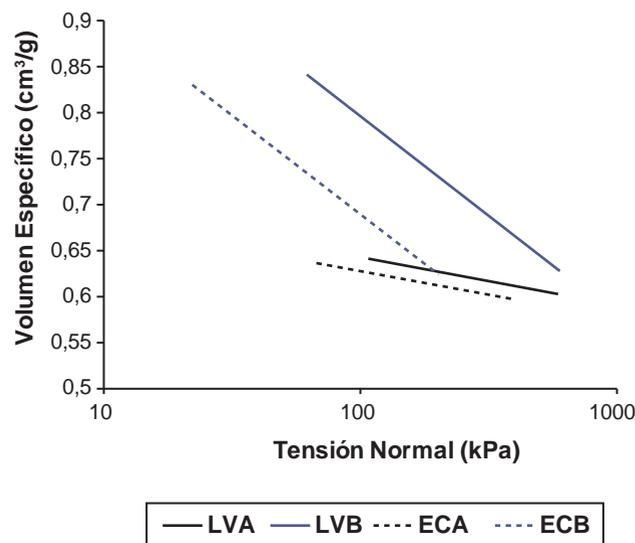
$$\text{OZB: } v = 1,123 - 0,094\ln(p) \quad [4]$$

A partir de los parámetros obtenidos a través de la teoría del estado crítico puede verse que OZA tendría una menor distancia entre la línea virgen y la línea de estado crítico y por lo tanto la región subcrítica sería reducida, característica que le conferiría una mayor capacidad de expansión durante el corte con respecto a OZB. Esto significaría también que OZA toleraría tensiones normales superiores y aún podría presentar expansión durante el corte. Este hecho coincide con lo expresado por Hettiaratchi (1987), quien explica como con el aumento del parámetro  $\lambda$ , la línea de estado crítico se aproxima a la línea virgen produciendo una expansión de la región supercrítica.

De acuerdo con Spagnoli *et al.* (2002), el mayor comportamiento expansivo registrado por los suelos altamente saturados con  $\text{Na}^+$  muestra, aparentemente, un mejoramiento en la respuesta del suelo a las tensiones externas aplicadas. Indirectamente, esto podría sugerir una situación positiva ante las operaciones de labranza, que podría balancear la alta energía requerida para roturar el suelo (alta resistencia al corte). Sin embargo, desde un punto de

Análisis	Pre-tratamiento		Postratamiento		
	Unidad	OZO	OZA	OZB	
C.I.C	meq/100g secos	29,54	-	-	
Materia Orgánica	g/kg	15,93	-	-	
Carbonatos	g/100g secos	3,9	-	-	
CE25°C	mS/cm	0,03	0,982	1,37	
Na+	meq/100g secos	0,053	-	-	
Ca++	meq/100g secos	26,06	-	-	
Mg+++	meq/100g secos	2,94	-	-	
RAS	-	1,79	9,85	2,86	
pH en H2O	$-\log[\text{H}^+]$	7,3	8,09	7,3	

**Tabla 4.** Comparación de la ordenada al origen y pendientes de las rectas de relación volumétrica. Letras diferentes en la misma columna denotan diferencias estadísticas significativas (LSD  $p < 0,05$ )



**Figura 1.** Líneas vírgenes (LV) y de estado crítico (EC) para ambos tratamientos.

vista más cualitativo, se observa en la figura 1 que OZB puede arribar en el corte, con tensiones normales bajas, a valores más altos de volumen específico y por ende mayor porosidad que OZA.

## CONCLUSIONES

1. El incremento de la concentración de  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo provocó disminución del volumen específico acompañado con un aumento de la resistencia a la compresión.
2. El incremento de la RAS provocó aumento en la tensión de corte y de los valores de cohesión. En términos de operaciones de campo los resultados obtenidos pueden explicar el aumento del requerimiento energético en las operaciones de labranza sobre suelos con alta RAS.
3. El aumento de la concentración de  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo derivó en un acercamiento de EC respecto a LV. Este hecho se tradujo en el aumento de la región supercrítica otorgándole al suelo una mayor capacidad expansiva durante el corte en términos relativos.

## BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDROU, A.; EARL R. 1998. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80, 71-75.

AMIOTI, N.; BRAVO, O. 2006. Suelos de las terrazas del río Colorado: Características e impacto del riego por gravedad. xx Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19 al 22 de septiembre de 2006. Salta, Argentina.

BARZEGAR, A.R.; MURRAY, G.J.; CHURCHMAN, G.J.; REN-GASAMY, P. 1994. The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. *Australian Journal Soil Research*. 32, 185-199.

BRONICK, C.J.; LAL, R. 2005. Soil Structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3-22.

GRIFFITHS, F.J.; JOSHI, R.C. 1989. Change in pore size distribution due to consolidation of clays. *Geotechnique*. 39, 159-67.

HETTIARATCHI, D.P.R.; O'CALLAGHAN, J.R. 1980. Mechanical behaviour of agricultural soils. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 25, 891-904.

HETTIARATCHI, D.P.R. 1987. A critical state soil mechanics model for agricultural soil. *Soil use and management*. 3, 94-105.

HUTSON, J.L. 1971. Crust formation on some Natal soils. Master Science Agricultural Thesis. University of Natal, Pietermaritzburg, South Africa.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R. 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Australian Journal of Soil Research*. 30, 297-310.

LAI, R. 2000. Soil management in the developing countries. *Soil Science*. 165 (1) 57-72.

MITCHELL, J.K.; SOGA, K. 2005. Fundamentals of soil behaviour. John Wiley and Sons, Inc. Nueva Jersey. ISBN 13:978-0-471-46302-7.

RUKNAGEL, J.; BRANDHUBER, R.; HOFMANN, B.; LEBERT, M.; MARSCHALL, K.; PAUL, R.; STOCK, O.; CHRISTEN, O. 2010. Variance of mechanical precompression stress in graphic estimations using the Casagrande method and derived mathematical models. *Soil and Tillage Research*. 106, 165-170.

MZEZEKA, J.; GOTOSAB, J.; NYAMWANZAB, B. 2003. Characterisation of a sodic soil catena for reclamation and improvement strategies. *Geoderma* 113, 161-175.

PATRUNO, A.; CAVAZZA, L.; CIRILLO, E. 2002. Soil Traits and Structure Stability in Artificially Sodicated Soils. *Italian Journal of Agronomy*. 6 (1), 15-25.

RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJI, F. 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research*. 54, 145-133

RAJARAM, G.; ERBACH, D.C. 1999. Effect of wetting and drying on soil physical properties. *Journal of Terramechanics*. 36, 39-49.

RHOADES, J.D. 1997. Sustainability of irrigation: An overview of salinity problems and control strategies. Annual Conference: Footprints of Humanity. Reflection on fifty years of water resource developments. Lethbridge, Alberta, Canadá, pp.1-42.

RUIZ VERA, V. M.; WU, L. 2006. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability. *Soil Science Society of American Journal*. 70, 1825-1833.

SPUGNOLI, P.; SOVERINI, E.; PALANCAR, T. 2002. Effects of Irrigation with brackish water on soil trafficability and workability. In Pagliai M., Jones R. Sustainable Land Management-Environmental Protection A Soil Physical Approach. (35, 267-278). ISBN: 3-923381-48-4. Special issue of *Advances in GeoEcology*. Reiskirchen: Catena Verlag, Alemania.

TABOADA, M.A.; LAVADO, R.S. 1996. Interactive effect of exchangeable sodium and soil water content on soil modulus of rupture. *Soil Technology*, 8: 345-349.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. 1981. Soil friability. *European Journal of Soil Science* 32, 203-213.

VARALLYAY, G. 2002. Environmental stresses induced by salinity/alkalinity in the Carpathian Basin (Central Europe) Symposium N.º 33 Paper N.º 1570. 17<sup>th</sup> World Congress of Soil Sciences. Tailandia. 14-21.

VÁZQUEZ, M.; MILLÁN, G.; GELATI, P. 2008. Simulación del efecto del riego complementario en un suelo Udipsament típico. *Ciencia del Suelo*. 26 (2) 195-203.