



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 100 (2):
45-51; 2023



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Actividad enzimática total: indicador de calidad microbiológico de un suelo regado con vinaza

Carolina Sotomayor*, Esteban Arroyo,* Jessica Priscila Navarro Di Marco*, Lucrecia Ludueña**, Andrea Natalia Peña Malavera*** y Gerardo Agustín Sanzano*

*Sección Suelos y Nutrición Vegetal, ** Sección Agronomía de la caña de azúcar, *** ITANOA. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Las Talitas, Tucumán, Argentina. Email: csotomayor@eeaac.org.ar

RESUMEN

En suelos de Tucumán regados con vinaza se ha priorizado la evaluación de indicadores físicos y químicos, y poco la de microbiológicos. Por eso, el objetivo de este trabajo ha sido evaluar la actividad enzimática total (FDA), como indicador microbiológico en un Hapludol taptó árgico regado con vinaza durante tres años consecutivos, y su relación con indicadores químicos. El estudio se realizó mediante un diseño en bloques completamente aleatorizados con ocho tratamientos resultantes de distintos niveles de vinaza y dos profundidades (0-5 y 5-15 cm). Los niveles de vinaza fueron: V0 (testigo), V100 (100 m³ ha⁻¹ año⁻¹) V150 (150 m³ ha⁻¹ año⁻¹) y V300 (300 m³ ha⁻¹ año⁻¹). Se analizaron la FDA, pH, salinidad (CE), potasio intercambiable (K⁺) y fracciones de la materia orgánica: pesada (FP), intermedia (Flnt), particulada (FPart), y también carbono orgánico total (COT). La FDA mostró una interacción significativa entre los dos factores evaluados, siendo significativamente mayor en los que recibieron vinaza. El pH reveló incrementos significativos en V150x0-5 cm y V300x0-5 cm con respecto a V0x0-5 cm. En los 5-15 cm, todos los tratamientos mostraron diferencias significativas. En la CE las diferencias fueron significativas en V150x0-5 cm y V300x0-5 cm. En los 5-15 cm sólo se diferenció el V300. El K⁺ mostró incrementos significativos en V150x0-5 cm y V300x0-5 cm. En los 5-15 cm todos los niveles de vinaza aplicada mostraron diferencias significativas, siendo mayores en V300. El COT mostró valores elevados en los 0-5 cm. Resultados similares se obtuvieron para la FP y la FPart. La Flnt mostró diferencias significativas en V150x0-5 cm. Según el ACP para V150 y V300, los indicadores químicos y la FDA mostraron los valores más elevados en ambas profundidades. El pH, K⁺ y CE se ven altamente relacionadas con V300. Se confirmaron con las correlaciones de Pearson las relaciones positivas y significativas entre la FDA y los indicadores, COT, fracciones de la materia orgánica, pH y K⁺, no así con la CE. También quedaron demostradas las correlaciones entre el COT y FP, Flnt, FPart, el pH con la CE y el K⁺ y entre estos dos últimos. Se recomienda el monitoreo de estos indicadores que demostraron ser sensibles al uso de la vinaza.

Palabras clave: hidrólisis del diacetato de fluoresceína, riego, efluente .

ABSTRACT

Total enzyme activity: microbiological quality indicator of a soil irrigated with vinasse

In the province of Tucumán, priority has been given to the evaluation of physical and chemical indicators in soils irrigated with vinasse, with little emphasis on microbiological indicators. Therefore, the objective was to evaluate the total enzymatic activity (FDA) as a microbiological indicator in a taptó-argic Hapludol irrigated with vinasse for three consecutive years and its relationship with chemical indicators. The design was completely randomized blocks with eight treatments resulting from different levels of vinasse and two depths (0-5 and 5-15 cm). The levels were: V0 (control), V100 (100 m³ ha⁻¹ yr⁻¹), V150 (150 m³ ha⁻¹ yr⁻¹) and V300 (300 m³ ha⁻¹ yr⁻¹). FDA, pH, salinity (EC), exchangeable potassium

Fecha de
recepción:
25/08/2023

Fecha de
aceptación:
05/02/2024

(K⁺) and organic matter fractions were analyzed: heavy (FP), intermediate (Flnt), particulate (FPart), as well as total organic carbon (TOC). Analyses were performed with linear mixed models, principal component analysis (PCA) and Pearson's correlation factor, using InfoStat statistical software and its interface with R. FDA showed significant interaction between the two factors evaluated, being significantly higher in those that received vinasse. The pH revealed significant increases in V150×0-5 cm and V300×0-5 cm with respect to V0×0-5 cm. At 5-15 cm all showed significant differences. In EC the differences were significant in V150×0-5 cm and V300×0-5 cm. In the 5-15 cm only V300 differed. K⁺ showed significant increases in V150×0-5 cm and V300×0-5 cm. In the 5-15 cm all levels of applied vinasse showed significant differences, being higher in V300. TOC showed elevated values in the 0-5 cm. Similar results were obtained for FP and FPart. Flnt showed significant differences at V150×0-5 cm. According to the PCA for V150 and V300, chemical indicators and FDA showed the highest values at both depths. The positive and significant relationships between FDA and TOC, organic matter fractions, pH and K⁺ were confirmed with Pearson correlations, but not with EC. Correlations were also demonstrated between TOC and FP, Flnt, FPart, pH with EC and K⁺ and between the latter two. Monitoring of these indicators, which proved to be sensitive to the use of vinasse, is recommended.

Key words: fluorescein diacetate hydrolysis, irrigation, effluent.

INTRODUCCION

El suelo es un recurso viviente, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es vital para la productividad del ecosistema y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global, según Doran *et al.* (1999), citado por Cerón Rincón y Melgarejo (2005). La definición más completa y mundialmente aceptada de calidad del suelo es la capacidad de un específico tipo de suelo de funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, de sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Doran & Parkin, 1994). Es por ello que la evaluación de la calidad de un suelo a través de cambios en sus propiedades edáficas es eficaz para evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo del suelo destinado a producción, con el propósito de conservar o mejorar la fertilidad y la productividad del mismo.

Las propiedades de los suelos varían naturalmente a través del tiempo por acción de factores que intervienen en su formación (material original, clima, biota, relieve y tiempo) y la acción del hombre. En consecuencia, no existe sólo una medida química, física o biológica para determinar la calidad, sino que es necesario seleccionar variables fácilmente medibles y sensibles a la situación dada. Por tal motivo es necesaria una apropiada selección y uso de indicadores que provean información útil para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre la funcionalidad del suelo durante un período de tiempo.

Según Etchevers *et al.* (2008), los indicadores de calidad del suelo deben cumplir con las siguientes funciones: tienen que ser atributos o propiedades que integren características y procesos de índole física, química o biológica que ocurren en el suelo y cuyo cambio sea lo suficientemente sensible y rápido para poder ser medido cuantitativamente por métodos sencillos, o aun apreciados de manera cualitativa, y en el corto plazo. Tienen, además, que ser fáciles de medir o estimar y, particular-

mente, ser reproducibles. No todos los parámetros tienen la misma relevancia para todos los suelos o situaciones, y son considerados una herramienta muy útil para la toma de decisiones sobre el manejo de un suelo.

Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones para el crecimiento de las raíces y la emergencia de las plántulas. La densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración y conductividad hidráulica saturada son algunas de ellas (Bautista Cruz *et al.*, 2004). Para Rayo Estrada-Herrera *et al.* (2017), entre los indicadores químicos más usados están el pH, la conductividad eléctrica, el carbono orgánico total y lábil, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el nitrógeno total, entre otros.

En la actualidad, el principal desafío es interpretar los valores de los indicadores microbiológicos, dado que no existen valores de referencia de los mismos, a diferencia de los físicos y químicos, para los cuales sí los hay.

Considerando la capacidad de resiliencia del ecosistema, puede pensarse que cualquier cambio medioambiental podría ser detectado en su inicio por su componente biológico (por ej.; enzimas). De ahí que la presencia o deficiencia de enzimas del suelo puedan ser consideradas como un bioindicador sensible ante una posible perturbación ambiental. Las enzimas son biocatalizadores de naturaleza proteica de alto grado de especialización, que en su gran mayoría necesitan de coenzimas no proteicas o cofactores para llevar a cabo su rol catalítico. Este es ejecutado en un ambiente específico denominado sitio activo, dentro del cual una reacción determinada puede transcurrir a mayor velocidad (Nelson y Cox, 2009). Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, la temperatura, la concentración y la presencia de inhibidores (Ulloa Larrea, 2014).

Cada enzima tiene un rango de pH óptimo para ac-

tuar; cuando varía, la conformación de la enzima se altera, haciéndose más lenta su actividad. Valores extremos pueden causar la desnaturalización de las mismas.

La temperatura es también un parámetro de gran importancia en el funcionamiento enzimático. Cada enzima tiene una temperatura óptima de actuación; por debajo y por encima de esta se ralentiza la velocidad de la reacción. Temperaturas extremadamente altas provocan la desnaturalización de la enzima, afectando su funcionamiento.

El aumento de la concentración de la enzima acelera la velocidad de la reacción, siempre que se dis ponga de un sustrato al cual unirse. Una vez que todo el sustrato esté adherido, la reacción deja de acelerarse, puesto que no hay algo a lo que las enzimas adicionales puedan unirse.

Un aumento en la concentración del sustrato aumenta la velocidad de la reacción hasta un cierto punto. Una vez que todas las enzimas se han adherido, cualquier aumento en la concentración del sustrato no tendrá efecto alguno en la velocidad de la reacción, ya que las enzimas disponibles estarán saturadas y trabajando a su máxima capacidad (Nelson y Cox, 2009).

Por lo expuesto, podría considerarse uno de los parámetros bioquímicos que permite evaluar la actividad microbiológica total del suelo (Lillo *et al.*, 2011), tal como la hidrólisis del diacetato de fluoresceína, como un parámetro biológico sensible a las prácticas de manejo del mismo. La hidrólisis de FDA es una reacción que involucra diversos grupos de enzimas, tales como proteasas, lipasas y esterases, constituyendo un indicador sensible de la actividad microbiana total de la hojarasca y el suelo (Adam y Duncan, 2001; Green *et al.*, 2006), citados por Ulloa Larrea (2014).

En la provincia de Tucumán, la caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor relevancia, concentrando una superficie neta de cosecha total de 278.410 ha durante la zafra 2023 (Fandos *et al.*, 2023).

El procesamiento de la caña de azúcar ofrece productos de alto valor; y en particular, la generación de energía de diferentes formas. En tal sentido, la generación de biocombustibles líquidos es un agregado de valor a la cadena de transformación de la caña, sumado al beneficio de la reducción de emisiones de dióxido de carbono. Uno de los principales desafíos en la producción de bioetanol está vinculado a las altas inversiones necesarias para el incremento de la capacidad de procesamiento instalada; y especialmente, al tratamiento adecuado de los efluentes como la vinaza, derivados de la producción (Perez *et al.*, 2011).

Según el Instituto de promoción del azúcar y alcohol de Tucumán (IPAAT 2023), el total de caña molida bruta al finalizar la zafra 2023 fue de 15.372.077 t; y el total de alcohol total producido, de 262.010.523 l.

La vinaza, efluente que deriva de la producción de alcohol a partir de la destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de jugos de caña de azúcar, se caracteriza por una elevada carga orgánica, reacción química ácida (pH) y elevado tenor salino (sales de potasio principalmente). La relación promedio de producción alcohol: vinaza es 1:12 cuando proviene de melaza, principal materia prima empleada en la provincia de Tucumán (Sotomayor *et al.*, 2018). Este residuo orgánico de la industria sucroalcoholera admite diferentes alternativas de

manejo, entre las cuales la más difundida e incorporada por la industria local en la actualidad es la de su aplicación en suelos cultivados con caña de azúcar (Sotomayor, 2022), procurando realizar aportes nutricionales mediante el aprovechamiento de sus principales constituyentes (materia orgánica, nitrógeno, potasio). Otra de las alternativas en vigencia y empleada en menor porcentaje es su disposición en suelos de baja o nula capacidad productiva. La cantidad aplicable en cada situación dependerá de las características de la vinaza, del suelo destino (conductividad eléctrica y textura, principalmente), del régimen de lluvias de la región y también de los efectos que provoque en las propiedades del suelo y en los cultivos, de forma que su uso mejore o al menos mantenga la calidad del mismo, por lo que es fundamental la investigación local sobre los efectos de la aplicación de este efluente.

Por la importancia que implica el riego con vinaza en los suelos de nuestra provincia, tanto los trabajos de investigación como los de monitoreo establecidos por la Secretaría de Estado y Medio Ambiente de Tucumán (SEMA) han hecho hincapié en la evaluación de indicadores de calidad físicos y químicos, y no se ha profundizado sobre parámetros microbiológicos. Existen trabajos, como el de Serri *et al.* (2015), que han demostrado en propiedades microbiológicas-tales como carbono de biomasa microbiana, respiración microbiana, hidrólisis de fluoresceína de acetato, actividad deshidrogenasa y proteínas de suelo relacionadas con glomalinas- el efecto de la aplicación de vinaza cruda en suelos cañeros de la provincia de Tucumán, habiendo provocado incrementos significativos en las mismas.

Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue medir y evaluar la actividad enzimática total como indicador de calidad microbiológico de un Hapludol taptó árgico regado con diferentes dosis de vinaza durante tres años consecutivos, así como su relación con algunos parámetros químicos del suelo considerados de relevancia al momento de evaluar el efecto que el efluente podría causar en el suelo en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en un suelo Hapludol taptó árgico, cultivado con caña de azúcar, ubicado en la localidad de Delfín Gallo, departamento Cruz Alta, provincia de Tucumán, República Argentina. Se trabajó en un diseño en bloques completamente aleatorizados, con ocho tratamientos resultantes de un bifactorial dado por vinaza y profundidad y tres repeticiones de cada uno de ellos. Las dimensiones de las parcelas experimentales fueron de 108 m² cada una. Se evaluaron los siguientes niveles para el factor vinaza aplicada: **V0** (testigo sin aplicación de vinaza), **V100** (aplicación equivalente a 100 m³ ha⁻¹ año⁻¹), **V150** (aplicación equivalente a 150 m³ ha⁻¹ año⁻¹) y **V300** (aplicación equivalente a 300 m³ ha⁻¹ año⁻¹). Las aplicaciones se realizaron en caña planta mediante riegos por surco con vinaza cruda, proveniente de la fermentación de la melaza, durante tres años consecutivos. Posterior al último riego se extrajeron muestras compuestas de suelo en cada parcela experimental a las profundidades de 0-5 cm y 5-15 cm (factor profundidad).

Se analizaron en la vinaza empleada en los riegos

la reacción química (pH), la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica total (MOT), el nitrógeno total (Nt), el fósforo total (Pt) y el potasio total (Kt). También fueron evaluados aquellos indicadores químicos de suelo sobre los cuales la vinaza podría tener efectos significativos, tales como la CE, el pH, el K⁺, el COT y las diferentes fracciones de la materia orgánica: FP, FL, FI, FPart. Todas las determinaciones se realizaron en el laboratorio de la Sección Suelos y Nutrición Vegetal de la EEAOC.

La determinación de la actividad enzimática total (FDA) se realizó en el laboratorio de Microbiología de la EEAOC. Se utilizó la técnica de la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA) descrita por Adam y Duncan (2001). Esta técnica permite cuantificar la actividad de enzimas microbianas tales como proteasas, lipasas y estereasas no específicas asociadas a los procesos bioquímicos de suelo. El producto liberado en esta reacción enzimática es la fluoresceína, la cual puede cuantificarse midiendo absorbancia a 490 nm (A490) en un espectrofotómetro.

Los datos fueron analizados empleando modelos lineales para comparación de tratamientos y análisis de componentes principales (ACP) en el que fueron contemplados todos los parámetros edáficos analizados para ver las asociaciones de las variables con los distintos grupos en el contexto multivariado; además se analizó, mediante correlación de Pearson, la relación entre las FDA obtenidas y los indicadores químicos del suelo. Todos los análisis fueron realizados con el software estadístico InfoStat y su interfaz con R (Di Rienzo *et al.*, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la vinaza

Los resultados del análisis del efluente empleado en esta experiencia señalan lo que ya diversos autores como Baldiris *et al.* (2012) y Morandini y Quaiá (2013) destacan del mismo: una reacción química muy fuertemente ácida y un elevado contenido de sales, de materia orgánica y también de potasio (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química promedio de la vinaza empleada en la experiencia.

Muestra	pH	CE (dS/m)	MOT (%)	Nt (%)	Pt (%)	Kt (%)
Vinaza	4,8	18,1	39,2	0,4	0,2	0,7

CE: conductividad eléctrica, MOT (materia orgánica total), Nt (nitrógeno total), Pt (fósforo total) y Kt (potasio total).

Indicador microbiológico: FDA

La FDA mostró interacción significativa ($p=0,0207$) entre los dos factores evaluados (tratamiento x profundidad). Se observó que para ambos niveles de profundidad la actividad enzimática fue mayor en todos aquellos tratamientos que recibieron vinaza con respecto al testigo sin aplicar. El tratamiento V150x0-5 cm tuvo el mayor nivel de FDA siendo estadísticamente diferente a todos los otros tratamientos, seguido por V300x0-5cm. Los tratamientos V100x0-5cm, V150x5-15cm y V300x5-

15cm fueron estadísticamente iguales con valores cercanos a 1 ug fluoresceína liberada/g suelo (Figura 1).

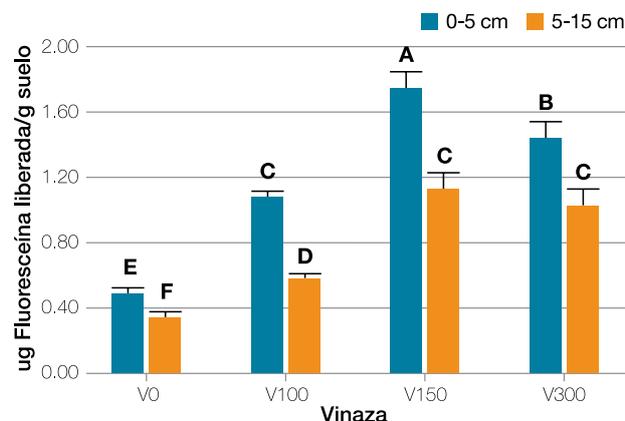


Figura 1. Respuesta de la FDA a las distintas dosis de vinaza y a las profundidades 0-5 cm y 5-15 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Indicadores químicos: pH, CE, K⁺

De los indicadores de calidad químicos evaluados, el pH reveló incrementos significativos en los tratamientos V150x0-5 cm y V300x0-5 cm con respecto a V0x0-5 cm. Este incremento provocó un cambio en la categoría inicial de pH, pasando de moderadamente ácido a neutro. En la profundidad de 5-15 cm todos los niveles de vinaza aplicada mostraron diferencias significativas con respecto a V0. Resultados similares fueron obtenidos por autores como Brito *et al.* (2009) y Gasca *et al.* (2011), los cuales atribuyen que estos cambios podrían deberse a que la vinaza podría inducir a una disminución en el potencial rédox, como consecuencia de la liberación de electrones de los compuestos orgánicos presentes. Este proceso de reducción consume protones (iones H⁺), lo que ocasionaría el aumento de pH. Para García y Rojas (2006), citado por Sotomayor *et al.* (2018), el efecto de la vinaza sobre el aumento del pH de suelo, a pesar de su acidez elevada, pudo deberse a la disolución de las diferentes formas de carbonatos, fosfatos de calcio y otros compuestos, provocando el incremento de aquella y también una mayor disponibilidad de nutrientes, acompañada de un mejor balance entre ellos.

En la CE las diferencias fueron significativas en los tratamientos V150x0-5 cm y V300x0-5 cm con respecto a V0x0-5 cm, sin que se evidenciaron diferencias entre los tratamientos V100x0-5 cm y el V0x0-5 cm. En la profundidad de 5-15 cm sólo se diferenció estadísticamente el V300. Si bien los incrementos en el contenido de sales fueron significativos luego de tres años de aplicación, los valores alcanzados no llegaron al valor considerado crítico para el normal crecimiento y desarrollo del cultivo de caña de azúcar (1,7 dS/m) (Sanzano y Fadda, 2009). Debe tenerse en cuenta que si las aplicaciones de vinaza son frecuentes, estos valores podrían incrementarse y alcanzar y hasta podrían superar este valor crítico, siendo perjudicial tanto para el suelo como así también para el cultivo. Como se describió, la vinaza presenta en su composición química una elevada concentración de sales, por lo que

es de esperar un incremento en la CE en la solución del suelo. En suelos Acrisoles y Fluvisoles de la zona cañera de Córdoba (Veracruz México), la aplicación de vinaza cruda en macetas aumentó más de cinco veces el valor de la CE, valor que disminuyó con el paso del tiempo pero que queda por arriba del valor inicial una vez finalizada la experiencia (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2000), por lo cual el autor consideró la aplicación de vinaza cruda como de alto riesgo de salinización. Sotomayor *et al.* (2018) trabajaron en columnas de un suelo clasificado como Haplusto, fluvacuéntico, encontrando incrementos significativos en la CE y el K⁺ con dosis crecientes de vinaza cruda en los primeros 10 cm de profundidad.

El K⁺ mostró incrementos significativos en los tratamientos V150x0-5 cm y V300x0-5 cm con respecto a V0x0-5 cm. En la profundidad de 5-15 cm, todos los niveles de vinaza aplicada mostraron diferencias significativas con respecto a V0, concentrándose los mayores valores en V300. Sotomayor *et al.* (2018) afirman que en un suelo Haplustol fluvacuéntico de Tucumán, la CE y el K⁺ aumentaron en todo el perfil del suelo analizado a medida que las dosis de vinaza empleadas fueron mayores, y que las diferencias establecidas entre los tratamientos que recibieron vinaza y el testigo fueron significativas, presentando la mayor concentración en los 10 cm superficiales. Gomez Toro (1995) encontró resultados similares en un suelo clasificado como Fluventic Ustropepts del área cañera del Valle del Río Turbio, Venezuela.

Los resultados descriptos de cada una de las variables químicas para las profundidades de 0-5 y 5-15 cm y los distintos niveles de vinaza aplicada se observan en la Tabla 2.

Con respecto al COT, si bien los valores más elevados se encontraron en la profundidad de 0-5 cm, no se evidenciaron diferencias significativas entre los distintos niveles de vinaza aplicada. Asimismo tanto V150 como V300 no mostraron cada uno de ellos diferencias entre ambas profundidades analizadas. Resultados similares se obtuvieron para la fracción pesada de la materia orgánica (FP) y la fracción particulada (FPart). La fracción intermedia (FInt) mostró diferencias significativas

con valores más elevados en el tratamiento V150x0-5 cm respecto a los demás tratamientos (Tabla 3).

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales explicó un 77% de la variabilidad total, En el eje 1 (46,8%) mostró que a mayores niveles de vinaza (V150 y V300), los indicadores químicos y la actividad enzimática total mostraron los valores más elevados en ambas profundidades analizadas. Las variables pH, K⁺ y CE se ven altamente relacionadas con el nivel V300 para ambas profundidades. Los tratamientos V0x5-15 y V100x5-15 están relacionados negativamente con todas las variables. Se observó también que a menores profundidades hay más asociación con valores altos de las fracciones de la materia orgánica, eje 2 (30,8%) (Figura 2).

Tabla 2. Indicadores de calidad químicos en los tratamientos evaluados. Las comparaciones se hicieron dentro de cada variable (fila). Letras mayúsculas empleadas para la profundidad de 0-5 cm y letras minúsculas para la profundidad de 5-15 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05). CE: dS/m, K⁺: Cmolc/kg

Indicadores Químicos	V0		V100		V150		V300	
	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15
pH	6,0A	6,2a	6,0A	6,5b	6,6B	6,6b	6,9C	7,0c
CE	1,0A	0,9a	1,0A	1,1ab	1,2B	1,2ab	1,5C	1,4b
K ⁺	2,2A	2,0a	2,2A	3,0b	3,0B	2,9b	3,5C	3,8c

Tabla 3. Carbono orgánico total y sus fracciones (%) en los ocho tratamientos, las comparaciones se hacen dentro de cada variable (fila). Medias con una letra común en cada fila no son significativamente diferentes (p > 0,05).

	V0		V100		V150		V300	
	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15
COT	2,14A	1,32D	2,04A	1,46CD	2,25A	2,16A	2,03AB	1,69BC
FP	1,65A	1,29C	1,65A	1,34BC	1,64A	1,75A	1,63AB	1,31BC
FInt	0,28BC	0,06E	0,23CD	0,17D	0,55A	0,33B	0,24C	0,24C
FPart	0,49A	0,11D	0,39AB	0,22C	0,61A	0,42A	0,40AB	0,32BC

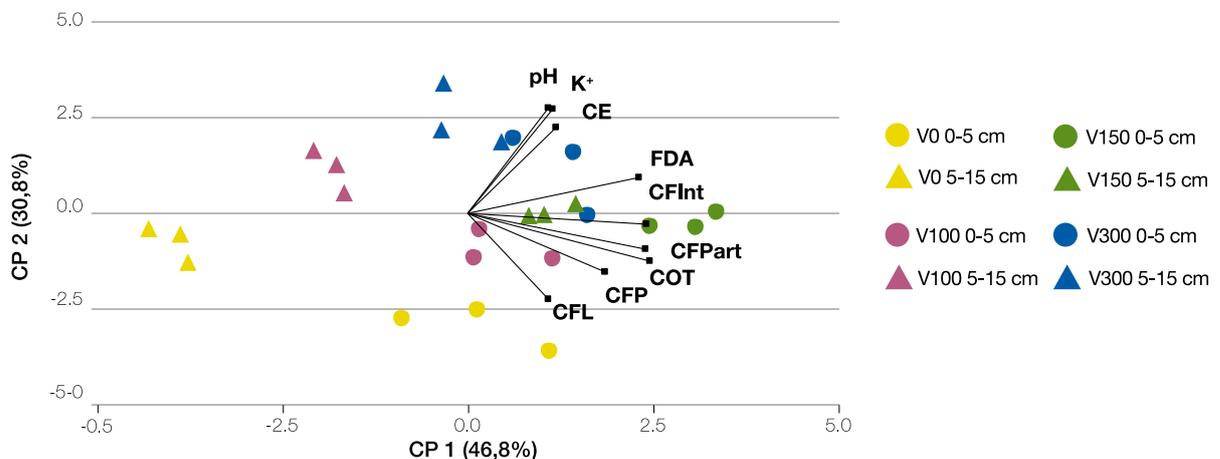


Figura 2. Análisis de componentes principales de los parámetros químicos y microbiológicos en ambas profundidades y con los diferentes niveles de vinaza.

Coeficiente de correlación de Pearson

Se presentan a través de las correlaciones de Pearson las relaciones positivas y significativas encontradas entre la FDA y los indicadores químicos del suelo analizados, tales como el COT, las fracciones de la materia orgánica, el pH y el K⁺, no así con la CE. También quedaron demostradas las correlaciones entre el COT y las fracciones de la materia orgánica (FP, Flnt, FPart), el pH con la CE y el K⁺ y entre estos dos últimos (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson y su significancia asociada para las variables químicas y la FDA. P-valores <0,05 se simboliza con *.

	FDA	FP	Flnt	FPart	COT	pH	CE	K+
FDA	1,00							
FP	0,45*	1,00						
Flnt	0,78*	0,51*	1,00					
FPart	0,59*	0,53*	0,85*	1,00				
COT	0,61*	0,83*	0,77*	0,88*	1,00			
pH	0,57*	-0,10	0,19	0,12	0,08	1,00		
CE	0,40	0,04	0,33	0,22	0,15	0,60*	1,00	
K+	0,55*	-0,07	0,21	0,13	0,07	0,89*	0,69*	1,00

La variación de aquellas variables de las cuales depende la acción de las enzimas genera cambios en la acción de las mismas, quedando demostrado en esta experiencia con las distintas correlaciones encontradas y descritas anteriormente.

CONCLUSIONES

La actividad enzimática total (FDA) del suelo resultó ser un indicador sensible a los cambios en el manejo de la vinaza para el suelo en estudio, ya que las diferencias fueron estadísticamente significativas entre los diferentes niveles del efluente aplicado y en las distintas profundidades analizadas, con una mayor FDA.

Los resultados obtenidos en la actividad enzimática total en esta experiencia marcan un precedente que permite abrir nuevos caminos a tener en cuenta en lo referido al manejo de la vinaza en la provincia de Tucumán.

Las variaciones significativas en los contenidos de sales en la solución del suelo, el pH y el K⁺ coinciden con lo investigado hasta el momento por diversos autores locales e internacionales, lo cual permite concluir que son indicadores altamente sensibles y de utilidad al momento de definir sobre el manejo de la vinaza en los distintos tipos de suelos.

Luego de tres años consecutivos de aplicaciones de distintos niveles de vinaza, los valores de los indicadores químicos CE, K⁺ y el pH incrementaron significativamente.

Se requiere el monitoreo frecuente de los indicadores seleccionados en esta experiencia, para prevenir que con posteriores aplicaciones lleguen a niveles que pudieran afectar la calidad del suelo y por consiguiente, el cultivo implantado.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adam, G. and H. Duncan. 2001.** Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry* 33 (7-8): 943-951.
- Baldiris, L.; E. López; J. Castillo y L. D. Caicedo. 2012.** Biodegradación de la vinaza de caña de azúcar con cepas de los hongos *Schizophyllum commune* y *Trichoderma viride*. *Ingenium* 6 (14): 39-46. [En línea] Disponible en https://www.researchgate.net/publication/308084348_Biodegradacion_de_la_vinaza_de_cana_de_azucar_con_cepas_de_los_hongos_Schizophyllum_commune_y_Trichoderma_viride
- Bautista Cruz, A.; J. Etchevers Barra; R. del Castillo & C. Gutiérrez. 2004.** La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2). Recuperado a partir de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>
- Bautista Zuñiga, F.; C. Durán de Bazúa y R. Lozano. 2000.** Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 16 (3): 89-10 [En Línea].
- Ceron Rincon, L. E. & L. M. Melgarejo Munoz. 2005.** Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana* 10 (1): 5-18. [En línea] Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319028576001>
- Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. InfoStat versión 2022.** Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doran, J. W. and T. B. Parkin. 1994.** Defining and assessing soil quality. In: *Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment*. Doran, J. W.; D. C. Coleman; D. C. Bezdicek and B. A. Stewart (eds). Soil Science Society of America. Special Publication 35: 3-21.
- Etchevers, J. D.; C. Hidalgo; S. Pajares; J. F. Gallardo; M. A. Vergara; M. A. Bautista y J. Padilla. 2008.** Calidad o salud del suelo: Conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México*, primera edición: 107-121.
- Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. soria. 2023.** Área cosechable y producción de caña de azúcar para la zafra 2023 en Tucumán. Reporte Agroindustrial EEAOC, Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán 278.
- Gomez Toro, J. M. 1995.** Efecto de la vinaza sobre el contenido de potasio intercambiable en un suelo. Representativo del área cañera del valle del río turbio. *Venesuelos* 3 (2): 69 - 72.
- Instituto de promoción del azúcar y alcohol de Tucumán. 2023.** Ministerio de Economía y Producción, Secretaría de Estado de Producción, Gobierno de Tucumán. [En línea]. Disponible en <https://www.ipaat.gov.ar/> (Consultado 18 enero 2024; verificado 24 de enero 2024)

- Lillo, A.; H. Ramírez; F. Reyes; N. Ojeda & M. Alvear. 2011.** Actividad biológica del suelo de bosque templado en un transecto altitudinal, Parque Nacional Conguillío (38° S), Chile. *Bosque* 32 (1): 46-56. [En línea] Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173119394006>
- Morandini, M. y E. Quaia. 2013.** Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. *Revista Avance* 34 (2): 1-12.
- Nelson, D. L y M. M. Cox. 2009.** Enzimas, estructura y catálisis. En: Lehninger. Principios de bioquímica, quinta edición, capítulo 6: 183-205.
- Perez, D.; V. Paredes y G. Rodríguez. 2011.** Biocombustibles en la Argentina y Tucumán, cifras de la industria en el período 2009-2011. Reporte Agroindustrial EEAOC, Estadísticas y márgenes de cultivos tucumanos 52.
- Rayo Estrada-Herrera; C. Hidalgo-Moreno; R. J. Guzmán-Plazola; J. Almaraz Suárez; H. Navarro-Garza y J. D. Etchevers-Barra. 2017.** Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia* 51: 813-831.
- Sanzano, G. A. y G. S. Fadda. 2009.** Características de los suelos para caña de azúcar. Recomendaciones de manejo. En: Manual del cañero EEAOC, capítulo 2, pp. 23-32.
- Serri, D.; D. Chavarría; R. Portocarrero; J. Vallejo; S. Galván y S. Vargas Gil. 2015.** Efectos de la aplicación de vinaza sobre funciones biológicas del suelo en el cultivo de caña de azúcar. 2015. Libro de resúmenes de trabajos presentados en el CONEBIOS IV (67), Esquel 2015.
- Sotomayor, C.; M. Morandini; G. A. Sanzano y H. C. Rojas Quinteros. 2018.** Efecto de la aplicación de vinaza en propiedades químicas y físicas del suelo. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 95 (1): 27-33.
- Sotomayor, C. 2022.** Manejo de la vinaza en la industria sucroalcoholera. *Revista Avance Agroindustrial* 43 (1): 42-47.
- Ulloa Larea. 2014.** Hidrólisis de fluoresceína diacetato y actividad de las enzimas proteasa, celulasa, nitrato reductasa y ureasa del suelo en bosque prístino, sur de Chile. [En línea] Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/fcu.42h/doc/fcu.42h.pdf>