

## Descomposición de vinaza en suelos del Uruguay: Impacto sobre la actividad microbiana y liberación de nutrientes

Impact of vinasse breakdown on microbial activity and nutrient release in soils of Uruguay

Decomposição da vinhaça em solos do Uruguai: Impacto na atividade microbiana e na liberação de nutrientes

Takata, Virginia<sup>1</sup> ; del Pino, Amabelia<sup>1</sup> ; Hernández, Jorge<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento de Suelos y Aguas. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Uruguay.

virginiatakata@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.35305/agro45.e049>

Recibido: Mayo 2024 Aceptado: Mayo 2025

### Resumen

Se realizó una incubación de suelo con agregado de vinaza en condiciones controladas de laboratorio (humedad y temperatura), con el fin de estudiar la descomposición de la vinaza en cinco suelos representativos del área cultivada con caña de azúcar en el Uruguay. Con este trabajo se busca promover el reciclaje de nutrientes a través de la reutilización de vinaza reduciendo el impacto ambiental en un sistema de economía circular. Se utilizaron tres dosis de vinaza, equivalentes a 125, 250 y 375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y un testigo sin vinaza, para evaluar la evolución de los parámetros químicos pH, CE (conductividad eléctrica), P y N mineral. Los muestreos de suelo se realizaron a los 14 y 180 días de iniciado el experimento. Además, se determinó la tasa de respiración microbiana midiendo la producción de CO<sub>2</sub> durante 140 días. La vinaza no produjo cambios significativos en el pH ni en el P luego de 180 días de incubación. Se observaron diferencias significativas ( $p < 0.0001$ ) entre suelos en las tasas basal de respiración, las cuales se incrementaron con la aplicación de vinaza, no mostrando diferencias entre suelos a partir del día 20. En cuanto a la mineralización de N, su tasa fue variable en los suelos del experimento y en la mayoría de los casos. En los tratamientos con vinaza se concluye que 180 días de incubación fueron insuficientes para una mineralización completa del material.

**Palabras clave:** Actividad microbiana; Mineralización; Producción de etanol; *Saccharum officinarum* L.; Caña de azúcar

### Abstract

This work seeks to promote nutrient recycling through the reuse of vinasse, reducing the environmental impact in a circular economy system. Soil samples with different doses of vinasse were incubated in the laboratory under controlled humidity and temperature conditions to study vinasse breakdown in five representative soils of the sugarcane-growing area of Uruguay. Vinasse was applied at the following rates: 0 (control treatment), 125, 250, and 375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. The evolution of pH, EC, available P, and mineral N in soil samples was measured 14 and 180 d after the start of the experiment. The microbial respiration rate was determined by measuring CO<sub>2</sub> production for 140 days. No changes in pH or P were observed after 180 days of incubation. Respiration rate was increased by vinasse addition and differed significantly ( $p < 0.0001$ ) between soils until the 20<sup>th</sup> day of the experimental period, after which no differences were observed between soils. N mineralization varied among soils in the experiment. According to our results, 180 days of incubation are insufficient for complete mineralization of vinasse.

**Key words:** Microbial activity; Mineralization; Ethanol production; *Saccharum officinarum* L. ; Sugarcane

### Resumo

Foi realizada uma incubação de amostras de solo com a adição de vinhaça em condições controladas de laboratório (umidade e temperatura), com a finalidade de estudar a decomposição da vinhaça em cinco solos representativos da área cultivada com cana-de-açúcar no Uruguai. Este trabalho procura promover a reciclagem de nutrientes através da reutilização da vinhaça, reduzindo o impacto ambiental num sistema de economia circular. Foram utilizadas três doses de vinhaça, equivalentes a 125, 250 e 375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e uma testemunha sem vinhaça, para avaliar a evolução dos parâmetros químicos pH, CE (condutividade elétrica), P disponível e N mineral. A amostragem de

solo foi realizada aos 14 e 180 dias após o início do experimento. Além disso, determinou-se a taxa de respiração microbiana, através da medição da produção de CO<sub>2</sub> durante 140 dias. A vinhaça não determinou alterações significativas no pH e no P após 180 dias de incubação. Foram observadas diferenças significativas ( $p < 0.0001$ ) nas taxas de respiração basal entre solos, que incrementaram com a aplicação de vinhaça, embora a partir do dia 20 não foram observadas diferenças entre solos. Quanto à mineralização do N, sua taxa foi variável nos solos do experimento e na maioria dos casos. Nos tratamentos com vinhaça conclui-se que 180 dias de incubação foram insuficientes para uma completa mineralização do material.

**Palavras-chave:** Atividade microbiana; Mineralização; Produção de etanol; *Saccharum officinarum* L.; Cana-de-açúcar

## Introducción

La producción mundial de caña de azúcar ocupa 27 millones de hectáreas con un rendimiento estimado en 1,91 mil millones de Mg de caña cosechada anualmente. El principal productor es Brasil, seguido por India, China, Tailandia, Pakistán y México, siendo Brasil e India los que concentran el 50% de la producción mundial ([Dotaniya et al., 2016](#))

La vinaza es un residuo líquido derivado del proceso de fermentación de la caña de azúcar para la producción de etanol ([da Silva, 2012](#)). La vinaza contiene materia orgánica (MO) y nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) ([España-Gamboa et al., 2012](#)). En Uruguay, la producción de etanol a partir de caña de azúcar genera aproximadamente 7 L de vinaza por cada L de alcohol producido, mientras que a nivel mundial se reportan entre 10 y 18 L. La capacidad productiva del ingenio azucarero de ALUR-Bella Unión (Uruguay) es de 120 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> de etanol, lo que implica que se generen grandes volúmenes de vinaza, que requieren de una adecuada gestión y disposición final. Se han propuesto diferentes alternativas para el uso de vinaza ([Christofolletti et al., 2013](#)). La más utilizada a nivel mundial es el riego o fertirrigación que requiere baja inversión inicial, la aplicación se realiza mediante camiones cisterna o tuberías con bajo costo de mantenimiento y no requiere tecnologías complejas. Otra alternativa es la concentración de la vinaza mediante la evaporación para reducir su volumen; el producto obtenido se puede utilizar como alimento para el ganado o quemarse en calderas para producir energía. La biodigestión anaeróbica es otra alternativa en donde el residuo de la biodigestión puede utilizarse como fertilizante, y el biogás para producir energía. También se pueden producir levaduras con altos costos asociados ([Sydney et al., 2021](#)).

Desde hace al menos 50 años, la vinaza ha sido utilizada como fertilizante en la producción de caña de azúcar como forma de evitar el problema ambiental y ecológico que produciría su disposición final en fuentes de agua como ríos y arroyos ([Bridhikitti et al., 2023](#); [de Chaves et al., 2019](#)). Su utilización en Uruguay consiste en la aplicación directa sobre el suelo bajo plantación de caña de azúcar en donde los nutrientes son reciclados a través del sistema suelo-planta, enriqueciendo la fertilidad natural de estos suelos agrícolas ([Grigatti, 2010](#)). Debido a las condiciones climáticas del Uruguay, la producción y el procesamiento de caña de azúcar está acotada a la zona de Bella Unión departamento de Artigas al norte de país. El uso como fertilizante durante el manejo de la caña de azúcar se fundamenta en que este cultivo presenta una alta demanda de nutrientes, debido a que es una gramínea C<sub>4</sub>, que produce gran cantidad de biomasa, con rendimientos reportados de hasta 100 Mg ha<sup>-1</sup>. La alta producción anual de esta especie agrícola provoca una elevada movilización de nutrientes desde el suelo, requiriendo grandes cantidades de macro y micronutrientes, que pueden ser aportados con la vinaza ([Bolío-López et al., 2008](#); [Bokhtiar et al., 2001](#)). En términos generales, la planta extrae en grandes proporciones N; K y en menor medida P ([Chaves, 1999](#)), siendo la extracción de K mayor que cualquier otro nutriente. En un relevamiento de 21 chacras en Uruguay bajo riego con vinaza se observó que el aporte de nutrientes provenientes de la vinaza (dosis de 27 a 251 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) varió entre 17 y 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, entre 2 y 7.5 kg ha<sup>-1</sup> de P, y entre 20 y 250 kg ha<sup>-1</sup> de K ([del](#)

[Pino et al., 2025](#)). Los rendimientos promedios de caña de azúcar en este estudio fueron de 65 Mg ha<sup>-1</sup>.

Para determinar el aporte y la disponibilidad de nutrientes, y en consecuencia las dosis a aplicar de vinaza, es necesario contemplar la cinética de la mineralización del C y N. La relación C/N brinda información sobre la capacidad de mineralización de la vinaza, e indica si los microorganismos tienen suficiente N para satisfacer sus necesidades ([Ramos y Zúñiga, 2008](#)). En términos generales, se considera que cuanto mayor es la actividad microbiana del suelo, más productivo es el mismo y una forma indirecta de cuantificar la fertilidad global, es midiendo la actividad microbiana ([Crisostomo, 1992](#)). El agregado de vinaza favorece el consumo de oxígeno por los microorganismos además de mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos promoviendo la formación de MO y mediante el aporte de nutrientes ([Ramos y Zúñiga, 2008](#); [de Barros et al., 2010](#); [Omori et al., 2016](#)). Si bien el aumento de la actividad microbiana es positivo para la fertilidad de los suelos, un rápido y desmedido crecimiento de la población biológica podría promover un efecto priming sobre la MO estabilizada del suelo ya que los microorganismos podrían utilizar la MO del suelo como fuente de energía para su crecimiento ([Mazzilli et al., 2014](#)). Asimismo, el crecimiento acelerado de los microorganismos podría reducir la disponibilidad de N por inmovilización ([Chaves, 1985](#); [Crisostomo et al., 1992](#)). Para estimar la actividad microbiana, uno de los métodos propuestos es medir la producción de CO<sub>2</sub> por parte de los microorganismos, aunque esta actividad varía en función de múltiples factores como el uso del suelo, mineralogía, cobertura vegetal, prácticas de manejo, características de la vinaza y factores ambientales entre otros ([Ramos y Zúñiga, 2008](#)).

Para predecir la disponibilidad de N en función de las dosis aplicadas, se deben tener en cuenta los múltiples componentes del sistema suelo ([Fortuna et al., 2003](#)) y las características de la vinaza ([Bengtsson et al., 2003](#)). Por lo tanto, para cada sistema productivo (tipo de suelo, dosis, etc.) se debe evaluar la contribución de la vinaza a través de su descomposición. Para ello es necesario conocer la cantidad de N liberado y la tasa de mineralización ([Cerrato et al., 2007](#)). El N mineralizado se establece a partir de la mineralización acumulada, la cual se calcula a partir del N liberado en un período de tiempo específico y expresa cuanto N fue liberado de la vinaza, al descomponerse por la acción de los microorganismos ([Barrera et al., 2012](#)).

El objetivo de este estudio fue evaluar mediante incubación en condiciones controladas el proceso de descomposición de la vinaza, a través del seguimiento de la mineralización de N y la respiración microbiana en cinco suelos representativos del área cañera del Uruguay. Se intentó establecer criterios más objetivos para definir dosis apropiadas de vinaza según las características de los suelos del país. Para conocer los efectos de dosis altas de vinaza se evaluó el impacto de dosis comerciales y excesivas de vinaza en el suelo. También se analizó la evolución de la mineralización a lo largo del tiempo y el aporte de nutrientes.

## Materiales y métodos

En condiciones controladas de humedad y temperatura en laboratorio, se realizó un experimento de incubación de suelos con el agregado de tres dosis diferentes de vinaza, equivalentes a las utilizadas agronómicamente (125; 250 y 375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), y un tratamiento testigo sin agregado de vinaza.

### Suelos

Se seleccionaron cinco suelos representativos del área de producción de caña de azúcar en el Uruguay. Los suelos utilizados en el experimento se clasifican según la clasificación internacional de Soil Taxonomy USDA ([2014](#)) como: Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Vertic Argiudoll (V11; S3 y S4), Fine, smectitic, thermic Typic Hapludert (BV3) y Fine, mixed, active, thermic Hapludalf (C3). Estos suelos son dominantes en el área de cultivo de caña de

azúcar y sobre ellos se está aplicando vinaza y fertilizaciones químicas desde hace varios años. La elección de los suelos del experimento se basó en identificar suelos dominantes de la zona y con características contrastantes entre ellos. Estos suelos pertenecen a producciones comerciales y el manejo de la fertilización está a cargo de los productores. Debido a que estos suelos forman parte de un monitoreo de largo plazo, se mantendrá en este estudio la denominación utilizada en este monitoreo ([Tabla 1](#)). Los suelos S3 y S4, presentan similares características fisicoquímicas, son suelos contiguos; el suelo S3 recibe vinaza periódicamente, mientras que el S4 es fertilizado exclusivamente con fertilizantes comerciales.

Para el experimento se tomó una muestra de suelo de los primeros 20 cm del horizonte A de cada sitio. Para la caracterización inicial de los suelos, se analizó textura por el método de la pipeta ([Kilmer y Alexander, 1949](#)). Se evaluaron parámetros químicos como P por el método Bray N°1 y determinación colorimétrica ([Bray y Kurtz, 1945](#)), carbono orgánico (CO) por oxidación con  $K_2Cr_2O_7$  en  $H_2SO_4$  ([Nelson y Sommers, 1996](#)), contenido de cationes de intercambio por extracción con acetato de amonio 1M neutro y posterior determinación por absorción atómica ( $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$ ) y espectrofotometría por emisión ( $K^+$  y  $Na^+$ ) ([Isaac y Kerber, 1971](#)), pH en agua y CE en relación 1:1 (suelo-agua) por medio de electrodos de actividad específica y N mineral extraído con una solución de KCl 2M determinándose el  $NH_4^+$  según el método de Berthelot ([Rhine et al., 1998](#)) y el  $NO_3^-$  según la reacción de Griess-Ilosvay ([Mulvaney, 1996](#)). En la [Tabla 1](#) se presentan las características físicas y químicas de los cinco suelos.

### Vinaza

La vinaza utilizada en el experimento fue suministrada por la empresa ALUR, recolectada de sus piletas de almacenamiento en el ingenio azucarero Mones Quintela (Bella Unión-Uruguay). Se trata de un material similar al utilizado en la aplicación sobre las chacras de producción de caña de azúcar. El material se conservó en heladera a 4°C hasta su análisis. El contenido de materia seca (MS) de la vinaza fue determinado por método gravimétrico (secado de muestras a 60°C hasta peso constante). El nitrógeno total (NT) se determinó por vía húmeda mediante digestión con  $H_2SO_4$  por el método Kjeldahl. El fósforo total (PT) se analizó por calcinación de la muestras, disolución con HCl y posterior análisis del extracto por colorimetría con ácido ascórbico ([Murphy y Riley, 1962](#)). El carbono orgánico (CO) por oxidación con  $K_2Cr_2O_7$  en  $H_2SO_4$  con calor externo (150°C) y posterior determinación colorimétrica ([Mebius, 1960](#)). El pH y conductividad eléctrica (CE) por medio de electrodos de actividad específica. Los cationes (Ca, Mg, K y Na) y microelementos (Fe, Mn, Cu y Zn) fueron determinados por absorción atómica y espectrofotometría de absorción atómica (Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn) y espectrometría de emisión (K y Na) ([Isaac y Kerber, 1971](#)) en el extracto en el que se determinó el contenido total de P. La información recabada en la caracterización de la vinaza fue utilizada para calcular el contenido de nutrientes aplicados en el experimento de incubación. Las dosis se definieron en base al manejo actual de la aplicación de vinaza en el cultivo de caña de azúcar en el Uruguay. En la [Tabla 2](#) se presenta la composición química de la vinaza.

### Instalación del experimento de incubación

El suelo fue tamizado a través de una malla de 1 cm para eliminar restos vegetales y otros elementos. Se mezcló 1 kg de suelo con vinaza en dosis de 0,05; 0,10 y 0,15 L  $kg^{-1}$  suelo (DB: dosis baja; DM: dosis media y DA: dosis alta), que equivalen a 125; 250 y 375  $m^3 ha^{-1}$  (cálculos realizados a partir de una profundidad de horizonte de 20 cm y una Densidad Aparente Promedio [DAP] para los suelos de la zona de 1,25  $g cm^{-3}$ ) ([del Pino, 2017](#)) y un testigo control de cada suelo sin el agregado de vinaza. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento. La incubación se realizó a 25° C y con una humedad equivalente a 90 % de capacidad de campo (vinaza más agua desionizada) que se corrigió semanalmente mediante el agregado del agua

perdida por evaporación la cual se determinó mediante diferencia de peso. La mezcla de suelo y vinaza se incubó en bandejas con tapa y pequeños orificios en la superficie para permitir el intercambio gaseoso. Para las dosis de 125; 250 y 375 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinaza, el agregado de nutrientes corresponde a: 93; 185 y 277 kg ha<sup>-1</sup> de N, 10; 20 y 30 kg ha<sup>-1</sup> de P y 170; 342 y 513 kg ha<sup>-1</sup> de K respectivamente ([Tabla 2](#)).

#### Muestreo de suelos y análisis

Se realizó un muestreo de suelos al inicio y al final del experimento (14 y 180 días). Se tomaron muestras representativas de aproximadamente 200 g de suelo húmedo, se secó a 40°C por 48 horas y se molió hasta obtener una fracción menor a 2 mm. Se analizó: pH en agua y CE (relación 1:1 suelo-agua), P Bray1 y N mineral: nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) según fue descrito anteriormente. El N mineralizado corresponde a la sumatoria de las fracciones N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a los 180 días. El porcentaje de N mineralizado agregado con la vinaza se estimó como la diferencia entre el N mineral de los tratamientos con vinaza al final de experimento menos el N mineral del testigo al final del experimento, y se relacionó con la dosis de N agregada con la vinaza ([Tabla 5](#)).

#### Respiración microbiana

Paralelamente al experimento de incubación se realizó un experimento en donde se evaluó la tasa de respiración microbiana. Para ello se tomaron 50 g de suelo de las bandejas de incubación (inicial) y se colocaron en un recipiente hermético, en donde se midió la producción de C-CO<sub>2</sub> recogido en NaOH 0,25M, cuantificando el CO<sub>2</sub> desprendido por retrotitulación con HCl 0,1M ([Anderson, 1982](#)). Para cada suelo se prepararon tres repeticiones por tratamiento y un testigo sin agregado de vinaza. Se realizaron 10 medidas de producción de CO<sub>2</sub> a los 5; 12; 20; 34; 49; 63; 79; 93; 108 y 140 días de iniciado el experimento. A partir del resultado de cada medición se calculó la tasa de respiración diaria dividiendo el total de C-CO<sub>2</sub> por el número de días entre mediciones y el total acumulado de C desprendido. También se calculó el efecto neto de producción de C-CO<sub>2</sub> mediante la sustracción del resultado del tratamiento testigo al resultado de las diferentes dosis de vinaza.

#### Diseño experimental y análisis estadístico

En ambos experimentos se evaluó el efecto de los tratamientos sobre los diferentes parámetros mediante análisis de varianza en un diseño con tres repeticiones en donde los bloques correspondieron a los suelos. Se realizaron análisis de contrastes entre el testigo y los tratamientos para (a) mineralización de N proveniente de la vinaza y se evaluó el efecto de la dosis de vinaza según modelo lineal y cuadrático (b) la respiración microbiana y se evaluó el efecto de la dosis de vinaza según un modelo lineal. En todos los casos se consideraron diferencias significativas cuando P<0,05. La herramienta informática utilizada para los análisis estadísticos fue el programa SAS ([SAS Institute, 2012](#)).



**Tabla 1:** Datos analíticos del horizonte A de los suelos utilizados en el experimento de incubación.

| Suelo                          |                                    | V11  | BV3  | S3    | S4    | C3   |
|--------------------------------|------------------------------------|------|------|-------|-------|------|
| Arena total                    | g kg <sup>-1</sup>                 | 310  | 240  | 560   | 430   | 800  |
| Limo total                     | g kg <sup>-1</sup>                 | 370  | 390  | 180   | 300   | 40   |
| Arcilla total                  | g kg <sup>-1</sup>                 | 320  | 370  | 260   | 270   | 160  |
| Clase textural                 |                                    | FAc  | FAc  | FAcAr | FAc-F | FAr  |
| Carbono orgánico               | g kg <sup>-1</sup>                 | 18   | 20   | 14    | 16    | 7    |
| pH H <sub>2</sub> O            |                                    | 4,6  | 5,6  | 4,5   | 5,0   | 4,3  |
| Ca <sup>+2</sup>               | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 11,0 | 21,0 | 12,4  | 12,1  | 4,1  |
| Mg <sup>+2</sup>               | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 3,2  | 5,3  | 2,5   | 2,0   | 1,5  |
| K <sup>+</sup>                 | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 0,59 | 0,8  | 0,32  | 0,38  | 0,23 |
| Na <sup>+</sup>                | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 0,44 | 0,64 | 0,47  | 0,39  | 0,38 |
| Acidez interc.                 | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 0,89 | 0,06 | 0,35  | 0,47  | 0,64 |
| P Bray1                        | mg kg <sup>-1</sup>                | 33,5 | 15,0 | 73,0  | 12,5  | 8,2  |
| N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg kg <sup>-1</sup>                | 24,6 | 9,0  | 107,0 | 128,5 | 11,9 |
| N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | mg kg <sup>-1</sup>                | 16,1 | 13,3 | 14,7  | 36,1  | 8,8  |
| BT                             | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 16,1 | 27,8 | 16    | 15,3  | 6,9  |
| CIC pH 7                       | cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> | 21,6 | 33,8 | 21,6  | 20,7  | 10,6 |
| SB pH 7 (%)                    | %                                  | 70,1 | 77,6 | 72,6  | 71,5  | 58,6 |

**Tabla 2:** Composición química de la vinaza utilizada en el experimento y nutrientes agregados al suelo según dosis (contenido total de C y nutrientes en base fresca).

| Composición de la vinaza |                    |       |
|--------------------------|--------------------|-------|
| MS                       | %                  | 1,15  |
| pH                       |                    | 4,6   |
| CE                       | dS m <sup>-1</sup> | 7,75  |
| C                        | kg m <sup>-3</sup> | 11,26 |
| NT                       | kg m <sup>-3</sup> | 0,74  |
| C/N                      | kg m <sup>-3</sup> | 15    |
| PT                       | kg m <sup>-3</sup> | 0,08  |
| Ca                       | kg m <sup>-3</sup> | 0,51  |
| Mg                       | kg m <sup>-3</sup> | 0,21  |
| K                        | kg m <sup>-3</sup> | 1,37  |
| Na                       | kg m <sup>-3</sup> | 0,05  |
| Fe                       | mg m <sup>-3</sup> | 11420 |
| Mn                       | mg m <sup>-3</sup> | 5129  |
| Cu                       | mg m <sup>-3</sup> | 150   |
| Zn                       | mg m <sup>-3</sup> | 414   |

DB: dosis baja; DM: dosis media y DA: dosis alta  
(corresponden a un agregado de vinaza de 0,05;  
0,10 y 0,15 L kg<sup>-1</sup> de suelo respectivamente).

## Resultados

Evolución de pH, CE, P Bray1 y N mineral en suelos con aplicación de vinaza.

La evolución de los parámetros analizados como pH, CE, P Bray1 y N mineral ( $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{N-NO}_3^-$ ) dependieron del proceso de mineralización de la vinaza. En la [Tabla 3](#) se presentan los resultados de los análisis estadísticos para estos parámetros.

**Tabla 3:** Resultado del análisis de varianza para determinar el efecto del tipo de suelo y de la aplicación de vinaza sobre el pH, la CE, P Bray1 y N mineral en los distintos muestreos.

| Parámetro            | Muestreo | CV % | Suelo   | Tratamiento Vinaza |
|----------------------|----------|------|---------|--------------------|
| pH                   | 14 días  | 3    | <0,0001 | NS                 |
|                      | 180 días | 4,8  | <0,0001 | NS                 |
| CE                   | 14 días  | 24,2 | <0,0001 | 0,0014             |
|                      | 180 días | 27,9 | <0,0001 | <0,0001            |
| P Bray1              | 14 días  | 15,4 | <0,0001 | NS                 |
|                      | 180 días | 15,8 | <0,0001 | NS                 |
| N- $\text{NO}_3^-$   | 14 días  | 17,9 | <0,0001 | NS                 |
|                      | 180 días | 18,3 | <0,0001 | 0,0001             |
| N- $\text{NH}_4^+$   | 14 días  | 12,8 | <0,0001 | <0,0001            |
|                      | 180 días | 16,9 | <0,0001 | 0,004              |
| N Mineral            | 14 días  | 12,9 | <0,0001 | NS                 |
|                      | 180 días | 16,8 | <0,0001 | 0,0003             |
| NS: No significativo |          |      |         |                    |

En el pH se observaron efectos del tipo de suelo, pero no se observaron diferencias significativas en los tratamientos con vinaza con respecto al testigo a los 14 ni a los 180 días ([Tabla 3](#)). Si bien la aplicación de distintas dosis de vinaza no produjo cambios significativos en el pH del suelo, se observó un aumento temporario del pH al inicio del experimento en los suelos que recibieron vinaza, luego se produce un descenso del pH hasta los valores iniciales.

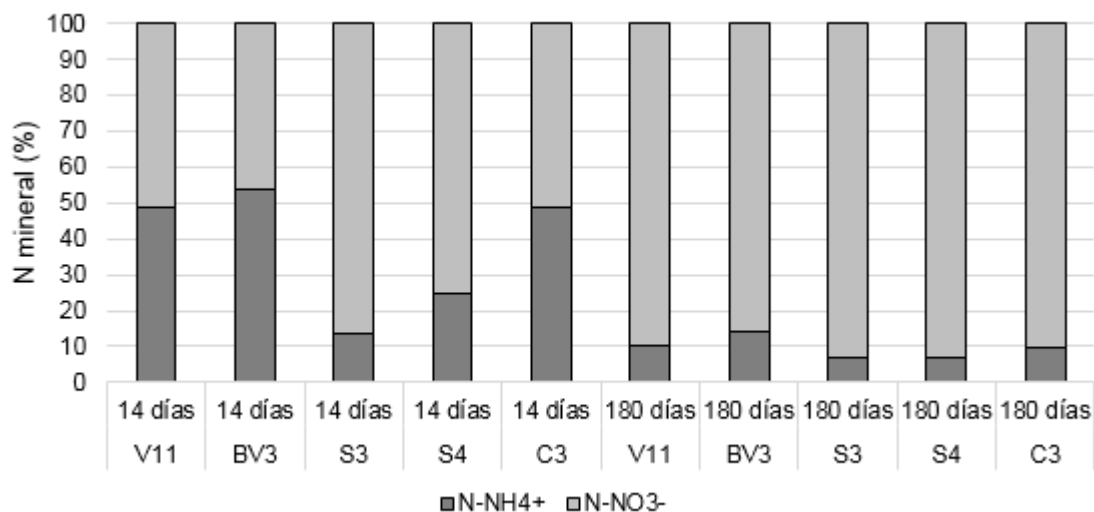
La alta CE de la vinaza implica que tiene una alta concentración de sales. Tanto a los 14 como a los 180 días de la incubación se observó un efecto significativo de la aplicación de vinaza sobre la CE con respecto al suelo testigo ([Tabla 4](#)). Se observaron diferencias significativas al contrastar el testigo con los tratamientos con vinaza y se ajustó una relación lineal ( $p < 0,0001$ ). Se observó un efecto del suelo sobre la CE en ambos muestreos ([Tabla 3](#)).

En cuanto al P Bray1 en el suelo, no hubo efecto de la aplicación de vinaza con respecto al testigo ni entre tratamientos de vinaza, en ninguno de los muestreos. Entre suelos se observaron diferencias significativas que se debieron al nivel de P inicial de cada suelo ([Tabla 3](#) y [4](#)).

**Tabla 4:** pH, CE y P Bray1 en los suelos del experimento de incubación con aplicación de vinaza (muestreo realizado a los 180 días de incubación).

| Sitio | Dosis de vinaza<br>m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> | pH H <sub>2</sub> O | CE<br>dS m <sup>-1</sup> | P Bray1<br>mg P kg <sup>-1</sup><br>suelo | N mineral<br>mg kg <sup>-1</sup><br>suelo |
|-------|--|---------------------|--------------------------|---|---|
| V11   | 0  | 4,4                 | 0,3                      | 35,8                                      | 90  |
|       | 125  | 4,6                 | 1,03                     | 40,9                                      | 111                                       |
|       | 250  | 4,6                 | 1,34                     | 40,9                                      | 102                                       |
|       | 375  | 4,8                 | 1,31                     | 39,3                                      | 138                                       |
| BV3   | 0  | 5,4                 | 0,63                     | 14,8                                      | 54  |
|       | 125  | 5,6                 | 0,98                     | 16,2                                      | 64  |
|       | 250  | 5,4                 | 0,97                     | 17,7                                      | 74  |
|       | 375  | 5,3                 | 1,03                     | 18,5                                      | 71  |
| S3    | 0  | 4,7                 | 1,36                     | 69  | 185                                       |
|       | 125  | 4,7                 | 1,26                     | 70,2                                      | 189                                       |
|       | 250  | 4,7                 | 1,66                     | 69,3                                      | 167                                       |
|       | 375  | 4,6                 | 1,71                     | 66,2                                      | 174                                       |
| S4    | 0  | 4,2                 | 1,69                     | 14,9                                      | 177                                       |
|       | 125  | 4,5                 | 1,58                     | 13,5                                      | 220                                       |
|       | 250  | 4,4                 | 1,98                     | 14,7                                      | 198                                       |
|       | 375  | 4,6                 | 1,7                      | 14,8                                      | 259                                       |
| C3    | 0  | 4,5                 | 0,21                     | 11,2                                      | 59  |
|       | 125  | 4,6                 | 0,83                     | 12,3                                      | 77  |
|       | 250  | 4,7                 | 0,85                     | 12,7                                      | 69  |
|       | 375  | 4,8                 | 1,41                     | 13,2                                      | 91  |

De acuerdo con el análisis estadístico, para N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, hubo un efecto de la dosis de vinaza incrementando los contenidos de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a los 14 y 180 días de iniciado el experimento, mientras que en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> el efecto solo se observó a los 180 días (Tabla 3). Se observó que el N aplicado con la vinaza al inicio del experimento se encontraba en gran parte en formas amoniacales, excepto en S3 y S4, pasando luego a formas nítricas a lo largo de la incubación (Figura 1).



**Figura 1:** Evolución de la proporción de la forma amoniacal y nítrica del N mineral promedio de los tratamientos con vinaza en los diferentes suelos.



En todos los suelos hubo aumentos en el contenido de N mineral entre los 14 y los 180 días del experimento tanto en el testigo como en los tratamientos con vinaza ([Tabla 5](#)). A los 180 días, en todos los tratamientos se observó que el N aportado con la vinaza fue mineralizado en un rango variable. Para los suelos V11, BV3 y C3 la variación fue de entre 13 y 57%. Para el suelo S3 se observó una baja mineralización de la vinaza siendo apenas un 13% en la DB, mientras que las DM y DA presentaron menor mineralización que el testigo, lo que supone una inmovilización de N por los microorganismos del suelo en función de su crecimiento acelerado. En cambio, en el suelo S4 la mineralización fue muy alta en comparación con los demás suelos, observándose en la DB una mineralización por encima del 100%. El suelo S3 y S4 presentaron contenidos iniciales de N mineral superiores a 100 mg kg<sup>-1</sup> (S3 122 y S4 165 mg N kg<sup>-1</sup>) y fueron los que presentaron mayores valores de mineralización acumulada en el período.

**Tabla 5:** Cambios en la disponibilidad de N mineral durante la incubación de los suelos con agregado de vinaza.

| Suelo | Dosis N<br>mg kg <sup>-1</sup><br>suelo | N mineralizado<br>en 14 días mg N<br>kg <sup>-1</sup> suelo | % CV | N min en<br>180 días mg<br>kg <sup>-1</sup> suelo | % CV | % N min<br>agregado<br>con vinaza | N<br>Remanente<br>mg kg <sup>-1</sup><br>suelo | Tasa min N<br>mg kg <sup>-1</sup><br>suelo día <sup>-1</sup> |
|-------|---|---|------|---|------|-----------------------------------|--|--|
| V11   | 0                                       | 41  | 5,5  | 90  | 6,8  | ---                               | ---  | 0,50   |
|       | 0                                       | 41  | 5,5  | 90  | 6,8  | ---                               | ---  | 0,50   |
|       | 74                                      | 44  | 4,7  | 102   | 11,8 | 17                                | 61   | 0,57   |
|       | 111                                     | 41  | 5,8  | 138   | 27,3 | 44                                | 62   | 0,77   |
| BV3   | 0                                       | 22  | 13,3 | 54  | 14,3 | ---                               | ---  | 0,30   |
|       | 37                                      | 21  | 3,6  | 64  | 10,5 | 27                                | 27   | 0,36   |
|       | 74                                      | 25  | 3,4  | 74  | 16,4 | 27                                | 54   | 0,41   |
|       | 111                                     | 32  | 18,2 | 71  | 11,4 | 15                                | 94   | 0,39   |
| S3    | 0                                       | 122   | 3,0  | 185   | 9,6  | ---                               | ---  | 1,03   |
|       | 37                                      | 128   | 10,4 | 189   | 5,9  | 13                                | 32   | 1,05   |
|       | 74                                      | 125   | 12,3 | 167   | 12,2 | -24                               | 92   | 0,93   |
|       | 111                                     | 127   | 3,9  | 174   | 4,1  | -10                               | 122  | 0,97   |
| S4    | 0                                       | 165   | 6,1  | 177   | 3,4  | ---                               | ---  | 0,98   |
|       | 37                                      | 169   | 3,8  | 220   | 15,6 | 114                               | 0  | 1,22   |
|       | 74                                      | 178   | 21,4 | 198   | 9,1  | 28                                | 53   | 1,10   |
|       | 111                                     | 165   | 5,8  | 259   | 4,4  | 74                                | 29   | 1,44   |
| C3    | 0                                       | 21  | 6,2  | 59  | 16,2 | ---                               | ---  | 0,33   |
|       | 37                                      | 27  | 9,4  | 77  | 13,5 | 49                                | 19   | 0,43   |
|       | 74                                      | 33  | 10,0 | 69  | 6,7  | 13                                | 65   | 0,38   |
|       | 111                                     | 37  | 11,5 | 91  | 7,1  | 28                                | 80   | 0,50   |

En todos los suelos y tratamientos la producción acumulada de C-CO<sub>2</sub> al final del experimento para todas las dosis de vinaza fue mayor que en el testigo (140 días). Se observó que la mineralización de C proveniente de la vinaza, estimada como la diferencia entre los tratamientos y el testigo, osciló entre 3 y 39% del C agregado. Estos resultados indican que, para todos los suelos utilizados, la mineralización del C de la vinaza en 140 días no fue completada ([Tabla 6](#)).

La producción neta de C-CO<sub>2</sub> de las dosis altas de vinaza de todos los suelos en comparación con el testigo, fue superior en el suelo S4, mientras que en los demás suelos mostraron un efecto neto menor ([Tabla 6](#)). Esto se debe a que el C mineralizado a los 140 días del testigo S4 es mucho menor al C mineralizado de los demás testigos. Sin embargo, el C mineralizado en los tratamientos DA con vinaza al final del experimento fue similar en todos los suelos. Las relaciones C/N remanentes estuvieron en un rango de entre 11 y 48 encontrándose las diferencias entre tratamientos y entre suelos.

**Tabla 6:** Cambios en la disponibilidad de C durante la incubación de los suelos con agregado de vinaza.

| Suelo | Dosis C<br>mg kg <sup>-1</sup><br>suelo | C min en<br>140 días mg<br>kg <sup>-1</sup> suelo | % C min<br>agregado<br>con vinaza | C Remanente<br>de la vinaza<br>mg kg <sup>-1</sup> suelo | Rel C/N<br>remanentes |
|-------|---|---|-----------------------------------|--|-----------------------|
| V11   | 0                                       | 371   | ---                               | ---  | ---                   |
|       | 563                                     | 459   | 16                                | 475  | 30                    |
|       | 1126                                    | 549   | 16                                | 949  | 15                    |
|       | 1689                                    | 576   | 12                                | 1484   | 24                    |
| BV3   | 0                                       | 312   | ---                               | ---  | ---                   |
|       | 563                                     | 327   | 3                                 | 548  | 20                    |
|       | 1126                                    | 462   | 13                                | 976  | 18                    |
|       | 1689                                    | 498   | 11                                | 1503   | 16                    |
| S3    | 0                                       | 230   | ---                               | ---  | ---                   |
|       | 563                                     | 298   | 12                                | 495  | 15                    |
|       | 1126                                    | 374   | 13                                | 982  | 11                    |
|       | 1689                                    | 482   | 15                                | 1437   | 12                    |
| S4    | 0                                       | 89  | ---                               | ---  | ---                   |
|       | 563                                     | 311   | 39                                | 341  | ---                   |
|       | 1126                                    | 358   | 24                                | 857  | 16                    |
|       | 1689                                    | 385   | 18                                | 1393   | 48                    |
| C3    | 0                                       | 147   | ---                               | ---  | ---                   |
|       | 563                                     | 211   | 11                                | 499  | 26                    |
|       | 1126                                    | 331   | 16                                | 942  | 15                    |
|       | 1689                                    | 414   | 16                                | 1422   | 18                    |

### Respiración microbiana y evolución del C en el suelo

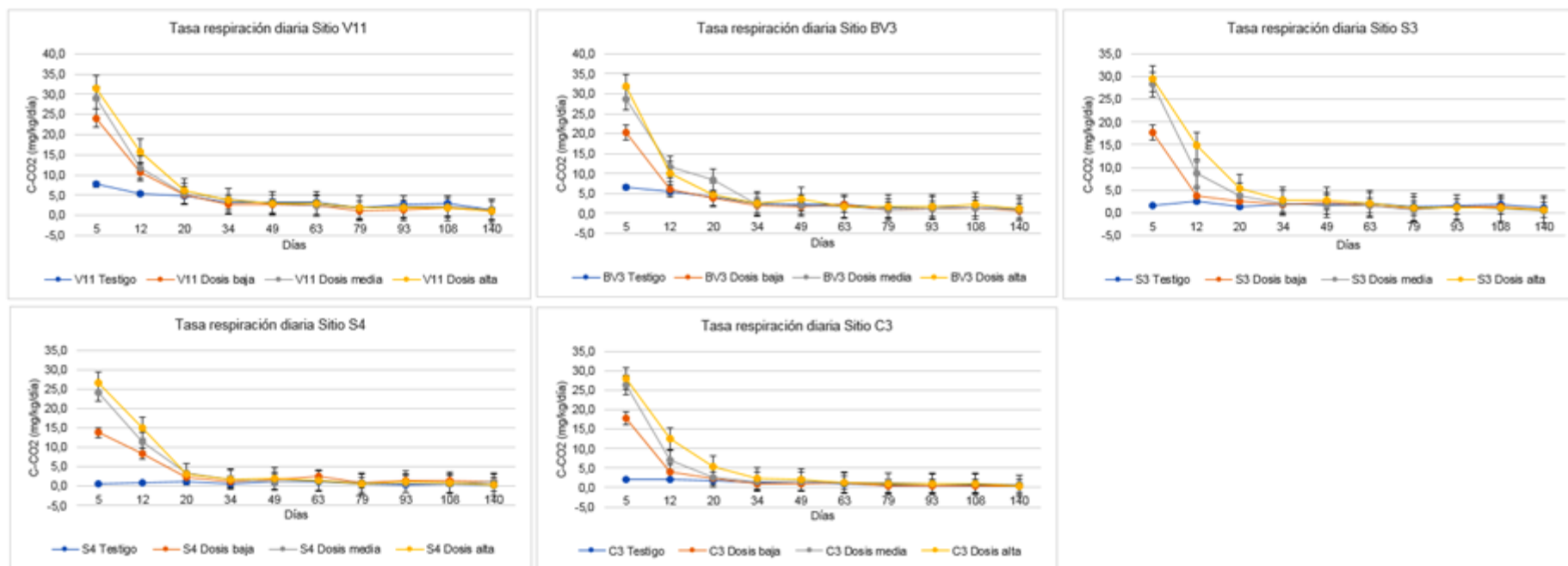
Para el caso de los tratamientos testigo de los cinco suelos, al comienzo de la incubación (5 días), las tasas de respiración mostraron un amplio rango con valores de 7,7; 6,6; 1,5; 0,5 y 2,1 mg kg<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> de C-CO<sub>2</sub>, para los suelos V11; BV3; S3; S4 y C3 respectivamente. Se observaron diferencias significativas ( $p < 0.0001$ ) entre suelos en las tasas basal de respiración de los suelos testigos, las cuales se incrementaron con la aplicación de vinaza (Tabla 7).

**Tabla 7:** Resultados del análisis de varianza para determinar el efecto del suelo y la aplicación de vinaza sobre la liberación de C-CO<sub>2</sub> en los distintos muestreos. Se evaluaron mediante contrastes el efecto de los tratamientos respecto al testigo y el modelo lineal para el efecto de la dosis.

| Día | CV (%) | Pr>F    | Suelo   | Contrastes Pr>F  |              |
|-----|--------|---------|---------|------------------|--------------|
|     |        |         |         | Testigo vs resto | Dosis lineal |
| 5   | 9,9    | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001          | <0,0001      |
| 12  | 22,2   | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001          | <0,0001      |
| 20  | 32,3   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | <0,0001      |
| 34  | 29,8   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 49  | 30,8   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 63  | 35,5   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 79  | 44,8   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 93  | 40,5   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 108 | 53,4   | <0,0001 | <0,0001 | NS               | NS           |
| 140 | 55     | NS      | NS      | NS               | NS           |

NS: No significativo

En la [Tabla 7](#) se presentan los resultados del análisis estadístico de la tasa de liberación de C-CO<sub>2</sub>. En todos los suelos, entre los días 5 y 12, la tasa de respiración microbiana de los suelos con vinaza estuvo por encima del testigo correspondiente, con un claro efecto de la dosis de vinaza para todos los suelos. Hasta el día 20, se observan diferencias significativas ( $p < 0,0001$ ) en la tasa de liberación de C-CO<sub>2</sub> de los suelos, con un efecto lineal de la dosis de vinaza. Luego del día 20, aunque continúan registrándose diferencias en la tasa de respiración de los distintos suelos, no es significativo el efecto de la aplicación de vinaza. Para todos los suelos y las dosis de vinaza, la tasa de respiración microbiana a partir de los 108 días de iniciado el experimento fue similar. La diferencia se encuentra en la fecha en la cual las tasas de respiración de cada suelo comienzan a tener la misma tendencia, lo que se ve reflejado en la [Figura 2](#). A los 140 días, la tasa de respiración no presentó diferencias entre tratamientos y suelos.



**Figura 2:** Evolución de la tasa de respiración diaria para el suelo V11 (a), BV3 (b), S3 (c), S4 (d) y C3 (e).

## Discusión

Los suelos utilizados en el experimento presentan una extensa historia agrícola, con sucesivos laboreos que han favorecido la mineralización de la materia orgánica y fertilizaciones con NPK con el fin de satisfacer la demanda de nutrientes. Adicionalmente, el cultivo de caña de azúcar es regado con vinaza complementando a las fertilizaciones químicas. La heterogeneidad reflejada en las características fisicoquímicas de los cinco tipos de suelos es propia de la zona de estudio. El cultivo de la caña de azúcar en Uruguay ocupa un área acotada de aproximadamente 11.500 hectáreas en Bella Unión (Dpto. de Artigas al norte del país). Estas plantaciones se encuentran en la periferia y rodeando el ingenio azucarero.

Los suelos, con excepción de BV3, presentan signos de acidificación (bajo pH y presencia de acidez intercambiable). En el suelo S3 se observan altos niveles de P Bray1 (73 mg kg<sup>-1</sup>), resultado de altas fertilizaciones previas. De igual manera, para los suelos S3 y S4 las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se encuentran en altos niveles, por encima de 100 mg N kg<sup>-1</sup> de suelo. Dados estos resultados es esperable que la aplicación de vinaza produzca un efecto en las propiedades del suelo de forma diferenciada según el tipo de suelo. Si bien se trata de suelos de media a alta fertilidad natural la caña de azúcar presenta una alta demanda de nutrientes debido a que es una gramínea C4, que produce gran cantidad de biomasa como se mencionó anteriormente. En un trabajo realizado en Uruguay, dependiendo del tipo de suelo, la absorción de nutrientes varió. Para K la absorción estuvo entre 203 y 310 kg ha<sup>-1</sup> valores superiores a otros cultivos agrícolas ([del Pino et al., 2022](#)).

Las pérdidas de nutrientes como N y P hacia cursos de agua pueden generar problemas ambientales como la eutrofización de agua superficial. La vinaza es aplicada con cañón en dosis comerciales de entre 80 y 150 m<sup>3</sup> equivalente a 8 y 15 mm, estos volúmenes no generarían escurrimiento superficial de vinaza si se aplica en condiciones en donde el perfil de suelo no esté saturado.

La composición química de la vinaza utilizada en el experimento coincide con los resultados de otros autores ([del Pino et al., 2017](#); [Prado et al., 2013](#); [España-Gamboa et al., 2012](#); [de Resende et al., 2006](#); [García y Rojas, 2006](#)). El pH de este material es ligeramente ácido debido a los ácidos orgánicos presentes en la misma, los cuales generalmente son rápidamente descompuestos en el suelo ([de Resende et al., 2006](#)). Aunque los suelos del experimento son ácidos y muy ácidos la utilización de vinaza no provocó cambios significativos en el pH de estos suelos, coincidiendo con los resultados de Sánchez-Lizarraga et al. ([2018](#)) y Montero-Arellano et al. ([2022](#)), que no observaron acidificación en suelos con agregado de vinaza.

Aunque el efecto de la vinaza en el pH del suelo no fue significativo, se observó un aumento temporario del pH al inicio del experimento, que pudo deberse a la oxidación de la MO del suelo en condiciones reductoras causadas por la actividad microbiana. Al descomponer a la materia orgánica disuelta se forma CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, observándose un aumento de los iones OH<sup>-</sup> ([Bautista-Zúñiga et al., 2000](#)). Luego se produce un descenso del pH hasta los valores iniciales debido a la ionización de H<sup>+</sup> de grupos carboxilos, ácidos fenólicos, alcoholes de la MO y a la nitrificación que es un proceso que acidifica el suelo ([da Silva et al., 2014](#)). De todas maneras, es necesario realizar un seguimiento de este parámetro si se utiliza vinaza por mucho tiempo, ya que es probable que los efectos acumulados tengan mayor importancia que después de una única aplicación como en este caso ([Bautista-Zúñiga et al., 2000](#); [Christofolletti et al., 2013](#)).

El aumento en la CE en el suelo al final de la incubación se explica por la acumulación de sales, ya que en las bandejas de incubación no hubo lixiviación ni absorción de iones por parte de cultivos, y por el aporte de vinaza con una alta concentración de sales. Se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con vinaza y el testigo al final del experimento ( $p < 0.0001$ ), así como entre suelos. Las diferencias observadas entre suelos se deben a la capacidad

amortiguadora de los mismos. En los suelos BV3; S3 y S4 hubo un escaso aumento de CE con respecto al testigo, mientras que en los sitios V11 y C3 presentaron aumentos de 4 y 6 veces más con el agregado de vinaza. De acuerdo con estos incrementos de CE, los sitios BV3; S3 y S4 presentan una mayor capacidad de amortiguación y por lo tanto podrían recibir mayores dosis de vinaza y con más frecuencia que los sitios V11 y C3. Si bien concentraciones altas en sales en el suelo, mayores a  $1 \text{ dS m}^{-1}$  medidas en una relación 1:1 suelo-agua son consideradas negativas para el crecimiento vegetal ([Doran, 1999](#)), en un monitoreo en condiciones de producción de caña de azúcar en Uruguay, se observó que la aplicación de vinaza no tuvo efecto sobre la CE. Este hecho se debe posiblemente a la elevada absorción de nutrientes por el cultivo de caña ([del Pino et al., 2019](#); [del Pino et al., 2022](#)), y también a la lixiviación de iones en profundidad.

Aunque el aporte de P de la vinaza es bajo en relación con otros nutrientes, los grandes volúmenes aplicados periódicamente de este material podrían elevar la concentración de P en el suelo, lo que representa una potencial fuente de contaminación de cursos de agua. La recomendación de fertilización con P propuesta por Chaves ([1999](#)) para caña de azúcar en Brasil oscila entre 25 y  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de P. Para el caso de Uruguay el aporte de P se realiza a través de la vinaza o fertilizaciones fosfatadas a la siembra de caña, en un rango de entre 20 y  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de P según análisis de suelo. El aporte de P proveniente de la vinaza según las dosis utilizadas en el experimento fue de 10; 20 y  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de P. La dosis baja de  $125 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  elevaría  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  de P en el suelo si se utiliza un equivalente de fertilizantes de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para elevar  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de P Bray1 en la capa superior del suelo. Cabe destacar que el contenido de P de la vinaza utilizada en el experimento es inferior a los valores de otras vinazas reportados en la literatura, en donde se observó un amplio rango de entre 0,06 y  $0,40 \text{ kg m}^{-3}$  ([Armengol et al., 2003](#); [Chaves, 1985](#); [de Resende et al., 2006](#); [España - Gamboa et al., 2012](#); [García y Rojas, 2006](#); [Lezcano y Mora, 2006](#)). Si bien no se detectó un efecto positivo de la vinaza sobre el P Bray1 del suelo, se observó una leve tendencia a aumentar el P con el agregado de vinaza, que no se relaciona al contenido inicial de P ni al tipo de suelo. Es necesario un monitoreo de suelo para evaluar el aporte de P en este tipo de sistemas productivos con aplicación continua de vinaza. Los niveles del P Bray1 recomendados como umbral ambiental para Uruguay según planes de uso, manejo y conservación de los suelos, exige fertilizar en base al análisis de suelo y mantener la concentración de P por debajo de  $31 \text{ mg kg}^{-1}$  de suelo (P Bray1) ([DINAMA, 2013](#)).

En los cinco suelos con vinaza se observó un aumento significativo del N mineral al final del experimento, lo que demuestra la presencia de N fácilmente disponible que, al ser aplicado al suelo, probablemente tendrá un efecto inmediato para la nutrición del cultivo. El N mineralizado en los suelos testigos se atribuye a la mineralización de la MO del suelo. Por su parte, el N mineralizado en el suelo con agregado de vinaza se relaciona además con la mineralización de la MO proveniente de la vinaza. Dados los resultados obtenidos en el suelo S4 (DB) en donde la mineralización representó más de 100% de lo agregado, se podría inferir que en este tratamiento hubo un efecto priming, en donde los microorganismos consumieron todo el N aportado con la vinaza y parte de N de la MO estabilizada del suelo, además en este suelo se observó el mayor porcentaje de mineralización de C aportado por la vinaza.

En relación al N mineralizado, se observó que el comportamiento de los suelos fue diferente. En el suelo S3 se observó una baja mineralización en el tratamiento DB mientras que en los tratamientos con dosis media y alta hubo inmovilización de N. En el suelo S4, de similares características al S3, la mineralización de la dosis más baja de vinaza fue de más de 100%. Para el suelo S3 se presume que hubo una inmovilización de N, mientras que en el suelo S4 predomina la mineralización. Los suelos V11; BV3 y C3 presentaron incrementos en el N mineral similares en el tratamiento testigo y estimaciones de mineralización de vinaza intermedias. Estos resultados pueden estar relacionados al hecho de que en el suelo S3 se ha



aplicado vinaza en condiciones de producción, mientras que el suelo S4 nunca recibió vinaza. Es probable que la adecuación de la microflora a las nuevas condiciones produjo un crecimiento acelerado de los microorganismos en S4 fomentando el consumo de la vinaza, lo que permitió la liberación del N fácilmente mineralizable en el período evaluado ([Ramos y Zúñiga, 2008](#)). El hecho de que las dosis bajas de vinaza mostraran un mayor porcentaje de N mineralizado en todos los sitios podría estar relacionado con que en estas incubaciones no hubo lixiviación, a diferencia con lo que sucede en situaciones comerciales. El efecto salino de la vinaza podría provocar una disminución en la actividad microbiana ([Kruse et al., 2004](#); [Lavelle et al., 1993](#)), lo cual puede estar afectando la mineralización. Otra posibilidad sería que con las dosis bajas de vinaza se haya llegado a la máxima capacidad de mineralización, lo cual se podría considerar como el óptimo biológico. El coeficiente de variación (CV) del N mineral a los 14 días varió entre 3,0 y 21,4% y para los 180 días varió entre 3,4 y 27,3 %, estos coeficientes son menores a los reportados por Carter y Gregorich ([2006](#)) que reportan una alta variabilidad de entre 35 y 75% en la determinación de N en suelo.

En cuanto a la respiración microbiana al inicio de la incubación en el caso de los testigos, se observó que los suelos V11 y BV3 presentaron tasas de respiración diarias mayores a los suelos S3; S4 y C3. Este comportamiento podría relacionarse a un deterioro de la calidad del suelo en el caso de los suelos S3; S4 y C3 (erosionados y con pérdidas de MO lábil), que se manifiesta en una mineralización basal menor, con menor productividad y por lo tanto menor actividad microbiana ([Crisostomo et al., 1992](#)), así como también a un bajo nivel de MO inicial.

Se observó un aumento en la tasa de respiración microbiana al inicio del experimento en todos los tratamientos, mientras que luego del día 20 no fue significativo el efecto de la aplicación de vinaza sobre la tasa de respiración de los distintos suelos. Estos resultados coinciden con lo observado en un experimento realizado en Tlaxcala, México en donde la respiración microbiana aumentó con la aplicación de vinaza al suelo, respecto al suelo sin agregado de vinaza, en el cual la respiración fue muy baja ([Crisostomo et al., 1992](#)). Por su parte Chaves ([1985](#)) reporta que, durante los primeros 30 días de aplicación de vinaza al suelo se observó una proliferación intensa de la población y actividad de los microorganismos. Posteriormente se redujo la actividad microbiana debido a la reducción en las fuentes carbonadas y N lábil del suelo.

En todos los suelos y tratamientos se observó una producción mayor de C-CO<sub>2</sub> en los tratamientos con agregado de vinaza con respecto al testigo, aunque según la estimación de mineralización del C agregado (de 3 a 44%), se evidencia que la descomposición de vinaza a los 180 días no se completó. Con relación a la producción neta de C-CO<sub>2</sub> de las dosis altas vinaza de los diferentes suelos en comparación con el testigo, S4 mostró un efecto neto mayor comparado con los demás suelos. Este hecho puede deberse al manejo del suelo, en el caso del suelo S4 nunca recibió vinaza y esto pudo haber fomentado el crecimiento y la actividad microbiana al aplicarse una fuente de C de fácil degradación en contraste con el bajo nivel de actividad microbiana en el tratamiento testigo. También pueden incidir otras características de los suelos sobre su comportamiento frente al agregado de vinaza. El suelo C3 presenta textura liviana, bajo contenido de cationes intercambiables, por lo tanto menor poder buffer que los otros suelos, bajo pH y presenta importante acidez intercambiable. Todas estas características podrían explicar las bajas tasas de actividad microbiana observadas en el testigo en este suelo. La vinaza produce un efecto catalítico sobre la oxidación química y microbiológica de la MO y la menor capacidad de los coloides para proteger física y químicamente la MO de la biodegradación microbiana hacen que la vinaza se descomponga más rápido en este tipo de suelo (Oades, 1989), alcanzando porcentajes de descomposición similares a los de los otros suelos. Por el contrario, en suelos de mejor calidad agrícola como el V11; BV3 y S3, la vinaza podría alterar químicamente a las arcillas y provocar cambios en los minerales del suelo por su acidez y poder ligante, pero no tiene efecto sobre la mineralización ([Huang et al., 2005](#)).



Las relaciones del C y N remanentes de la vinaza en el suelo, estimadas a partir del C y N que no se consumió, muestran que en las situaciones donde el N agregado con la vinaza fue mineralizado en mayor proporción, la relación C/N remanente aumentó, indicando que el sustrato es cada vez menos lábil. El hecho de que se mineralice más N que C, y las bajas tasas de respiración microbiana observadas a partir del día 20, coinciden con lo reportado por varios autores que indican que la vinaza aplicada al suelo eleva el contenido de MO a largo plazo, lo cual se evidencia por el bajo desprendimiento de C-CO<sub>2</sub> ([Fuess y Garcia, 2014](#)). Por otra parte, dado que la mineralización de la vinaza al final de experimento no fue completa, y por lo tanto el aporte de N fue menor al estimado, se debe tener en cuenta este hecho al momento de estimar el aporte de N en situaciones de producción y a la hora de planificar la fertilización nitrogenada.

## Conclusiones

La aplicación de vinaza aporta nutrientes y aumenta la actividad biológica de los suelos agrícolas, especialmente en el período inmediatamente posterior a su aplicación.

En cuanto a las propiedades químicas, a pesar de tener pH ácido, la vinaza no produjo cambios significativos en el pH de los suelos en los 180 días de incubación. Tampoco hubo efecto de la aplicación de vinaza en el P Bray1 de ninguno de los cinco suelos del estudio.

El N orgánico aplicado con la vinaza se mineralizó durante el periodo de incubación, en todos los suelos excepto en un caso en donde se observó un efecto priming. Tomando en cuenta el acumulado de N y la dosis de vinaza utilizada, se demostró que 180 días de incubación no fueron suficientes para su total mineralización, especialmente cuando se aplicaron altas dosis de vinaza.

Se observaron aumentos lineales con la dosis de vinaza en las tasas de respiración, pero esta rápida descomposición estuvo restringida al periodo inicial, y a partir del día 20 las diferencias se hacen mínimas entre los tratamientos. Sin embargo, al igual que para N, la cantidad de C respirado fue solamente una fracción del agregado con la enmienda, sugiriendo la existencia de formas recalcitrantes de C.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a ALUR por la financiación del trabajo y especialmente al Ing. Agr. Germán Panissa.

## Declaración de autoría (CRediT)

**VT:** Investigación, Análisis formal, Redacción –borrador original, Curaduría de datos, Escritura–revisión y edición. **ADP:** Adquisición de fondos, Supervisión, Redacción –borrador original, Conceptualización, Metodología, Redacción –borrador original. **JH:** Adquisición de fondos, Supervisión, Redacción –borrador original, Conceptualización, Metodología, Redacción –borrador original.

## Bibliografía

ANDERSON, J. (1982) Soil respiration. *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties, 831-871 p.

ARMENGOL, J. LORENZO, R. y FERNÁNDEZ, N. (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 (3), 67-71.

BARRERA, A. HERRERA, J. FORERO, A. SALAMANCA, C. y PINZÓN, L. (2012) Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas agrarios*, 17 (1), 32-43.

BAUTISTA-ZUÑIGA, F.; DURÁN-DE BAZÚA, C. y LOZANO, R. (2000) Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 16 (3), 89-101.

- BENGTTSSON, G. BENGTTSON, P. y MANSSON, K. (2003) Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 35 (1), 143-154.
- BOKHTIAR, S. PAUL, G. RASHID, M. Y MAFIZUR RAHMAN, A. (2001). Effect of press mud and inorganic nitrogen on soil fertility and yield of sugarcane grown in High Ganges River Floodplain soils of Bangladesh. *Indian Sugar* 51: 235-241.
- BOLIO-LÓPEZ, GI. SALGADO-GARCÍA, S. PALMA-LÓPEZ, DJ. LAGUNES-ESPINOZA, LDC. CASTELÁN-ESTRADA, M. Y ETCHEVERS-BARRA, JD. (2008). Dinámica del potasio en vertisoles y fluvisoles cultivados con caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 26: 253-263.
- BRAY, R. y KURTZ, L. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*, 59 (1), 39-46.
- BRIDHIKITTI, A. KAEWSUK, J. KARAKET, N. FRIEND, R. SALLACH, B. CHONG, J. y REDEKER, K. (2023) Balancing Agriculture and Industry through Waste Utilization for Sugarcane Sustainability. *Sustainability*, 15 (20), 14711.
- CARTER, M y GREGORICH, E. (2003). Soil sampling and methods of analysis. *Canadian Society of Soil Science*.
- CERRATO, M. LEBLANC, H. y KAMEKO, C. (2007). Potencial de mineralización de nitrógeno de Bokashi, compost y lombricompost producidos en la Universidad Earth. *Tierra Tropical*, 3 (2), 183-197.
- CHAVES, M. (1985) Las vinazas en la fertilización de la caña de azúcar. *El Agricultor Costarricense*, 43: 59-61.
- CHAVES, M. (1999) El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. *Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar*, Grecia (Costa Rica), (No. F04/6828).
- CHRISTOFOLETTI, C. ESCHER, J. CORREIA, J y FONTANETTI, C. (2013) Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33 (12), 2752-2761.
- CRISOSTOMO, S. FERRERA, R. y ZEBROWSKI, C. (1992) Respiración microbiana como un indicador de la fertilidad de los suelos agrícolas y tepetates en el estado de Tlaxcala. *Terra*, 10: 425-9.
- DA SILVA, A. ROSSETTO, R. BONNECINE, J. PIEMONTE M. y MURAOKA, T. (2012) Net and Potential Nitrogen Mineralization in Soil with Sugarcane Vinasse. *Sugar Tech*, 15 (2), 159-64.
- DA SILVA, A. ROSSETTO, R. BONNECINE, J. PIEMONTE M. y MURAOKA, T. (2014) Nitrogen Mineralization from Sugarcane Vinasse. *Journal of Plant Nutrition*, 37 (8), 1227-1236.
- DE BARROS, R. VIEGAS, P. DA SILVA, T. DE SOUZA, R. BARBOSA, L. VIEGAS, R. (2010) Alteracoes em atributos quimicos de solo cultivado com cana-de-acucar e adicao de vinhaca. *Pesq. Agropec. Trop.* 40, 341-346.
- DE CHAVES, M. SILVA, G. ROSSETTO, R. EDWARDS, R. TSAI, S. y NAVARRETE, A. (2019) Acidobacteria subgroups and their metabolic potential for carbon degradation in sugarcane soil amended with vinasse and nitrogen fertilizers. *Frontiers in microbiology*, 10, 1680.
- DE RESENDE, A. SANTOS, A. XAVIER, R. COELHO, C. GONDIM, A. OLIVEIRA, O. y URQUIAGA, S. (2006). Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30 (6), 937-941.
- DEL PINO, A. CASANOVA, O. HERNÁNDEZ, J. TAKATA, V. y PANISSA, G. (2017). Efecto de la aplicación de vinaza en suelos bajo cultivo de caña de azúcar. *Ciencias Agronómicas*, 30, 30-36.

DEL PINO, A. HERNÁNDEZ, J. CASANOVA, O. TAKATA, V. y CEJAS, V. y PANISSA, G. (2019). Efecto de la vinaza sobre las propiedades del suelo y la nutrición del cultivo de caña de azúcar (Póster). Congreso Latinoamericano de Ciencias del Suelo, Montevideo, Uruguay.

DEL PINO, A. CASANOVA, O. HERNÁNDEZ, J. TAKATA, V. y PANISSA, G. (2022). Vinasse for sugarcane crop nutrition: accumulation and efficiency in the use of nutrients. *Australian Journal of Crop Science*, 16(9), 1107-ii.

DEL PINO, A. HERNÁNDEZ, J. CASANOVA, O. TAKATA, V. y PANISSA, G. (2025). Sugarcane production and nutrient accumulation in commercial plantations under vinasse irrigation. *Agrociencia Uruguay*, 29:e1468.

DINAMA (2013). Plan de Acción para la protección del agua en la cuenca del Santa Lucía.

DORAN, D. (1999). Guía para la evaluación de calidad y salud del suelo. *EUA: USDA*.

DOTANIYA, ML. DATTA, SC. BISWAS, DR. DOTANIYA, CK. MEENA, BL, RAJENDIRAN, S. REGAR, KL. Y LATA, M. (2016). Use of sugarcane industrial by-products for improving sugarcane productivity and soil health. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 5: 185-194.

ESPAÑA-GAMBOA, E. MIJANGOS-CORTES, J. HERNÁNDEZ-ZARATE, G. MALDONADO, J. y ALZATE-GAVIRIA, L. (2012) Methane production by treating vinasess from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnol Biofuels*, 5 (1), 82.

FORTUNA, A. HARWOOD, R. KIZILKAYA, K. y PAUL, E. (2003) Optimizing nutrient availability and potential carbon sequestration in an agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 35 (8), 1005-1013.

FUESS, L. y GARCÍA, M. (2014) Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. *Journal of environmental management*, 145: 210-229.

GARCÍA, A. y ROJAS, C. (2006) Posibilidades de uso de la vinaza en la agricultura de acuerdo con su modo de acción en los suelos. *Nota Técnica Técnicaña*, 10 (17), 3-13.

GRIGATTI, M. BARBANTI, L. y CIAVATTA, C. (2010) Soil respiration and nitrogen mineralization kinetics of compost and vinasse fertilized soil in an aerobic liquid-based incubation. *Environmental Engineering Science*, 27 (1), 65-73.

HUANG, P. WANG, M. y CHIU, C. (2005) Soil mineral–organic matter–microbe interactions: impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiologia*, 49 (6), 609-635.

ISAAC, R. y KERBER, J. (1971) Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. *Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue*, 17-37.

KILMER, V. y ALEXANDER, L. (1949) Methods of making mechanical analyses of soils. *Soil science*, 68 (1), 15-24.

KRUSE, J. KISSEL, D. y CABRERA, M. (2004) Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69 (3), 247-256.

LAVELLE, P. BLANCHART, E. MARTIN, A. MARTIN, S. y SPAIN, A. (1993) A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica*, 130-150.

LEZCANO, P. y MORA, P. (2006) Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo. *Instituto de Ciencia Animal, Editorial Científico Técnica*, 15, 02-17.

MARSTORP, H. (1996) Influence of soluble carbohydrates, free amino acids, and protein content on the decomposition of *Lolium multiflorum* shoots. *Biology and Fertility of Soils*, 21 (4), 257-263.

MAZZILLI, S. KEMANIAN, A. ERNST, O JACKSON, R. y PIÑEIRO, G. (2014) Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 75: 273-281.

MEBIUS, L. (1960) A rapid method for the determination of organic carbon in soil. *Analytica chimica acta*, 22: 120-124.

MONTERO-ARELLANO, Y. HERNÁNDEZ-ZÁRATE, G. COLLADO, C. ZAMORA-CASTRO, J. LÓPEZ-ALONSO, A. y ADAME-GARCÍA, J. (2022) Physical and chemical properties of soils irrigated with vinasses for the cultivation of sugarcane (*Saccharum* spp.) in the central region of Veracruz, Mexico. *Agro Productividad*, 15 (10), 11-18.

MULVANEY, R. (1996) Nitrogen-inorganic forms. *Methods of soil analysis. Part, 3*, 1123-1184 p.

MURPHY, J. y RILEY, J. (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27: 31-36.

NELSON, D. y SOMMERS, L. (1996) Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: Sparks DL et al. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. ASA and SSSA, Madison WI. p. 961-1010.

OADES, J. (1989) An introduction to organic matter in mineral soils. *Minerals in soil environments*, 89-159.

OMORI, W. CAMARGO, A. GOULART, K. LEMOS, E. y SOUZA, J. (2016) Influence of vinasse application in the structure and composition of the bacterial community of the soil under sugarcane cultivation. *International Journal of Microbiology*. Vol. 2016.

PRADO, R. CAIONE, G. y CAMPOS, C. (2013) Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. *Applied and Environmental Soil Science*, 1-8.

RAMOS, E. y ZÚÑIGA, D. (2008) Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada*, 7 (1-2), 123-30.

RHINE, E. MULVANEY, R. PRATT, E. y SIMS, G. (1998) Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. *Soil Science Society of America Journal*, 62 (2), 473-480.

SANCHEZ-LIZARRAGA, A. ARENAS-MONTAÑO, V. MARINO-MARMOLEJO, E. DENDOOVEN, L. VELAZQUEZ-FERNANDEZ, J. DAVILA-VAZQUEZ, G. y CONTRERAS-RAMOS, S. (2018) Vinasse irrigation: effects on soil fertility and arbuscular mycorrhizal fungi population. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 3256-3270.

SAS Institute. (2012) *SAS/STAT 12.1 User's Guide: Survey Data Analysis*: SAS Institute Incorporated.

SYDNEY, E. DE CARVALHO, J. LETTI, L. MAGALHAES, A. KARP, S. MARTÍNEZ-BURGOS, W. Y SOCCOL, C. (2021). Current developments and challenges of green technologies for the valorization of liquid, solid, and gaseous wastes from sugarcane ethanol production. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124059.

USDA. (2014). Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff.

---

TAKATA, V.; DEL PINO, A.; HERNÁNDEZ, J. Descomposición de vinaza en suelos del Uruguay: Impacto sobre la actividad microbiana y liberación de nutrientes. *Ciencias Agronómicas*, (45), e049.

<https://doi.org/10.35305/agro45.e049>

Copyright (c) 2024 V.Takata, A.del Pino, J.Hernández



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

---