

MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ÁCIDOS CON LA APLICACIÓN DE VINAZA

Amelioration of physical and chemical properties of acidic soils with vinasse application

Alexander CALERO HURTADO^{1,2*}, Edilaine Istéfani FRANKLIN TRASPADINI¹,
Francisco Bruno FERREIRA DE SOUSA¹, Vinicius MARCHIORO¹,
Lorena Solar SILVA OLIVEIRA², Laura CARVALHO SANTOS¹,
Dilier OLIVERA VICIEDO³, Kolima PEÑA CALZADA^{1,2} y Jáiro Osvaldo CAZETTA¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, via de acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, Jaboticabal, C.P. 14884900, São Paulo, Brasil.

² Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez”, Comandante Fajardo s/n, Olivos II, Sancti Spiritus, C.P. 60100, Sancti Spiritus, Cuba.

³ Instituto de Ciencias Agroalimentarias, Animales y Ambientales, Universidad de O’Higgins, km 3 Ruta 90, San Fernando, Chile.

*Autor para correspondencia: alexcalero34@gmail.com

(Recibido: septiembre de 2021; aceptado: octubre de 2022)

Palabras clave: acidez activa, cationes bases, capacidad de intercambio catiónico, acidez intercambiable, residuo.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue investigar las alteraciones físicas y químicas de los suelos ácidos asociadas a la aplicación de vinaza en condiciones de laboratorio. Los efectos beneficiosos de cinco dosis de vinaza (sin vinaza [0, solamente agua], 50, 100, 150 y 200 m³/ha), fueron estudiadas en el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de tres suelos ácidos: Oxisol (SO), Ultisol (SU) y Argisol (SA), después de 30 días de incubación. Las muestras de suelos fueron recolectadas en la capa de 0-20 cm de profundidad para la determinación de propiedades físicas y químicas como pH (CaCl₂), acidez total (AT), acidez intercambiable (Al³⁺), cationes bases (K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺), suma de bases (SB), capacidad de intercambio catiónico (CIC), índice de saturación de las bases (V%), y saturación de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y aluminio (Al). Los resultados indicaron que la aplicación de vinaza mejoró las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados, porque se incrementaron tanto el pH como los cationes bases, la SB, la CIC, el V% y la saturación de K, Ca y Mg, y disminuyeron la AT, Al³⁺ y saturación de Al. Además, los efectos más importantes en el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de los suelos ácidos se observaron en la dosis de 200 m³/ha de vinaza. Los hallazgos de este estudio sugieren que la vinaza podría ser una estrategia efectiva de bajo costo como fuente alternativa para balancear la acidez del suelo y constituiría una opción apropiada para disminuir la contaminación ambiental.

Key words: active acidity, base cations, cation exchangeable capacity, interchangeable acidity, waste.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the acidic soil physical and chemical alteration associated to vinasse application under laboratory conditions. The experiment

was distributed in a factorial scheme (5×3), in a completely randomized design, with four replicates. The beneficial effects of five vinasse doses (without vinasse [0, only water], 50, 100, 150, and 200 m³/ha) in enhancing the physical and chemical properties of three acidic soils: Oxisol (SO), Ultisol (SU), and Argisol (SA) were studied after 30 days of incubation. Soil samples were collected in the 0-20 cm depth layer to determine physical and chemical properties such as pH (CaCl₂), total acidity (AT), exchangeable acidity (Al³⁺), base cations (K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺), sums of bases (SB), cations exchange capacity (CIC), base saturation index (V%), and saturation of potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), and aluminum (Al). Results indicated that vinasse application enhanced the physical and chemical properties of the studied soils, since pH, base cations, SB, CIC, V%, and saturation of K, Ca, and Mg were increased, while AT, Al³⁺, and Al saturation were decreased. The most important effects in the improvement of physical and chemical properties of acidic soils were observed with a dose of 200 m³/ha of vinasse. The findings of this study suggest that vinasse could be a low-cost effective strategy as an alternative source for balancing soil acidity and would be an appropriate option for minimizing environmental pollution.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar se ha expandido en Brasil durante los últimos años, incluidas las zonas con predominio de los suelos ácidos (Camara y Caldarelli 2016, Sousa-Junior et al. 2022). Los suelos ácidos, como los Oxisoles (SO) y Ultisoles (SU), presentan pH por debajo de 5.5, están ampliamente distribuidos en el mundo y constituyen alrededor del 30 % del área total del planeta y el 50 % de la tierra cultivable, además de proporcionar entre el 25 y el 80 % de la producción vegetal (Bojórquez-Quintal et al. 2017).

Por otra parte, los Argisoles (SA) conforman el 27 % de los suelos brasileños, constituyendo el segundo tipo de suelo más grande detrás de los SO. Estos suelos son muy susceptibles a la erosión cuando el gradiente textural es acentuado (textura arenosa/media), especialmente cuando hay presencia de gravas y en relieves con fuertes pendientes (Embrapa 2013). Presentan un pH ácido similar a los SO y SU, lo cual se debe principalmente a su composición: arcillas del tipo 1:1 caolinita y óxidos de hierro y aluminio (Santos et al. 2018, Luna et al. 2022). En estos suelos ácidos la deficiencia de nutrientes como el fósforo (P) y la toxicidad por metales como el manganeso (Mn), el hierro (Fe) y el aluminio (Al) son los factores principales que limitan el crecimiento y la productividad de las plantas (Bose et al. 2015, Nobile et al. 2021).

Estudios recientes han demostrado que algunas alternativas aumentan el pH del suelo y previenen el desequilibrio de nutrientes en los suelos ácidos (Bojórquez-Quintal et al. 2017, Nobile et al. 2021). Entre estas alternativas se encuentra la vinaza de caña de azúcar, un residuo líquido que se produce en grandes cantidades y es el subproducto más importante de

la industria del etanol (Caillet y Adelard 2021). Se generan alrededor de 13 a 15 litros de vinaza por cada litro de etanol elaborado (Sarker-Chandra et al. 2016). Sin embargo, grandes cantidades de vinaza son vertidas a ríos y lagos, contaminando las aguas y el medio ambiente, y disminuyendo la diversidad de especies. No obstante, una posible vía para disminuir esta contaminación es aplicándolo al suelo y generar un bioproducto para uso agrícola (Almeida et al. 2017).

La aplicación de vinaza al suelo puede generar efectos benéficos como cambios en la consistencia, aireación, temperatura y permeabilidad de los suelos; además, puede reducir la plasticidad y la cohesión de las partículas, que contienen alrededor de 2 a 6 % de los constituyentes sólidos de la materia orgánica (MO), y favorecer las operaciones agrícolas (Carvalho et al. 2014). Sin embargo, la vinaza aplicada al suelo promueve cambios en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, como la disponibilidad de nutrientes, principalmente K, destacándose su aporte beneficioso a las propiedades de los suelos (Prado et al. 2013, Ribeiro et al. 2013, Vilar et al. 2018).

Las interacciones entre la vinaza y el Al generalmente han recibido poca atención, con escasos estudios realizados en suelos ácidos. Hasta donde sabemos, éste es el primer estudio en el que se usa vinaza para mejorar las propiedades químicas de suelos ácidos. Por lo tanto, las hipótesis de este estudio fueron: 1) la vinaza constituye una fuente alternativa y económica para balancear la acidez de los suelos y 2) las dosis crecientes de vinaza pueden mejorar aún más las propiedades físicas y químicas de los suelos ácidos. Consecuentemente, el objetivo de estudio fue

investigar las alteraciones físicas y químicas de los suelos ácidos asociadas a la aplicación de vinaza en condiciones de laboratorio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Condiciones del estudio

Los experimentos se realizaron de agosto a octubre de 2019 en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Veterinarias (FCAV), Campus de Jaboticabal, de la Universidad de Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), São Paulo, Brasil.

Los suelos utilizados se clasifican como: (1) ferralítico rojo arcilloso (SO), (2) ferralítico rojo de textura media (SU) y (3) rojizo-amarillento arenoso (SA), de acuerdo con los criterios de la FAO (IUSS-WRB 2022) y el Sistema de Clasificación de los Suelos de Brasil (Embrapa 2013). Los suelos SO y SA se recolectaron en las ciudades de Jaboticabal y São Carlos, respectivamente, en São Paulo, Brasil, en tanto que el SU se extrajo en Frutal, Minas de Gerais, Brasil. Estas áreas presentan clima tropical con verano seco, de acuerdo con la clasificación de Köppen. La precipitación media mensual es de alrededor de 1200 mm y la temperatura media mensual es de 29 °C. Todos los suelos provinieron de aéreas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar en época lluviosa (julio).

Se recolectaron aproximadamente 50 kg de cada suelo en la capa de 0 a 20 cm entre las 8:00 y 10:00 LT a temperatura ambiente (~24 °C). Inmediatamente se colocaron en bolsas de plástico selladas (Raij et al. 1997) y posteriormente se transportaron al laboratorio, donde las muestras se esparcieron sobre láminas de plástico en capas de ~1 cm de espesor y se hicieron girar regularmente para obtener un secado más rápido e interrumpir la actividad microbiana. Después del secado, las muestras se desfragmentaron y tamizaron

(4 mm), y se almacenaron en refrigeración (4 °C) hasta la realización de los análisis físicos y químicos (**Cuadro I**).

Diseño experimental y tratamientos

Las macetas se distribuyeron en esquema factorial (5 × 3) en bloques completamente aleatorizados, con cuatro repeticiones, para formar 15 tratamientos y 60 macetas de plástico de 0.30 dm³ con una muestra de suelo de 0.25 dm³. Los efectos beneficiosos de la vinaza se evaluaron en cinco dosis: sin vinaza (0, solamente agua), 50, 100, 150 y 200 m³/ha, aplicadas a tres suelos ácidos (SO, SU y SA). Los experimentos se incubaron durante 30 días en el laboratorio a temperatura controlada de 25 a 28 °C. La humedad de las muestras se ajustó diariamente al 70 % de la capacidad de retención de agua del suelo mediante la adición de agua desmineralizada y las dosis de vinaza después de pesar la primera muestra.

El fósforo y el potasio fueron equilibrados y aplicados a todos los tratamientos, de acuerdo con los resultados del análisis químico de los suelos (**Cuadro I**), siguiendo las recomendaciones de Raij et al. (2001). El experimento se realizó por duplicado. Como ambas tandas mostraron resultados similares se presentaron los efectos del segundo ensayo.

Composición de la vinaza

La vinaza de caña de azúcar utilizada en este estudio fue proporcionada por un productor de azúcar y alcohol (São Martinho, Pradópolis, São Paulo, Brasil), extraída de la salida de un reactor de tratamiento de destilería (época lluviosa, julio de 2019). El producto se había concentrado al 18 % de materia seca (MS) y se almacenó a 4 °C hasta su aplicación. Los principales parámetros que definen la composición química de la vinaza de la caña de azúcar se proporcionan en el **cuadro II**.

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS ÁCIDOS ESTUDIADOS EN BRASIL (SÃO PAULO Y MINA GERAIS).

TS	MO	pH CaCl ₂	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	AT	Al ³⁺	SB	CIC	V
	g/dm ³	—	mg/dm ³	mmol/dm ³							%
SO	28.0 ± 0.6	3.9 ± 0.1	10.0 ± 0.9	0.9 ± 0.1	8.0 ± 0.3	2.0 ± 0.2	72.0 ± 1.8	13.0 ± 0.5	11.0 ± 0.7	83.0 ± 2.1	13.0 ± 0.8
SU	17.0 ± 0.3	4.0 ± 0.1	2.0 ± 0.1	0.6 ± 0.1	2.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	47.0 ± 1.4	11.0 ± 0.6	4.0 ± 0.1	51.0 ± 1.3	7.0 ± 0.5
SA	28.0 ± 0.5	4.6 ± 0.2	8.0 ± 0.5	2.0 ± 0.1	16.0 ± 0.7	9.0 ± 0.1	36.0 ± 1.1	11.0 ± 0.4	27.0 ± 1.1	63.0 ± 1.7	43.0 ± 1.1

TS: tipos de suelos; MO: materia orgánica; P: contenido de fósforo; K⁺: contenido de potasio; Ca²⁺: contenido de calcio; Mg²⁺: contenido de magnesio; AT: acidez total; Al³⁺: acidez intercambiable; SB: suma de bases; CIC: capacidad de intercambio catiónico y V: índice de saturación de bases.

Valores representados por la media de tres muestras (n = 3) ± la desviación estándar (DE).

CUADRO II. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA VINAZA RESIDUAL.

pH	MS	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
–	g/L					mg/L				
4.9 ± 0.1	180 ± 1.3	70.4 ± 0.6	24 ± 0.1	2,850.0 ± 3.1	473.0 ± 1.5	260.0 ± 1.1	13.0 ± 0.3	2.3 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.25 ± 0.1

MS: materia seca; N: nitrógeno total; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; Fe: hierro; Mn: manganeso; Zn: zinc y Cu: cobre. Valores representados por la media de tres muestras ($n = 3$) ± DE.

Determinación de las propiedades de los suelos después de la aplicación de vinaza

Después de 30 días de incubación, las muestras se esparcieron en una bandeja de plástico y se secaron al aire a la sombra (temperatura ambiente, 26 °C). Después de secadas, se pasaron por un tamiz de 2 mm y se homogeneizaron para la realización de los siguientes análisis: pH en CaCl₂, acidez total (AT), cationes básicos (K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺) y acidez intercambiable (Al³⁺), de acuerdo con los métodos propuestos por Raij et al. (2001). Con base en los resultados de los parámetros anteriores se calculó la suma de bases (SB) (SB = K + Ca + Mg); la capacidad de intercambio catiónico (CIC) efectiva [CIC = SB + (Al³⁺)]; el índice de saturación de las bases (V%) (V% = SB x 100 / CIC), y la saturación de K (K%), Ca (Ca%), Mg (Mg%) y Al (Al%). Todos los análisis se realizaron por triplicado y se mostraron los valores medios.

Análisis estadísticos

Los datos presentados en este estudio fueron sometidos a un análisis multifactorial (ANOVA bidireccional) para comprobar los efectos de las dosis de vinaza (DV) en los tres suelos ácidos (TS) y sus interacciones (DV × TS). Se determinó la distribución de normalidad de todos los datos de las diferentes variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de la varianza mediante la prueba de Fisher (F, $p < 0.05$). Cuando los valores de F fueron significativos ($p < 0.05$), los datos se sometieron a un análisis de regresión polinomial y para su interpretación se seleccionó la ecuación con mayor significancia ($p < 0.05$) y el coeficiente de determinación (R²) más alto. Las medias se compararon mediante la prueba HSD de Tukey ($p < 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico GraphPad Prism v8.0 (GraphPad, San Diego, CA, USA).

RESULTADOS

Influencia de la vinaza en las propiedades físicas y químicas de los suelos ácidos

El análisis de regresión polinomial reveló una interacción significativa ($p < 0.0007$) entre las DV y los TS en el pH del suelo, la AT, los cationes intercambiables, la SB y la CIC (**Fig. 1a-h**). El pH del suelo aumentó significativamente ($p < 0.0021$) de forma lineal en los tres suelos con el aumento de las dosis de vinaza (**Fig. 1a**). El pH en el suelo SA fue significativamente ($p < 0.0001$) superior comparado con los suelos SO y SU. De manera similar, la mayor dosis de vinaza (200 m³/ha) incrementó el pH en ~10, 13 y 22 % en el SO, SU y SA, respectivamente, en comparación con la ausencia de aplicación de vinaza, y mostró diferencias significativas ($p < 0.0001$) en comparación con las otras dosis de vinaza evaluadas (50, 100 y 150 m³/ha) (**Fig. 1a**).

La AT disminuyó linealmente en los tres suelos ácidos con el incremento de las dosis de vinaza (**Fig. 1b**). El suelo SO mostró mayores AT en comparación con los suelos SU y SA ($p < 0.0002$); sin embargo, la dosis de 200 m³/ha disminuyó la AT en 24, 14 y 20 % en los suelos SO, SU y AS, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin vinaza, y exhibió diferencias significativas ($p < 0.0003$) frente a las otras dosis de vinaza evaluadas (50, 100 y 150 m³/ha) (**Fig. 1b**).

El incremento de las dosis de vinaza disminuyó linealmente la Al³⁺ en los suelos SO y SA ($p < 0.0001$), pero no mostró efectos significativos ($p = 0.061$) en el suelo SU (**Fig. 1c**). La Al³⁺ disminuyó significativamente ($p < 0.001$) con la máxima dosis de vinaza (200 m³/ha) en los suelos SO y SA (68 y 41 %, respectivamente), en comparación con el tratamiento sin vinaza, y mostró diferencias significativas con relación a las demás dosis de vinaza aplicadas (**Fig. 1c**).

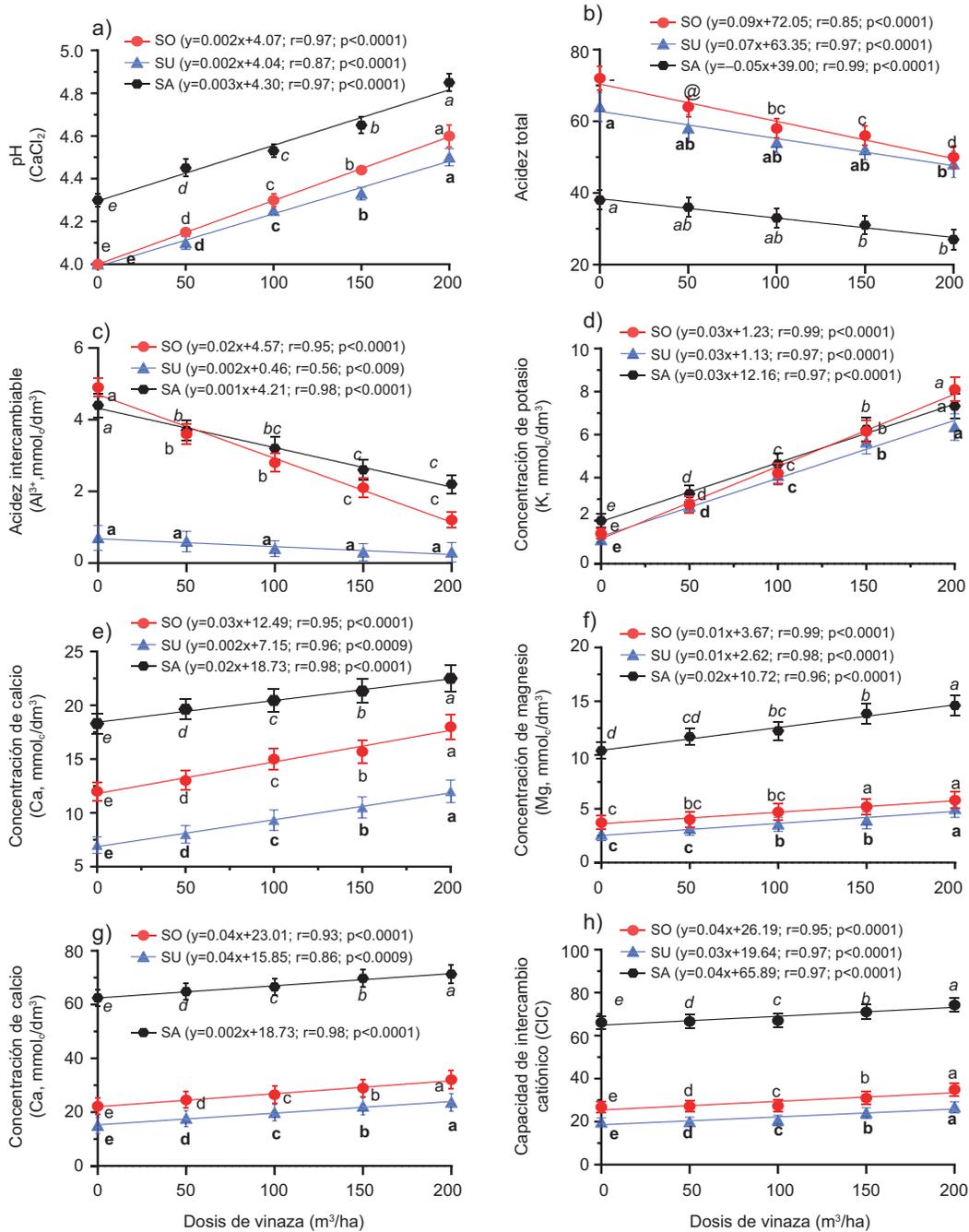


Fig. 1. (a) variaciones en los valores de pH (CaCl₂), (b) acidez total, (c) concentración de potasio, (d) concentración de calcio, (e) concentración de magnesio, (f) concentración de aluminio intercambiable, (g) suma de bases y (h) capacidad de intercambio catiónico en los tres suelos (SO, SU y SA) en función de diferentes dosis de vinaza aplicadas, después de 30 días de incubación. Valores representados por la media de cuatro réplicas ($n = 4$) \pm DE. Letras minúsculas redondas (p. ej., a, b, c), cursivas (p. ej., a, b, c) y negritas (p. ej., **a**, **b**, **c**) indican diferencias significativas entre las dosis de vinaza en los suelos SO, SU y SA, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Las [K], [Ca] y [Mg] aumentaron significativamente ($p < 0.001$) de forma lineal en los tres suelos (SO, SU y SA) con el incremento de las dosis de vinaza (**Fig. 1d-f**). La [K] fue significativamente ($p < 0.0001$) superior en el suelo SO comparado con los suelos SU y SA; no obstante, estos últimos exhibieron mayores [Ca] y [Mg] en comparación con el suelo SO. Las [K], [Ca] y [Mg] fueron significativamente superiores en la dosis de 200 m³/ha de vinaza y mostraron efectos significativos ($p < 0.0001$) en comparación con los demás tratamientos evaluados (**Fig. 1d-f**).

La SB manifestó un incremento lineal en los tres suelos ácidos estudiados con el aumento de las dosis de vinaza (**Fig. 1g**). La SB fue mayor en el suelo SA y mostró una diferencia significativa ($p < 0.0001$) en comparación con los suelos SO y SU (**Fig. 1g**). Sin embargo, la dosis de 200 m³/ha de vinaza incrementó la SB en 61, 90 y 23 % en los suelos SO, SU y SA, respectivamente, con relación a la no aplicación de vinaza y mostró diferencias significativas ($p < 0.002$) respecto de las demás dosis de vinaza aplicadas (**Fig. 1g**).

La CIC mostró un efecto lineal creciente en los tres suelos (SO, SU y SA) con el aumento de las dosis de vinaza (**Fig. 1h**). Fue mayor en el suelo SA y exhibió una diferencia significativa ($p < 0.0001$) en comparación con los suelos SO y SU (**Fig. 1h**). Por otra parte, con las dosis de 200 m³/ha de vinaza se obtuvieron los mayores valores de la CIC en los tres suelos en comparación con los demás tratamientos evaluados ($p < 0.001$) (**Fig. 1h**).

Influencia de la vinaza en el índice de saturación y la saturación de K, Ca, Mg y Al

El análisis de regresión mostró una interacción significativa ($p < 0.001$) entre las DV y TS en el V% y la saturación de K, Ca, Mg y Al (**Fig. 2a-e**). El V% mostró un incremento lineal en los suelos SO, SU y SA con el aumento de las dosis de vinaza. El V% fue significativamente ($p < 0.0003$) superior en el suelo SA con relación a los suelos SO y SU (**Fig. 2a**).

La saturación de K, Ca y Mg en los tres suelos mostró incrementos lineales con el aumento de las dosis de vinaza (**Fig. 2b-d**). La dosis de 200 m³/ha mostró incrementos significativos ($p < 0.0001$) en la V%, K%, Ca% y Mg% en comparación con los demás tratamientos en los tres suelos (SA, SU y SA) (**Fig. 2b-d**).

La Al% disminuyó linealmente en los suelos SO y SU y no mostró efectos significativos en el suelo SA ($p < 0.0001$) (**Fig. 2e**). Las dosis de 150 y 200 m³/ha de vinaza mostraron disminuciones significativas

($p < 0.0001$) en la Al% de 76 y 62 % en los suelos SO y SU, respectivamente, en comparación con el tratamiento sin vinaza (agua), y también exhibieron diferencias estadísticas ($p < 0.022$) comparados con las dosis de 50 y 100 m³/ha de vinaza (**Fig. 2e**).

DISCUSIÓN

Este estudio muestra por primera vez los efectos benéficos de la vinaza sobre los suelos ácidos al disminuir la AT, Al³⁺ y la saturación del Al %, y aumentar el pH y el contenido de cationes, con el consecuente beneficio de la SB, la CIC y las saturaciones de K, Ca y Mg (**Figs. 1 y 2**). En este sentido, varios autores sugieren que la vinaza tiene efectos potencialmente favorables para el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Christofolletti et al. 2013, Prado et al. 2013, Morán-Salazar et al. 2016, Vilar et al. 2018), pero hasta ahora no existían referencias de estos resultados en los suelos ácidos.

El primer beneficio observado en las propiedades de suelos ácidos por la adición de vinaza fue el aumento del pH (**Fig. 1a**), que puede atribuirse a las reacciones de reducción que consumen iones H⁺ presentes en el suelo, las cuales resultan en disminución del potencial redox (Carneiro et al. 2004). Una explicación más razonable para el incremento del pH es la introducción de cationes bases (p. ej., 2850.0 mg K⁺/dm³, 473.0 mg Ca²⁺/dm³ y 260.0 mg Mg²⁺/dm³) por la vinaza (**Cuadro II**), lo que causa reducción de oxihidróxidos de hierro y manganeso y aumenta la saturación de las bases. Estos cationes bases pueden reemplazar al Al³⁺ y H⁺ en los sitios de intercambio catiónico, lo que permite que estos últimos sean neutralizados, lixiviados o precipitados (Cole et al. 2019).

Otra posible explicación para los hallazgos anteriores podría ser el aumento del consumo de O₂ y la creación de micrositos anaeróbicos, lo que conduce a una disminución del potencial redox de los suelos (Silva et al. 2010, Hazbavi y Sadeghi 2016). Adicionalmente, estos efectos positivos en el aumento del pH del suelo probablemente se producen por el intercambio de protones entre el suelo y los sistemas tampón de la materia orgánica (Wong et al. 1998). Por último, los resultados de esta investigación corroboran parcialmente la primera hipótesis del aumento del pH, aunque éste no sustituye a las enmiendas químicas, ya que los valores de pH no alcanzaron los promedios óptimos para desarrollar el cultivo de la caña de azúcar (de 5.5 a 7.0) incluso con la dosis de 200 m³/ha.

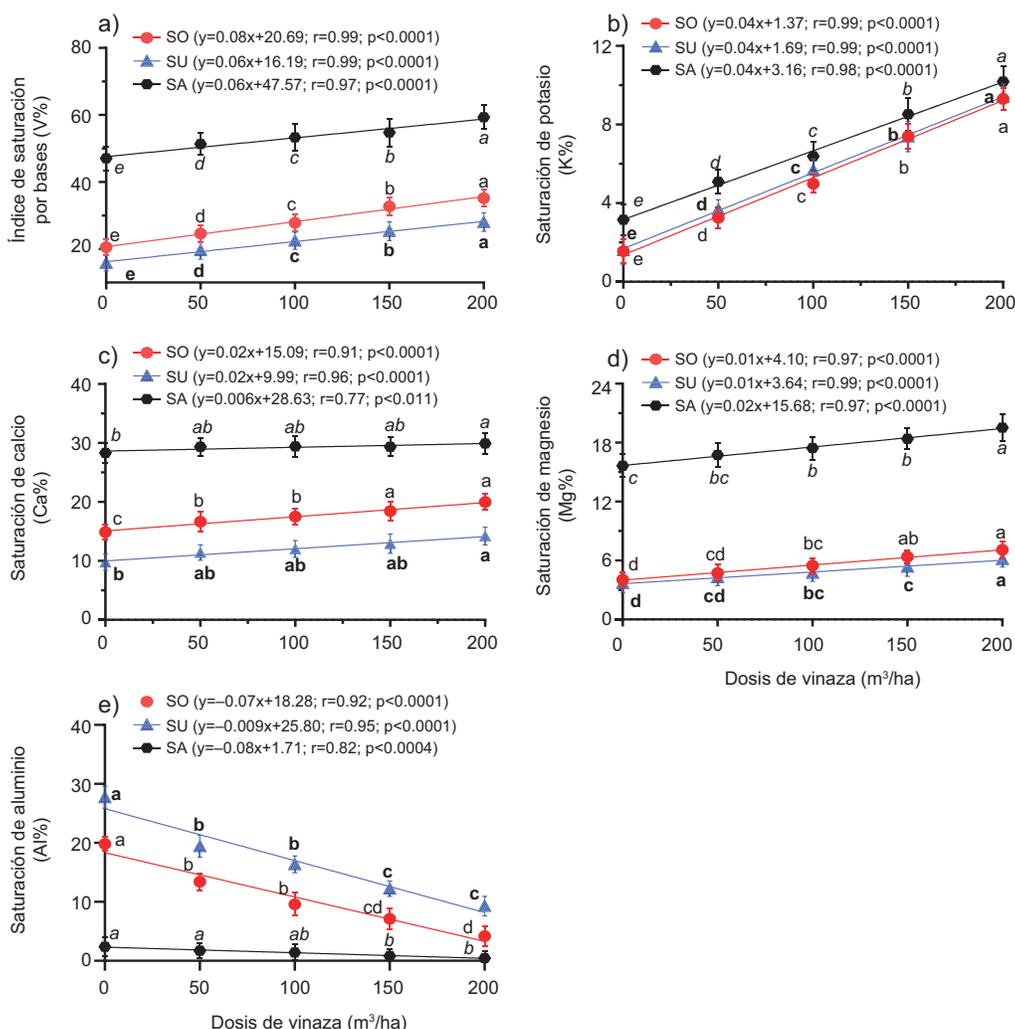


Fig. 2. (a) Variaciones en los valores del índice de saturación de las bases, (b) saturación del potasio, (c) saturación del calcio, (d) saturación del magnesio y (e) saturación del aluminio en los tres suelos evaluados (SO, SU y SA) en función de diferentes dosis de vinaza aplicadas, después de 30 días de incubación. Valores representados por la media de cuatro réplicas ($n = 4$) \pm DE. Letras minúsculas redondas (p. ej., a, b, c), cursivas (p. ej., a, b, c) y negritas (p. ej., a, b, c) indican diferencias significativas entre las dosis de vinaza en los suelos SO, SU y SA, respectivamente, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

La aplicación de vinaza, especialmente en la dosis de 200 m³/ha, produjo una disminución de la AT, la Al^{3+} y la Al% en la capa de 0-20 cm de los suelos estudiados (**Figs. 1b, c y 2e**). Una posible explicación de lo anterior es que la vinaza aumenta el pH y, por tanto, la concentración de Al^{3+} disminuye, debido a que el Al^{3+} es neutralizado, lixiviado o precipitado como carbonatos (Emamverdian et al. 2015). Otra posible razón de esta marcada reducción del contenido de Al^{3+} es la “formación y retención de hidroxil-Al-polímeros” (Rahman et al. 2018). Además, esta reducción de la concentración de Al^{3+} puede

explicarse por la complementación con ácidos orgánicos liberados por la vinaza (Carneiro et al. 2004).

Respecto a la acidez intercambiable, el suelo SA no se vio afectada significativamente por el aumento de las dosis de vinaza (**Fig. 1f**). La causa fue una menor saturación de Al en este suelo (31 %) en comparación con los suelos OS (54 %) y SA (73 %) (calculados a partir de los datos originales). Brady y Weil (2013) afirmaron que estos suelos tienen menor poder amortiguador para equilibrar la Al^{3+} en su solución, lo que conduce a mantener niveles constantes, incluso con la aplicación de vinaza. Por

lo tanto, los resultados de este estudio confirman la primera hipótesis e indican que la vinaza es una enmienda económica y viable para la corrección de la acidez de los suelos.

Las [K], [Ca] y [Mg] aumentaron en los tres suelos con la aplicación de vinaza, particularmente en la dosis de 200 m³/ha debido a la incorporación de 7, 6 y 5 mg K/dm³; 5.5 y 4 mg Ca²⁺/dm³, y, como promedio, 2 mg Mg²⁺/dm³ en suelos SO, SU y SA, respectivamente, con el consecuente aumento de la SB (**Fig. 1d-g**), lo que indica una mayor fertilidad de estos suelos. El aumento de la [K] por la adición de vinaza se debe a la rápida y alta liberación de K⁺ como resultado de su alta solubilidad, mientras que las concentraciones de Mg²⁺ y Ca²⁺ son menores y se retardan, lo que puede atribuirse a su mayor carga en comparación con el K⁺, pero también a una menor solubilidad y potencial de precipitación con aniones como los carbonatos (Cole et al. 2019).

El contenido de K en los suelos comúnmente utilizados en el cultivo de la caña de azúcar representa menos del 5 % de la CIC (Fuess et al. 2017). La vinaza es una alternativa atractiva para reducir la fertilización mineral aproximadamente en un 50 % en la aplicación de fertilizantes químicos en términos de suplementación de K⁺ (Uyeda et al. 2013). Este residuo se utiliza comúnmente como fertilizante líquido por su alto contenido de nutrientes (principalmente Ca²⁺ y K⁺) y su alto contenido de materia orgánica (Christofolletti et al. 2013, Morán-Salazar et al. 2016).

Estos resultados corroboran parcialmente la segunda hipótesis planteada, debido a que la vinaza es una alternativa amigable y eficiente para disminuir la fertilización mineral y la contaminación ambiental, y son consistentes con los hallazgos de estudios experimentales previos respecto de que la aplicación de vinaza aumenta los niveles de Ca²⁺ y Mg²⁺, así como de otros nutrientes como N, P y K⁺ (Paulino et al. 2011, Jiang et al. 2012, Prado et al. 2013, Andreotti et al. 2015, Tavares et al. 2017). Estos hallazgos indican que la adición de vinaza tiende a aumentar el contenido de cationes bases en suelos ácidos, lo que conduce a una mayor liberación de nutrientes para las plantas cultivadas en estas condiciones.

La aplicación de vinaza aumentó la CIC en los tres suelos ácidos estudiados (**Fig. 1h**), principalmente debido al incremento de los cationes bases (**Fig. 1d-f**) y la disminución de la Al³⁺ (**Fig. 1c**). Una posible explicación de estos hallazgos es que la vinaza ayuda a disminuir las cargas negativas en el suelo, lo cual disminuye la lixiviación de los cationes (Caillet y Adelard 2021). Los resultados de este estudio revelaron que el suelo SA presentó la mayor

CIC, posiblemente a su textura arcillosa, debido a que posee mayor cantidad de arcillas, óxidos de silicato y humus, lo que resulta en mayores cargas negativas; por tanto, la CIC de estos suelos es mayor (Fuess et al. 2017).

La CIC también resultó afectada por la acidez del suelo y la adición de vinaza disminuyó la concentración de H⁺ (pH más alto). Esto posiblemente liberó las cargas negativas de los coloides, lo que aumenta la CIC y disminuye la capacidad de intercambio aniónico (CIA) (Zolin et al. 2011). La CIC proporciona la base para el diagnóstico de la fertilidad actual de los suelos y ayuda a la toma de decisiones sobre el encalado y la fertilización (Brito et al. 2009, Paulino et al. 2011, Zolin et al. 2011). Por tanto, estos resultados indican que la vinaza es una enmienda de bajo costo para aumentar la fertilidad de los suelos ácidos.

En este estudio se observó que los tres suelos estudiados presentan valores bajos de V% iniciales (SO = 13.0 %, SU = 7.0 % y SA = 43.0 %), lo que está relacionado con su baja acidez y fertilidad natural. Sin embargo, cabe destacar que los suelos SO predominantes en Brasil generalmente presentan V < 50 %, es decir, son distróficos. Por otro lado, Raij et al. (2001) observaron que la caña de azúcar es un cultivo que exige una elevada saturación de bases (60 %). En el presente estudio, la adición de vinaza a 200 m³/ha aumenta la V% hasta 35, 29 y 58 % en el SO, SU y SA, respectivamente (**Fig. 2a**).

Estos resultados indican que los valores alcanzados en los SO y SU son muy bajos y no cumplen con los criterios expuestos por Raij et al. (2001), lo cual indica que las dosis de vinaza utilizadas son inadecuadas para el desarrollo de la caña de azúcar. No obstante, se alcanzaron los valores de V% más próximos al ideal requerido para el cultivo de la caña de azúcar con la aplicación de vinaza en el suelo SA. Resultados similares con relación al incremento del V% con la fertilización con vinaza fueron reportados anteriormente en suelos SA (Zolin et al. 2011). Esto sugiere que la vinaza es una importante enmienda económica para el mejoramiento de los suelos ácidos, especialmente los SA.

Por otra parte, las dosis crecientes de vinaza aumentaron las saturaciones de K%, Ca% y Mg%, y disminuyeron la de Al% en los tres suelos evaluados con relación a la ausencia de aplicación de vinaza (**Fig. 2b-e**). Por ello es razonable considerar las reacciones de intercambio entre H⁺ y Al³⁺ por K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺, lo que aumenta la saturación de bases en los suelos. Sin embargo, en la dosis más alta de vinaza (200 m³/ha) las saturaciones de Ca y Mg no alcanzaron niveles adecuados para la producción

agrícola, incluyendo la caña de azúcar. Los niveles recomendados para un rendimiento satisfactorio de los cultivos son del 40 al 50 % para el Ca y del 20 % para el Mg (Calderano et al. 2011). Por lo tanto, estos niveles de Ca y Mg también afectarían la saturación de Al cuando están estrictamente relacionados (Brady y Weil 2013, Singh et al. 2017, Olivera et al. 2018).

En general, las propiedades físicas y químicas de los tres suelos mejoraron de manera significativa con la adición de vinaza, especialmente en la dosis de 200 m³/ha, pero esta cantidad del residuo no alcanza a sustituir las enmiendas químicas (material calcáreo, yeso y silicatos), si bien beneficia la fertilidad de los suelos. Finalmente, las hipótesis de este estudio fueron verificadas, lo que indica que la aplicación de vinaza es una fuente alternativa de bajo costo que ayuda a balancear la acidez de los suelos ácidos y mejora sus propiedades físicas y químicas, especialmente a la dosis de 200 m³/ha. Estos resultados sugieren que dicho residuo puede utilizarse en enmiendas agrícolas para mejorar la fertilidad de los suelos y la productividad de los cultivos, así como para evitar la contaminación de aguas y medio ambiente.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que la vinaza puede aplicarse como fertilizante para mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos ácidos. Además, la adición de vinaza a dosis de 200 m³/ha puede sustituir de manera parcial los fertilizantes químicos para corregir la acidez del suelo, pero es necesario realizar otros estudios con la utilización de mayores dosis o en combinación con bajas cantidades de enmiendas químicas, que podrían ser alternativas más eficaces para corregir la acidez del suelo y pueden mostrar posibles caminos hacia una agricultura sostenible. Por lo tanto, los hallazgos de este estudio sugieren que la adición de vinaza podría usarse como fuente rentable y amigable con el medio ambiente, lo que conduciría a una estrategia sostenible económica y ecológicamente adecuada para el manejo de los suelos ácidos a nivel local, nacional e internacional.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a la Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP) por brindar las facilidades necesarias para el desarrollo de esta investigación. A la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

por proporcionar una beca al primer autor (Código de financiamento 001), así como a la Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) (código BPVE-00066/22) por proporcionar una beca a D.O.V.

REFERENCIAS

- Almeida C., Francisco M., Soares H., Marcia J. y Bisinoti C. (2017). Transforming sugarcane bagasse and vinasse wastes into hydrochar in the presence of phosphoric acid: An evaluation of nutrient contents and structural properties. *Waste and Biomass Valorization* 8, 1139-151. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9664-4>
- Andreotti M., Soria J., Costa N.R., Gameiro R.A. y Rebonatti M.D. (2015). Acúmulo de nutrientes e decomposição do palhico de cana em função de doses de vinhaça. *Bioscience Journal* 31 (2), 563-576. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n2a2015-22426>
- Bojórquez-Quintal E., Escalante-Magaña C., Echevarría-Machado I. y Martínez-Estévez M. (2017). Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontier in Plant Science* 8, 1767. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>
- Bose J., Babourina O., Ma Y., Zhou M., Shabala S. y Rengel Z. (2015). Specificity of ion uptake and homeostasis maintenance during acid and aluminium stresses. En: *Aluminum stress adaptation in plants. Signaling and communication in plants* (Panda S.K. y Baluška F., Eds.). Springer, Cham, Suiza, pp. 229-251. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9_12
- Brady N. y Weil R. (2013). *Nature and properties of soils*. 3a ed. Pearson Higher Education, New Jersey, EUA, 320 pp.
- Brito F., Rolim M. y Pedrosa E. (2009). Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 4 (4), 456-462. <https://doi.org/10.5039/agraria.v4i4a14>
- Caillet H. y Adelard L. (2021). Start-up strategy and process performance of semi-continuous anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. *Waste and Biomass Valorization* 12, 185-198. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00964-z>
- Calderano S.B., Donagema G.K., Campos D.V.B., de Teixeira W.G. y Viana J.H.M. (2011) *Manual de métodos de análise de solo*. 2a ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brasil, 230 pp.
- Camara M.R. y Caldarelli C.E. (2016). Expansão canavieira e o uso da terra no estado de São Paulo. *Estudos Avançados* 30 (88), 93-116. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142016.30880008>

- Carneiro C.E., Fioretto R., Fonseca I.C., Neves C.S. y Silva-Castro A.J. (2004). Chemical alterations in the soil induced by the superficial application of straw of sugar-cane, limestone and vinasse. *Semina: Ciências Agrárias* 25 (4), 265-272. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2004v25n4p265>
- Carvalho L.A., Meurer I., Silva C.A., Santos C.F. y Libardi P.L. (2014). Spatial variability of soil potassium in sugarcane areas subjected to the application of vinasse. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 86 (4), 1999-2012. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420130319>
- Christofoletti C.A., Escher J.P., Correia J.E., Marinho J.F.U. y Fontanetti C.S. (2013). Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management* 33 (12), 2752-2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- Cole E.J., Zandvakili O.R., Xing B., Hashemi M., Allen V., Herbert S.J., Cole E.J., Zandvakili O.R., Xing B. y Hashemi M. (2019). Effects of hardwood biochar on soil acidity, nutrient dynamics, and sweet corn productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50 (14), 1732-1742. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1632343>
- Emamverdian A., Ding Y., Mokhberdorran F. y Xie Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *Scientific World Journal* 2015, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2015/756120>
- Embrapa (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3a ed. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, Brasil, 342 pp.
- Fuess L.T., Rodrigues I. J. y Garcia M.L. (2017). Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 52 (11), 1063-1072. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1338892>
- Hazbavi Z. y Sadeghi S.H.R. (2016). Potential effects of vinasse as a soil amendment to control runoff and soil loss. *Soil* 2, 71-78. <https://doi.org/10.5194/soil-2-71-2016>
- IUSS-WRB (2022). World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4a ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 234 pp.
- Jiang Z.P., Li Y.R., Wei G.P., Liao Q., Su T.M., Meng Y.C., Zhang H.Y. y Lu C.Y. (2012). Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech* 14 (4), 412-417. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0174-9>
- Luna I.R.G., Corrêa M.M., Primo D.C., Rolim-Neto F.C., Silva J.P.S., Cezar-Meneses R.S. y Oliveira-Santos J.P. (2022). Phosphorus concentrations and stocks in different soil classes, uses and coverages in Agreste Pernambucano, Brazil. *Investigações Geográficas* (107), e60477. <https://doi.org/10.14350/RIG.60477>
- Morán-Salazar R. G., Sánchez-Lizárraga A. L., Rodríguez-Campos J., Dávila-Vázquez G., Marino-Marmolejo E.N., Dendooven L. y Contreras-Ramos S.M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: Consequences and perspectives. *SpringerPlus* 5 (1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>
- Nobile F.O., Calero-Hurtado A., Prado R.M., Souza H.A., Anunciação M.G., Palaretti L.F. y Nociti-Dezem L.A.S. (2021). A novel technology for processing urban waste compost as a fast-releasing nitrogen source to improve soil properties and broccoli and lettuce production. *Waste and Biomass Valorization* 12, 6191-6203. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01415-z>
- Olivera D., Hernández A., Rodríguez M., Lizcano R., Calero-Hurtado A. y Peña K. (2018). Effects of land-use change on Nitisols properties in a tropical climate. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 71 (3), 8601-8608. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v71n3.67786>
- Paulino J., Zolin C.A., Bertonha A., Freitas P.S.L. y Folegatti M.V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15 (3), 244-249. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300004>
- Prado R., Caione G. y Campos C. (2013). Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation Agriculture. *Applied and Environmental Soil Science* 2013, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2013/581984>
- Rahman M., Lee S.H., Ji H., Kabir A., Jones C. y Lee K.W. (2018). Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: Current status and opportunities. *International Journal of Molecular Sciences* 19 (10), 3073. <https://doi.org/10.3390/ijms19103073>
- Raij B.V., Cantarella H., Quaggio J.A. y Furlani A.M.C. (1997). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2a ed. Instituto Agronômico (Boletim Técnico, 100), São Paulo, Brasil, 154 pp.
- Raij B.V., Andrade J.C., Cantarella H. y Quaggio J. (2001). Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 2a ed. Instituto Agronômico, Campinas, São Paulo, Brasil, 285 pp.
- Ribeiro B.T., Lima J.M., Curi N. y Oliveira G.C. (2013). Aggregate breakdown and dispersion of soil samples amended with sugarcane vinasse. *Scientia Agrícola* 70 (6), 435-441. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600009>
- Santos A., Firak D.S., Emmel A., Siedlecki S., Lopes A. y Peralta-Zamora P. (2018). Evaluation of the Fenton

- process effectiveness in the remediation of soils contaminated by gasoline: Effect of soil physicochemical properties. *Chemosphere* 207, 154-161. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.05.087>
- Sarker-Chandra T., Gousul-Azam S.M.G. y Bonanomi G. (2016). Recent advances in sugarcane industry solid by-products valorization. *Waste and Biomass Valorization* 8, 241-266. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9665-3>
- Silva V.S., Garcia C.A. y Silva C.M. (2010). O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente* 3 (1), 59-76. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2010v3n1p59-76>
- Singh S., Tripathi D. K., Singh S., Sharma S., Dubey N.K., Chauhan D.K. y Vaculík M. (2017). Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. *Environmental and Experimental Botany* 137, 177-193. <https://doi.org/10.1016/j.env-expbot.2017.01.005>
- Sousa-Junior G.S., Calero-Hurtado A., Souza-Junior J.P., Prado R.M. y Mathias dos Santos D.M. (2022). Nutritional and structural role of silicon in attenuating aluminum toxicity in sugarcane plants. *Silicon* 14, 5041-5055. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01294-y>
- Tavares U.E., Rolim M.M., Neto D.E.S., Pedrosa E.M.R., Magalhães A.G. y Silva Ê.F.F. (2017). Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 21 (11), 752-757. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p752-757>
- Uyeda C.A., Miranda J.H., Duarte S.N., Medeiros P.R.F. y Dias C.T.S. (2013). Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. *Engenharia Agrícola* 33 (4), 689-698. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400008>
- Vilar D.S., Carvalho G.O., Pupo M.M.S., Aguiar M.M., Torres N.H., Américo J.H.P., Cavalcanti E.B., Eguiluz K.I.B., Salazar-Banda G.R., Leite M.S. y Ferreira L.F.R. (2018). Vinasse degradation using *Pleurotus sajor-caju* in a combined biological – Electrochemical oxidation treatment. *Separation and Purification Technology* 192, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.017>
- Wong M.T.F., Nortcliff S. y Swift R.S. (1998). Method for determining the acid ameliorating capacity of plant residue compost, urban waste compost, farmyard manure, and peat applied to tropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29 (19-20), 2927-2937. <https://doi.org/10.1080/00103629809370166>
- Zolin C.A., Paulino J., Bertonha A., de Freitas P.S.L., Folegatti M.V. (2011). Exploratory study of the stillage use along the time. I. Characteristics of the soil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15 (1), 22-28. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000100004>