

SALINIDAD POR APLICACIÓN DE VINAZAS DE UN SUELO SUBTROPICAL CULTIVADO CON CAÑA DE AZÚCAR

ROCIO PORTOCARRERO^{1*}, MARÍA ADELAIDA CORREA¹, JUAN INOSENCO VALLEJO¹,
ENRIQUE ULLIVARRI¹, ALEJANDRO HECTOR VALEIRO²

Recibido: 24/08/2017

Recibido con revisiones: 09/05/2018

Aceptado: 24/05/2018

RESUMEN

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar presenta un fuerte desafío de sustentabilidad dado que por la producción de 1 m³ de alcohol, se genera 10-13 m³ del efluente vinaza. Este es un líquido pardo oscuro, ácido, con alta carga orgánica y sales. La aplicación de vinazas en los campos productivos de caña de azúcar, es una práctica frecuente y recomendada. En este trabajo se planteó como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de dosis diferenciales de vinazas crudas y biodigeridas en la salinidad de un suelo cultivado con caña de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina. Se aplicaron seis tratamientos: un testigo sin aplicación de ningún fertilizante (T1), un testigo con fertilización convencional (90 kg ha⁻¹ de N) (T2), dos tratamientos con aplicación de vinazas biodigeridas (VB) (T3: 50 m³ ha⁻¹, T4: 100 m³ ha⁻¹), y dos tratamientos con aplicación de vinaza cruda (VC) (T5: 50 m³ ha⁻¹, T6: 100 m³ ha⁻¹). Luego de dos años de ensayo se observó que el suelo al que se aplicó T6, presentó mayor conductividad eléctrica en los primeros 60 cm en comparación con los otros tratamientos. El incremento no supera los límites de salud agrícola del suelo. Este cambio se explica por una suma de factores: alta carga de sales de la vinaza y superior a la capacidad de extracción del cultivo; capacidad de retención intermedia del suelo, asociada al complejo de intercambio, tipo y mineralogía de las arcillas y alta saturación de bases inicial.

Palabras clave: bioetanol, conductividad eléctrica, potasio, cationes solubles

SALINITY BY VINASSE APPLICATION IN A SUBTROPICAL SOIL CULTIVATED WITH SUGARCANE

ABSTRACT

Bioethanol production from sugarcane has a strong sustainability challenge. The production of 1 m³ of alcohol generates 10-13 m³ of the vinasse effluent. Vinasse is a dark brown, acidic liquid with high organic load and salts. Vinasse application in sugarcane fields is a frequent and recommended practice. The aim of this study was to evaluate the effect of differential doses of raw and biodigested vinasse application in the salinity of a soil cultivated with sugarcane in Tucumán, Argentina. Six treatments were applied: the general control with no fertilizer application (T1), one control with conventional fertilization (90 kg ha⁻¹ of N) (T2), two treatments with biodigested vinasses (VB) (T3: 50 m³ ha⁻¹, T4: 100 m³ ha⁻¹), and two treatments with raw vinasses (VC) application (T5: 50 m³ ha⁻¹, T6: 100 m³ ha⁻¹). After two years of the trial, the soil with T6 showed higher electrical conductivity in the first 60 cm than the other treatments. The increase does not exceed the agricultural health limits of soils. This change is explained by a higher salt concentration in the vinasse than the extraction capacity of the crop; intermediate soil retention capacity, associated with the exchange complex, type and mineralogy of the clays and high initial base saturation.

Key words: bioethanol, electrical conductivity, potassium, soluble cations

1 INTA, EEA Famaillá

2 INTA, Labintex

* Autor de contacto: portocarrero.rocio@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

A fin de atender una creciente demanda de energía y disminuir el impacto en el cambio climático, a nivel mundial se busca reemplazar el uso de los combustibles fósiles por fuentes de energías renovables y más limpias. Con la Ley Nacional 26.334/08 (Congreso de la Nación Argentina, 2008), Argentina promueve el uso de bioetanol principalmente para uso automotor, con un incremento gradual del porcentaje en las naftas (Ministerio de Minería y Energía, 2016). La producción de este biocombustible se abastece en un 40-45% a partir de la fermentación y destilación de jugos y melazas o de mezclas de jugos y melazas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) (Dirección de Biocombustibles, 2018). Este cultivo está centralizado en las provincias del noroeste argentino: Tucumán, Salta y Jujuy.

Esta tecnología presenta un fuerte desafío de sustentabilidad por el gran volumen de efluente vinaza generado en la etapa de destilación. La producción de 1 m³ de alcohol a partir de caña de azúcar, genera 10-13 m³ de vinaza. Es un líquido pardo oscuro, ácido ($\text{pH}_x \approx 5,1$), con alta carga orgánica ($\text{DBO}_{5x} \approx 70.000 \text{ mg L}^{-1}$) y alta conductividad eléctrica ($\text{CE}_x \approx 31,15 \text{ dS m}^{-1}$). Los cationes mayoritarios solubles de la vinaza se componen en promedio por un 61% de potasio (K^+), 18% de calcio (Ca^{++}), 13% de sodio (Na^+) y 8 % de magnesio (Mg^{++}) (Fadda & Morandini, 2007). Es decir, por la producción de los más de 400.000 m³ de bioetanol en el 2016 (Dirección de Biocombustibles, 2018), se estiman más de 5 millones de m³ del efluente, con una carga orgánica total de 350 10⁶ kg DBO_5 y 60 10⁶ kg K^+ ($\text{K}^+ \approx 306,4 \text{ meq L}^{-1}$).

La disposición final o revalorización de la vinaza es una decisión de cada empresa sucroalcoholera, enmarcada en las reglamentaciones vigentes, tecnologías disponibles, y apoyada con políticas de promoción de mejora del Estado (Morandini & Quaia, 2013).

La aplicación de vinazas en los campos productivos de caña de azúcar, es una práctica frecuente y recomendada (Secretaría de Estado de Medio Ambiente Tucumán, 2011; Companhia

Ambiental do Estado de São Paulo, 2015) que se fundamenta en la mejora, devolución y aporte de nutrientes y calidad al cultivo y al suelo. El cultivo extrae aproximadamente 56-86 kg N ha⁻¹, 13-78 kg P_2O_5 ha⁻¹, 170-270 kg K_2O ha⁻¹, 32-60 kg CaO ha⁻¹ y 14-19 kg MgO ha⁻¹ al año (Fogliata, 1995; Julio Victor Saez, com. per.) que, principalmente el nitrógeno, se suplementa con fertilización química. Si bien los suelos subtropicales de Tucumán se caracterizan por una alta saturación de sales intercambiables, en ciertas zonas cañeras el potasio intercambiable es menor a 0,25 cmol kg⁻¹, que es un límite aproximado por debajo del cual el cultivo responde a la fertilización (Fogliata, 1995; Moscatelli *et al.*, 2005). Además, en suelos productivos con aplicación de vinazas, se observaron mejoras en el contenido de carbono, en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y en la densidad aparente (Canellas *et al.*, 2003; Bebé *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2012; Rosset *et al.* 2014).

Existen alternativas destacadas de tratamiento de la vinaza, aún en escala piloto en la Argentina, tales como la biodigestión anaeróbica y concentración. Estas tecnologías resuelven parcialmente alguna de las problemáticas de la vinaza (carga orgánica o volumen), sin embargo no garantizan que se logren los valores límites permitidos para su vuelco en cursos de agua, por lo que requiere un tratamiento posterior (Morandini & Quaia, 2013).

En la provincia de Tucumán, se recomiendan aplicaciones de hasta 150 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en suelos productivos con caña de azúcar de CE menor a 2,50 dS m⁻¹ (Secretaría de Estado de Medio Ambiente Tucumán, 2011).

Sin embargo, uno de los elementos más sensibles de la aplicación de vinazas en campos productivos, es su contenido de sales y el impacto que pudieran tener en las sales solubles e intercambiables del suelo (Fadda & Morandini, 2007; Christofolletti *et al.* 2013; Fuess & García, 2014).

Se planteó como objetivo de esta investigación evaluar el efecto de la aplicación de dosis diferenciales de vinazas crudas y biodigeridas en la salinidad de un suelo cultivado con caña de azúcar en la provincia de Tucumán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En la campaña 2015-2016 el cultivo de caña de azúcar presentó una extensión de 274.180 ha en toda la provincia, distribuidos principalmente en la llanura deprimida tucumana, y también en la llanura chacopampeana y pedemonte (Zuccardi & Fadda, 1985; Fandos *et al.*, 2016). La llanura deprimida corresponde a la porción media y baja de la cuenca del río Salí, y constituye una planicie aluvial de suaves ondulaciones y débiles depresiones. Las precipitaciones incrementan de este a oeste debido a la presencia de las sierras del oeste (Sesma *et al.* 1998). El nivel freático tiene una influencia importante en la génesis de suelos, con mayor grado de manifestación de hidromorfía de acuerdo a la posición del suelo en el relieve (Zuccardi & Fadda, 1985; Zappino, 2010; Puchulu & Fernandez, 2014). La profundidad promedio anual del nivel freático es entre 0,5-1,7 m

(Figuroa *et al.*, 1996). El ensayo se instaló en un campo cultivado con caña de azúcar de la llanura deprimida, subunidad no salina ($-27^{\circ} 1'18.18''S$; $-65^{\circ}22'13.89''O$) (**Figura 1**). Esta subunidad se caracteriza por un clima templado cálido húmedo, y suelos de moderado desarrollo de los órdenes Molisol y Entisol, con régimen údico (Moscatelli *et al.*, 2005). En el sector de instalación del ensayo, las precipitaciones promedio anuales son de 1.316 mm, concentradas en los meses de noviembre a abril, y una evapotranspiración promedio anual igual a 1.021 mm (INTA Famailla, 2017).

Descripción del ensayo

El cultivo de caña de azúcar es una Poaceae semiperenne, que se renueva aproximadamente cada 5 años. El ciclo anual del cultivo se extiende desde la brotación en octubre-noviembre, hasta su cosecha desde mayo a septiembre, de acuerdo a las condiciones ambientales. La caña recién

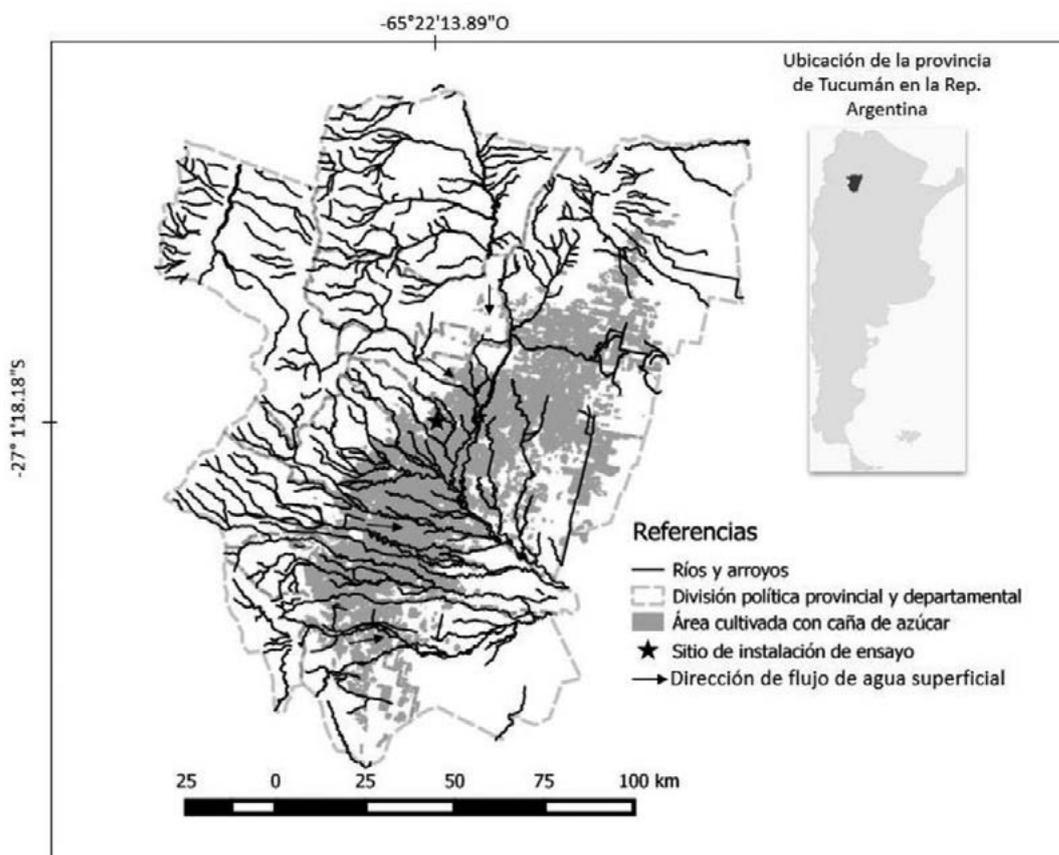


Figura 1. Sitio del ensayo en la provincia de Tucumán, Argentina. Fuente de capas geográficas: <http://rides.producciontucuman.gov.ar/#wfs>

Figure 1. Trial location in Tucumán province, Argentina. Source of geographic layers: <http://rides.producciontucuman.gov.ar/#wfs>

plantada, sin cosecha previa, se denomina caña planta. A partir de la primera cosecha los ciclos anuales se denominan soca 1, soca 2, y así sucesivamente, hasta la renovación.

En el ensayo se utilizó la variedad LCP 85-384, de amplia difusión en el área cultivada provincial. Previo a la implantación del ensayo, en noviembre, se obtuvo una muestra compuesta del suelo. La aplicación de las vinazas se realizó anualmente en la etapa de macollaje del cultivo (diciembre-enero), en los años de caña planta y soca 1. Se utilizó como recipiente de las vinazas, un tanque graduado con grifo de 1 m³ elevado a 1,5 m del suelo, ubicado en la cabecera de cada parcela. El tanque estaba conectado a un caño perforado longitudinalmente, del largo del surco (10 m). La aplicación se realizó surco por surco, realizando una descarga de vinaza siguiendo la marca de graduación volumétrica del tanque y el volumen calculado a aplicar según el tratamiento.

El diseño experimental utilizado es completamente aleatorizado, con cuatro repeticiones. Cada parcela se constituyó de seis surcos con espaciamiento de 1,5 m por 10 m de largo, siendo la parcela efectiva de evaluación la comprendida por los cuatro surcos centrales. Los tratamientos considerados incluyeron un testigo absoluto (T1) sin aplicación de ningún fertilizante, un testigo con la fertilización convencional (90 kg ha⁻¹ de N) (T2), dos tratamientos con aplicación de vinazas biodigeridas (VB) de un digestor anaeróbico piloto T3: 50 m³ ha⁻¹, T4: 100 m³ ha⁻¹, y dos tratamientos con aplicación de vinaza cruda (VC) T5: 50 m³ ha⁻¹, T6: 100 m³ ha⁻¹.

Las vinazas crudas aplicadas se caracterizaron por un pH igual 4,8, 99 g L⁻¹ de sólidos totales y

60 g L⁻¹ de sólidos volátiles. Las vinazas biodigeridas presentaron promedios de pH igual a 7,7, 53 g L⁻¹ de sólidos totales y 21 g L⁻¹ de sólidos volátiles. La información meteorológica se obtuvo de la Estación Meteorológica manual del INTA Famaillá.

Evaluación de sales del suelo

Al inicio de la maduración del cultivo (abril) en soca 1, se realizó un muestreo de suelo en todos los tratamientos. Cada parcela se muestreó a los 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm de profundidad, en dos puntos sobre las bandas de los surcos centrales. Se tomaron un total de 72 muestras. En cada una se midió en el laboratorio la CE en extracto de saturación (CE_e) por conductividad, los cationes calcio, magnesio por complexometría y sodio y potasio por fotometría de llama. Los resultados representan los cambios en el contenido de sales del suelo luego de dos años seguidos de aplicación de los tratamientos. El muestreo de suelo se realizó a los tres meses de la última aplicación de vinazas, posterior a la fase de mayor extracción de nutrientes por parte del cultivo (Rengel *et al.*, 2011) y a los procesos de movimiento vertical del agua del suelo (Figuroa *et al.*, 1996).

Los datos se analizaron mediante análisis de regresión lineal múltiple, ANAVA para contraste de tratamientos, y test DGC para diferencia de medias ($p < 0.05$), utilizando el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017)

RESULTADOS

Condiciones del ensayo

El suelo en estudio tiene pH fuertemente ácido hasta los 30 cm (**Tabla 1**), desde allí

Tabla 1. Parámetros físico-químicos iniciales del suelo en estudio a diferentes profundidades: pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), potasio intercambiable (K inter) y porcentaje de arena, limo y arcilla.

Table 1. Initial physico-chemical characteristics of the studied soil at different depths: pH, electrical conductivity (CE), organic carbon (CO), cation exchange capacity (CIC), exchangeable K (K inter) and sand, silt and clay percentage.

Prof	pH	CE	CO	CIC	K inter	Arena	Limo	Arcilla
cm		dS m ⁻¹	%	cmol kg ⁻¹	cmol kg ⁻¹		%	
0-10	5,4	0,42	1,09	12,5	0,5	32,9	45,8	21,3
10-30	5,4	0,40	1,17	12,5	0,6	39,7	39,9	20,4
30-60	5,8	0,31	0,81	16	0,4	30,9	43,1	26,0
60-90	6,1	0,19	0,28	14,5	0,3	36,6	43,5	19,9

hasta los 90 cm es moderadamente ácido. Tiene una baja concentración de sales. El contenido de carbono orgánico es bajo hasta los 60 cm y muy bajo en la última profundidad. El complejo de intercambio de los primeros centímetros de suelo, tiene una saturación potásica entre 4-5%. La clase textural es franca en todo el perfil evaluado.

Desde el mes de noviembre a abril del primer año de aplicación, las precipitaciones y evapotranspiración fueron de 870 y 578 mm respectivamente. Para el mismo período del segundo año, la precipitación fue de 1.393 mm y la evapotranspiración potencial de 628 mm.

Cambios de las sales del suelo

Las diferencias estadísticas entre tratamientos se observaron en los primeros 60 cm del suelo (**Figura 2**). En los primeros 0-30 cm la CE_e es mayor en el T6 ($CE_{e\bar{x}} = 0,48 \text{ dS m}^{-1}$) que en los otros tratamientos ($CE_{e\bar{x}} = 0,26\text{--}0,37 \text{ dS m}^{-1}$). En la profundidad de 30-60 cm el T6 tiene una $CE_{e\bar{x}} = 0,29 \text{ dS m}^{-1}$, significativamente mayor que los otros tratamientos, cuyas $CE_{e\bar{x}} = 0,19\text{--}0,22 \text{ dS m}^{-1}$. Porcentualmente,

luego de dos años de aplicación continua de T6, se observó un aumento del 85% de la CE_e de los primeros 30 cm del suelo y del 53% en la profundidad de 30-60 cm.

En la profundidad de 0-30 cm, el 93% de la variación de CE_e se explica por el calcio, potasio y magnesio solubles de acuerdo a la ecuación siguiente. No se identificó que el sodio soluble ($p=0,26$) aporte al proceso de salinización del suelo.

$CE_e \text{ (dS m}^{-1}) = 0,13 + 0,07 K^+ + 0,08 Ca^{++} + 0,02 Mg^{++}$. Parámetros de análisis de la varianza del modelo: $R^2 = 0,93$; $p < 0,0001$; $gl = 3$; $F = 116,17$.

La **Tabla 2** muestra que en la profundidad de 0-30 cm, el Ca^{++} es significativamente mayor en el T6 ($Ca^{++}_{\bar{x}} = 3,0 \text{ meq L}^{-1}$) que en el resto de los tratamientos ($Ca^{++}_{\bar{x}} = 1,0\text{--}1,8 \text{ meq L}^{-1}$); el K^+ es mayor en T3, T4 y T6 ($K^+_{\bar{x}} = 0,58\text{--}0,78 \text{ meq L}^{-1}$), que en T1, T2 y T5 ($K^+_{\bar{x}} = 0,15\text{--}0,30 \text{ meq L}^{-1}$) y el Mg^{++} es mayor en T4, T5 y T6 ($Mg^{++}_{\bar{x}} = 2,90\text{--}3,43 \text{ meq L}^{-1}$) que en T1, T2 y T3 ($Mg^{++}_{\bar{x}} = 1,35\text{--}1,65 \text{ meq L}^{-1}$).

En los 30-60 cm de profundidad, los cationes no presentan diferencias significativas entre los tratamientos.

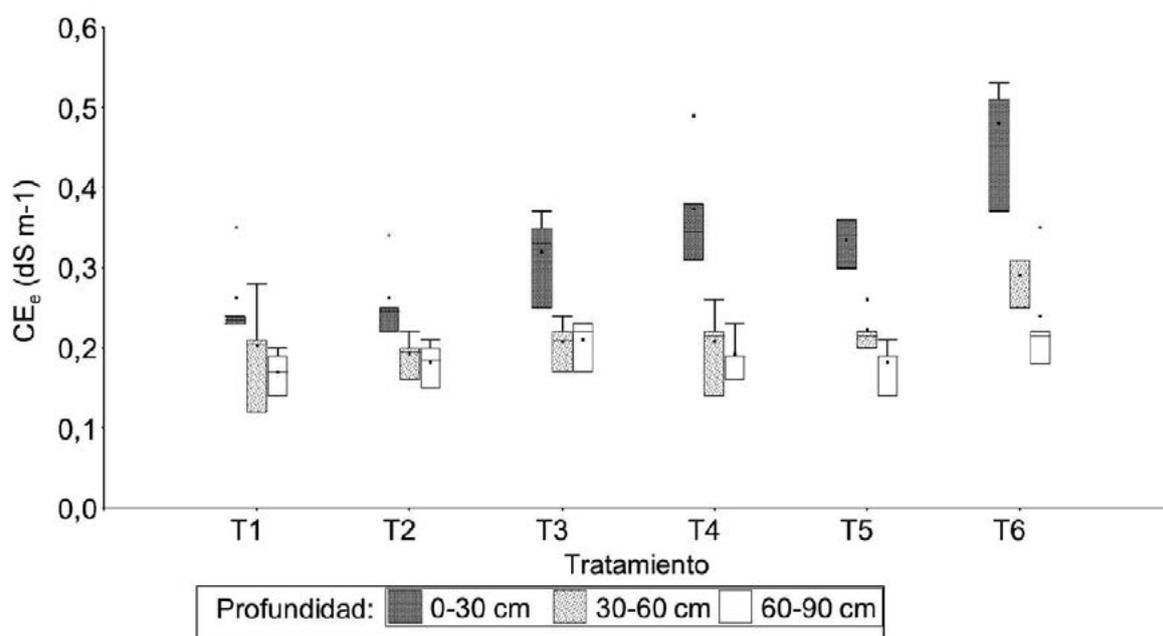


Figura 2. Media y cuartiles de la conductividad eléctrica del suelo a las profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 cm en cada tratamiento.

Figure 2. Soil electrical conductivity mean and quartiles at 0-30, 30-60 and 60-90 cm depth in each treatment.

Tabla 2. Media y desvío estándar de calcio (Ca⁺⁺), magnesio (Mg⁺⁺), sodio (Na⁺) y potasio (K⁺) solubles del suelo luego de dos años de aplicación de los tratamientos, a las profundidades de 0-30 cm; 30-60 cm y 60-90 cm. Las diferencias significativas entre tratamientos para una profundidad, se identifican con letras diferentes.

Table 2. Mean and standard deviation of calcium (Ca⁺⁺), magnesium (Mg⁺⁺), sodium (Na⁺) and potassium (K⁺) in soil solution after two years of treatments application, at depths of 0-30 cm; 30-60 cm and 60-90 cm. Significant differences between treatments at the same depth are shown by different letters.

Trat.	n	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		K ⁺					
		meq L ⁻¹											
		media	D.E.	media	D.E.	media	D.E.	media	D.E.				
profundidad 0-30 cm													
1	4	1,1	0,38	a	1,35	0,31	a	0,23	0,22	a	0,15	0,06	a
2	4	1,0	0,4	a	1,43	0,74	a	0,17	0,13	a	0,20	0,12	a
3	4	1,4	0,52	a	1,65	0,91	a	0,23	0,1	a	0,78	0,46	b
4	4	1,8	0,4	a	2,95	0,57	b	0,45	0,17	a	0,65	0,44	b
5	4	1,7	0,38	a	2,90	0,43	b	0,33	0,17	a	0,33	0,05	a
6	4	3,0	0,83	b	3,43	0,74	b	0,33	0,1	a	0,58	0,05	b
profundidad 30-60 cm													
1	4	1,1	0,6	a	1,27	0,55	a	0,68	0,41	a	0,05	0,06	a
2	4	0,9	0,2	a	1,50	1,07	a	0,47	0,17	a	ND	0	a
3	4	0,8	0,3	a	1,18	0,49	a	0,60	0,18	a	0,1	0	a
4	4	1,0	0,4	a	2,05	0,41	a	0,68	0,21	a	0,07	0,05	a
5	4	1,1	0,6	a	1,85	0,3	a	0,75	0,24	a	0,07	0,06	a
6	4	1,6	0,4	a	1,73	0,45	a	0,68	0,28	a	0,05	0,06	a
profundidad 60-90 cm													
1	4	0,8	0,31	a	1,68	0,97	a	0,63	0,15	a	0,03	0,05	a
2	4	0,4	0,1	a	0,75	0,1	a	0,53	0,21	a	0,03	0,05	a
3	4	0,9	0,22	a	0,75	0,41	a	0,82	0,22	a	0,05	0,06	a
4	4	0,9	0,2	a	1,23	0,33	a	0,68	0,17	a	0,03	0,05	a
5	4	0,7	0,38	a	1,43	0,21	a	0,65	0,13	a	ND	0	a
6	4	1,4	0,17	a	1,50	0,59	a	0,75	0,39	a	0,07	0,1	a

ND, bajo los niveles de detección

La profundidad de 60-90 cm no presentó diferencias entre los tratamientos de ninguna de las variables estudiadas.

DISCUSIÓN

El incremento en la CE luego de dos años de aplicación de T6, evidencia un balance positivo en la entrada de sales a la solución por la aplicación de vinaza en relación a las salidas (fijación y adsorción al suelo, lixiviación y extracción por la biota y vegetación) (Sposito, 2008). Este incremento no supera los límites para ser considerado suelo salino, que se fija

en 4 dS m⁻¹, y de aptitud para el cultivo de caña de azúcar, que es de hasta 2 dS m⁻¹ dependiendo de la variedad (Lavado & Taboada, 2009; Sanzano & Fadda, 2009).

Entre el complejo de intercambio y la solución del suelo existe un equilibrio en la concentración de sales, que se establece por dos fuerzas opuestas: la atracción del complejo de intercambio y los cationes solubles, y la difusión desde el complejo de intercambio hacia la solución del suelo, que presenta menor concentración de iones (Sposito, 2008). Los procesos de adsorción-desorción de cationes son rápidos (Conti, 2000).

La capacidad de retención de cationes del suelo, juega un doble rol en la regulación de la CE. Por una parte, los cationes agregados con el efluente, se adsorben al complejo de intercambio, reduciendo la concentración en la solución (Du *et al.*, 2004; Brito *et al.*, 2007a) y amortiguando el aumento de la CE (Brito *et al.*, 2007b; Neto, 2008). Pero también se debe considerar, que los suelos con mayor contenido de arcillas retienen por más tiempo los cationes adsorbidos, y con ello la CE (Armengol *et al.*, 2003), que aquellos en los que predomina la fracción arena (Silva *et al.*, 2014a).

El suelo en estudio presenta una CIC comprendida en los rangos reportados por Moscatelli *et al.* (2005), entre 7-23 cmol kg⁻¹, para el sector cañero central de la provincia. La variabilidad espacial de CIC responde a la textura, y al origen alternado entre sedimentos loésicos transportados por el viento y retransportados por el escurrimiento fluvial y material aluvial transportado y depositado por la red fluvial (Puchulu & Fernandez, 2014). Los suelos con estas CIC y contenido de arcillas presentan un potencial de retención intermedio (Junqueira *et al.*, 2009).

En los suelos de la llanura deprimida, la retención no solo está favorecida por la CIC y contenido de arcillas, sino también por la mineralogía. Puchulu (2010) describe que parte de la fracción arcillosa está compuesta por illitas, illitas degradadas y cloritas expandibles. Las illitas tienen una reconocida afinidad con el potasio, reduciendo el potencial de desorción de este catión (Najafi Ghiri *et al.*, 2010). La misma afinidad se presenta entre las cloritas y el magnesio (Conti, 2000). La presencia de illitas degradadas, sumado a que no está implementada la práctica de la fertilización potásica, hace suponer que además de una adsorción al complejo de intercambio, el potasio agregado con las vinazas puede ser fijado en el espacio interlamilar de las arcillas (Zhang *et al.*, 2009). Esto implica una restauración de la estructura de las arcillas, que el potasio no estará disponible en el corto plazo en la solución del suelo, pero si está potencialmente disponible en el mediano y largo plazo.

El aumento de la CE en los 30-60 cm, evidencia un proceso de lixiviación de sales desde la

capa superficial. En las regiones estudiadas por Ortegón *et al.* (2016) y Silva *et al.* (2014b), el acuífero libre de escasa profundidad (<4m) presentó cambios en la composición iónica y CE del agua debido a la aplicación de vinazas.

En este suelo, la adición de 100 m³ ha⁻¹ de vinaza significa una carga de sales que excede la capacidad de retención intermedia de los primeros 30 cm. Gonzalez *et al.* (1999) observan que en un Argiudol con predominancia de arcillas esmectitas y baja saturación de potasio tiene mayor poder de retención y fijación de este catión, que en un Argiudol con alto contenido de illitas y alta saturación potásica. Se atribuye esta diferencia a que la capacidad de retención no solo está asociada a las propiedades de CIC, contenido y tipo de arcillas, sino que también debe considerarse la saturación de bases inicial del suelo. En general, los suelos de la llanura deprimida no salina, se caracterizan por presentar una saturación catiónica del CIC mayor al 70%, y por ello es frecuente encontrar suelos con saturación potásica próxima o mayor al 5% (Moscatelli *et al.*, 2005) como presenta el caso en estudio. Por la adición de la vinaza en el suelo con alta saturación del CIC, quedan sales solubles excedentes en los primeros 30 cm del suelo, que se lixivian hacia las capas más profundas. Los suelos de capacidad de retención intermedia y alta saturación del CIC, responden al régimen climático templado y a la napa freática alta, que condicionan la temperización del material original y el lavado de sales (Zuccardi & Fadda, 1985; Puchulu, 2010). Aunque la calidad física del suelo bajo caña de azúcar tiene un alto deterioro debido a las labores y el tránsito pesado (Tesouro *et al.*, 2016), no debería descartarse el movimiento vertical de sales debido a flujo preferencial por macroporos.

En el primer y segundo año del ensayo se observó un balance hídrico positivo de 290 mm y 765 mm respectivamente, entre las precipitaciones y la evapotranspiración potencial durante los meses de noviembre-abril (período de recarga del acuífero, aplicación de vinazas y crecimiento del cultivo). Parte del agua excedente infiltra, transportando las sales solubles hacia capas más profundas del suelo.

En la provincia de Tucumán, la caña de azúcar extrae entre 170-270 kg ha⁻¹ de K₂O en tallos, dependiendo de la variedad, edad y rendimiento cultural (Fogliata, 1995; Julio Victor Saez, com. pers.). En función de los contenidos de potasio de la vinaza reportados por Fadda & Morandini (2007) (3,13-22,6 kg m⁻³) y la capacidad de extracción de los tallos, dado que las hojas frecuentemente quedan en el campo, la dosis de vinaza a aplicar para reposición debería estar entre 7,5-86 m³ ha⁻¹ año⁻¹. En cuanto al calcio y magnesio, las otras sales que aportó la vinaza, el cultivo extrae 32-60 kg CaO ha⁻¹ y 14-19 kg MgO ha⁻¹ al año, por lo que las dosis estimadas de reposición de nutrientes variarían entre 13-110 m³ ha⁻¹ año⁻¹, y 9-61 m³ ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. La aplicación de 100 m³ ha⁻¹ de vinaza supera el rango estimado para potasio y magnesio, por lo que las sales restantes quedarían disponibles en el suelo. Debe destacarse que esta dosis y los valores estimados para reposición de nutrientes, son inferiores a la dosis máxima (150 m³ ha⁻¹ año⁻¹) recomendada localmente (Secretaría de Estado de Medio Ambiente Tucumán, 2011).

Dado que presenta una CE menor a 2,50 dS m⁻¹, el suelo en estudio y la mayoría de los cultivados con caña de azúcar en la provincia (Zucardi & Fadda, 1985; Sanzano & Fadda, 2009; Aranda *et al.*, 2016), son aptos para la aplicación de vinazas de acuerdo a la normativa vigente (Secretaría de Estado de Medio Ambiente Tucumán, 2011). Los resultados presentados en este trabajo, refuerzan la importancia de la estimación de la dosis a aplicar y del monitoreo periódico. Brasil, el mayor productor mundial de bioetanol de caña de azúcar, establece las dosis de acuerdo a la cantidad de potasio que extrae el cultivo, la concentración de ese elemento en la vinaza y el contenido en el suelo de destino. Aunque los suelos tropicales son típicamente pobres en cationes de intercambio, se fijan límites para prevenir la salinización, el desequilibrio de iones o la lixiviación. Por ello, se establece que cuando la saturación de potasio del complejo de intercambio sea superior al 5% en los primeros 80 cm de suelo, las aplicaciones se deben limitar a la reposición de lo extraído por la planta (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015). En Colombia, las

dosis se establecen en base a las necesidades nutricionales del cultivo, propiedades del suelo, vulnerabilidad del acuífero, la cercanía de cursos de agua y áreas forestales protectoras (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2012).

La CE es un buen indicador en el cálculo de índices de calidad de suelos con aplicación de efluentes o enmiendas orgánicas (Romaniuk *et al.*, 2011; Doula *et al.*, 2013). Esto se debe a que responde al cambio en la tecnología aplicada (se observan diferencias significativas), es relevante, comprensible y accesible. En el cálculo de índices de calidad de suelos, además deben considerarse otros parámetros tales como pH, potasio intercambiable, materia orgánica de acuerdo a los componentes textura y profundidad del perfil.

El suelo al que se aplicó 100 m³ ha⁻¹ año⁻¹ de vinaza cruda durante dos años, presentó mayor CE en los primeros 60 cm que los otros tratamientos. Este cambio se explica por una suma de factores: alta carga de sales de la vinaza y superior a la capacidad de extracción del cultivo; capacidad de retención intermedia del suelo, asociada al complejo de intercambio, tipo y mineralogía de las arcillas y alta saturación de bases inicial.

REFERENCIAS

- Aranda, ED; EA Arroyo; GA Sanzano; RF Madrid & PM Sol. 2016. Indicadores de calidad de suelos para caña de azúcar en la llanura deprimida salina de la provincia de Tucumán. XX Reunión Técnica Nacional de la Caña de azúcar. Sociedad Argentina de Técnicos de Caña de Azúcar.
- Armengol, JE; R Lorenzo & N Fernández. 2003. Utilización de la vinaza como enmienda orgánica y su influencia en las propiedades químicas de vertisoles y en los rendimientos de la caña de azúcar. Cultivos Tropicales 24:67-71.
- Bebé, FV; MM Rolim; EMR Pedrosa; GB Silva & VS Oliveira. 2009. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. Rev. bras. eng. agríc. ambient. 13:781-787.
- Brito, FL; MM Rolim & EMR Pedrosa. 2007a. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. Eng. Agríc. 27:773-781.
- Brito, FL; MM Rolim; JAA Da Silva & EMR Pedrosa. 2007b. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. Rev. bras. eng. agríc. ambient. 11:318-323.

- Canellas, LP; ACX Velloso; CR Marciano; JFGP Ramalho; VM Rumjanek; CE Rezende & GA Santos. 2003. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Rev. Bras. Ciên. Solo* 27:935–944.
- Christofoletti, CA; JP Escher; JE Correia; J Fernanda; U Marinho & CS Fontanetti. 2013. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Manag.* 33:2752–2761.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2015. Norma Técnica 4231. Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. *Diario Oficial Estado de São Paulo- Cuaderno Ejecutivo I, edición n° 125 do dia 13/02/2015, Brasil.*
- Congreso de la Nación Argentina. 2008. Ley 26334. Apruébase el Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol. *Boletín Oficial del 03/01/2008, número: 31315, Argentina.*
- Conti, E. 2000. Intercambio de iones. En: M. Conti (ed). *Principios de edafología, con énfasis en suelos argentinos.* Pp 201–212. Editorial Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 430 pp.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. 2012. Resolución 0100. N°0081. Uso, manejo, aplicación, mantenimiento de las vinazas y de los productos que de ellas se deriven, en el área de jurisdicción de la Corporación Regional del Valle de Cauca. *Diario Oficial* 48.360, Colombia.
- Di Rienzo JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M **Tablada** & CW Robledo. 2017. *InfoStat versión 2017.* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Dirección de Biocombustibles. 2018. Produccion y ventas de bioetanol. Hoja de cálculo Resumen de bioetanol. Archivo Excel estadísticas_biocombustibles. Ministerio de Energía y Minería. Secretaría de Recursos Hidrocarburos. Subsecretaría de Refinación y Comercialización. <https://datos.minem.gob.ar/dataset/estadisticas-de-bio-diesel-y-bioetanol> último acceso 7/05/2018.
- Doula, MK; V Kavvadias & K Elaiopoulos. 2013. Proposed soil indicators for olive mill waste (OMW) disposal areas. *Water. Air. & Soil Pollut* 224:1621.
- Du, YJ; S Hayashi & YF Xu. 2004. Some factors controlling the adsorption of potassium ions on clayey soils. *Applied Clay Science* 27:209–213.
- Fadda, G & M Morandini. 2007. El uso agrícola de la vinaza. Revisión de antecedentes y caracterización de las condiciones del área cañera tucumana para su aplicación. *Publicación Especial N° 33.* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Tucumán, Argentina. 18 pp.
- Fandos, C; J Scandaliarias; P Scandaliarias; JI Carreras Badrés & FJ Soria. 2016. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2016 en Tucumán. *Reporte Agroindustrial* 124:1–13.
- Figueroa, LR; LF Medina & AM Pietroboni. 1996. Variaciones del nivel freático en la llanura deprimida de Tucumán. *Serie Monográfica N°3.* INTA- CRTS. Tucumán, Argentina. 39 pp.
- Fogliata, FA. 1995. *Agronomía de la caña de azúcar.* Tomo III. *Tecnología-Costos-Producción.* El Graduado. Tucumán, Argentina. 370 pp.
- Fuess, LT & ML García. 2014. Implications of stillage land disposal: A critical review on the impacts of fertigation. *J Environ Manage* 145:210–229.
- Gonzalez, MG; G Moreno; ME Conti & AM de la Horra. 1999. Cambios en la fijación-liberación de potasio en argiudoles con distintos tipos de arcillas y saturación potásica. *Cienc. suelo* 17:27–30.
- INTA Famailla. 2017. Datos históricos. SIGA - Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico. <http://siga2.inta.gov.ar/#/data> último acceso 5/5/5018.
- Jiang, ZP; YR Li; GP Wei; Q Liao; TM Su; YC Meng; HY Zhang & CY Lu. 2012. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech* 14:412–417.
- Junqueira, C de ÁR; VEM Junior; LF Lossardo; BdaC Felicio; OM Junior; RC Foschini; RM Mendes & R Lorandi. 2009. Identificação do potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na bacia do Ribeirão do Pântano, Descalvado (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 39:507–518.
- Lavado, RS & MA Taboada. 2009. Alteraciones de la fertilidad del suelo causadas por halomorfismo. En: MA Taboada & SR Lavado (ed). *Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones.* Pp 1–14. Editorial Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 163 pp.
- Ministerio de Minería y Energía. 2016. Resolución 37. Biocombustibles. Bioetanol. Modificación Resoluciones 44/2014, 698/2009, 553/2010 y 1283/2006. *Mezclas.* Volúmenes. *Boletín Oficial del 07/04/2016, número: 33.352, página: 5.* Argentina.
- Morandini, M & E Quaia. 2013. Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. *Avance Agroindustrial* 34:1–12.
- Moscattelli, G; RE Godagnone; JC Salazar; V Nakama & MA Cuenca. 2005. Estudio de suelos para la reconversión del sector agropecuario. Departamentos de Famaillá-Monteros-Simoca y Chicligasta, provincia de Tucumán. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 134 pp.
- Najafi Ghiri, M; A Abtahi; F Jaberian & H.R. Owliaie. 2010. Relationship between soil potassium forms and minera-

- logy in highly calcareous soils of southern Iran. *Aust. J. Basic & Appl. Sci.* 4(3): 434-441.
- Neto, JAL. 2008. Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo Piracicaba. Tesis de Maestría. Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil.
- Ortegon, GP; F Muñoz Arboleda; L Candela; K Tamoh & J Valdes-Abellan. 2016. Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Sci Total Environ* 539:410–419.
- Puchulu, ME. 2010. Los materiales parentales de los suelos y su relación con el comportamiento de las sales, en el sudeste de la Provincia de Tucumán. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Tucumán. San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Puchulu, ME & DS Fernandez. 2014. Características y distribución espacial de los suelos de la provincia de Tucumán. En: S Moyano; ME Puchulu; D Fernandez; G Aceñolaza; ME Vides & S Nieva (ed). *Geología de Tucumán*. Pp 1-17. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán. Tucumán, Argentina. 457 pp.
- Rengel, M; F Gil & J Montaña. 2011. Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. I. Macronutrientes. *Bioagro* 23:43–50.
- Romaniuk, R; L Giuffré & R Romero. 2011. A soil quality index to evaluate the vermicompost amendments effects on soil properties. *Journal of Environmental Protection* 2:502–510.
- Rosset, JS; JA Schiavo; R Augusto & R Atanázio. 2014. Atributos químicos, estoque de carbono orgánico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina* 35:2351–2366.
- Sanzano, AG & GS Fadda. 2009. Características de los suelos para caña de azúcar. Recomendaciones de manejo. En: ER Romero, PA Digonzelli & J. Scandaliaris (ed). *Manual del cañero*. Pp 23-34. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Tucumán, Argentina. 247 pp.
- Secretaría de Estado de Medio Ambiente Tucumán. 2011. Resolución 040. Alternativas de disposición de la vinaza en los suelos de la provincia de Tucumán. <http://sema-tucuman.gov.ar/web/index.php/31-normativa/idga/idgapngclosrechidricos/162-iga-pgrh-resolucion040-sema> último acceso 5/05/5018.
- Sesma, PJ; EY Guido & ME Puchulu. 1998. Clima de la provincia de Tucumán. En: M Gianfrancisco; ME Puchulu; J Durango de Cabrera & GF Aceñolaza (ed). *Geología de Tucumán*. Pp 41-46. Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán. Tucumán, Argentina. 457 pp.
- Silva, APM; JAM Bono & FDAR Pereira. 2014a. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar : Efeito no solo e na produtividade de colmos. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 18:38–43.
- Silva, WP; CDGC de Almeida; MM Rolim; ÊFdeF. Silva; EMR Pedrosa & VGF Silva. 2014b. Monitoramento da salinidade de águas subterráneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 18:394–401.
- Sposito, G. 2008. *The chemistry of soils*. Oxford University Press. New York, EEUU. 342 pp.
- Tesouro, MO; MA Roba; L Fernández de Ullivarri; E Venturilli; OE Neiman; A Romito & LB Donato. 2016. Resultados iniciales de un ensayo de sistemas de manejo de caña de azúcar. XX Reunión Técnica Nacional de la Caña de azúcar. Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar.
- Zappino, RO. 2010. Hidromorfia y condiciones ácuicas en suelos de la llanura aluvial de Tucumán (Argentina). *Cienc. suelo* 28:79–90.
- Zhang, HM; MG Xu; WJ Zhang & XH He. 2009. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15-year long-term fertilization. *Chinese Sci. Bull.* 54 (10): 1773-1780.
- Zuccardi, RB & GS Fadda. 1985. Bosquejo Agroecológico de la provincia de Tucumán. Miscelánea 86. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Tucumán, Argentina. 51 pp.