



La vinaza como bioherbicida y biofertilizante: una alternativa sostenible para la agricultura ecológica

Vinasse as a bioherbicide and biofertilizer: A sustainable alternative for organic ecological

Autores

Washington Agapo Guzmán Paredes 
✉ washington_guzman_mga@espam.edu.ec

Ever Darío Morales Avendaño 
✉ edmorales@espam.edu.ec

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de
Manabí Manuel Félix López – ESPAM MFL.

Citación sugerida: Guzmán Paredes, W. A., Morales Avendaño, E. D. (2025). La vinaza como bioherbicida y biofertilizante: Una alternativa sostenible para la agricultura ecológica. *La Técnica*, 15(2), 85-96. DOI: <https://doi.org/10.33936/latecnica.v15i2.7355>.

Recibido: Marzo 05, 2025
Aceptado: Agosto 19, 2025
Publicado: Septiembre 25, 2025

Resumen

La vinaza, un subproducto del bioetanol, tiene un gran potencial como biofertilizante y herbicida en la agricultura ecológica. Este estudio evaluó el efecto de vinaza no tratada y pretratada con CO_3Ca , NaHCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en parcelas de 1 m², utilizando un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. La vinaza fue pretratada para ajustar su pH y se aplicaron distintas dosis, midiendo variables como la altura de las plantas, número de hojas y quemaduras foliares. Los resultados mostraron que los tratamientos con NaHCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ redujeron la conductividad eléctrica (CE) en más del 99%, alcanzando valores cercanos a 13,64 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, frente al testigo de 6420 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La DBO₅ disminuyó a 5.000 mg·L⁻¹, mientras que la DQO aumentó a 155,250 mg·L⁻¹. El tratamiento con CO_3Ca promovió un notable crecimiento vegetal, con una altura promedio de 32,25 ± 1,12 cm a los 23 días, demostrando su efecto como biofertilizante. En el control de malezas, la vinaza no tratada causó hasta un 80% de quemaduras en *Microtea debilis* y un 100% en *Cyanthillium cinereum*. Los tratamientos con NaHCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mostraron efectos herbicidas de entre un 5% y 60% en 10 especies diferentes. En conclusión, la vinaza tratada con CO_3Ca favorece la biofertilidad, mientras que la vinaza combinada con NaHCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es más efectiva como herbicida.

Palabras clave: sostenibilidad agroindustrial, control de malezas, manejo de residuos.

Abstract

Stillage, a by-product of bioethanol, has great potential as a biofertilizer and herbicide in organic farming. This study evaluated the effect of untreated and pretreated vinasse with CO_3Ca , NaHCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in 1 m² plots, using a completely randomized design with four replications. The vinasse was pretreated to adjust its pH and different doses were applied, measuring variables such as plant height, number of leaves and foliar burns. The results showed that treatments with NaHCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduced electrical conductivity (EC) by more than 99%, reaching values close to 13.64 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, compared to the control of 6,420 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. BOD₅ decreased to 5,000 mg·L⁻¹, while COD increased to 155.250 mg·L⁻¹. The CO_3Ca treatment promoted remarkable plant growth, with an average height of 32.25 ± 1.12 cm at 23 days, demonstrating its effect as a biofertilizer. In weed control, untreated vinasse caused up to 80% burndown on *Microtea debilis* and 100% on *Cyanthillium cinereum*. Treatments with NaHCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ showed herbicidal effects ranging from 5% to 60% on ten different species. In conclusion, vinasse treated with CO_3Ca favors biofertility, whereas vinasse combined with NaHCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is more effective as a herbicide.

Keywords: agro-industrial sustainability, weed control, waste management.



Introducción

La agricultura convencional se basa en el uso intensivo de agroquímicos, lo que ha generado preocupaciones ambientales y sociales debido a la degradación del suelo, la contaminación del agua y los efectos adversos sobre la biodiversidad y la salud humana (Tiware, 2023). Frente a estos desafíos, la agricultura ecológica surge como una alternativa sostenible que promueve el uso eficiente de los recursos naturales y la reducción de insumos químicos, priorizando prácticas que mantengan la fertilidad del suelo y el equilibrio del ecosistema (Beltrán y Bernal, 2022). Uno de los retos fundamentales en este sistema es el control de malezas y el mantenimiento de la productividad, sin recurrir a productos sintéticos (Koskey et al., 2021).

En este contexto, la vinaza como un subproducto líquido generado durante la destilación del alcohol artesanal, ha despertado interés por su potencial agrícola; debido a que su composición química, rica en materia orgánica, minerales esenciales y compuestos fenólicos, le confiere la capacidad de inhibir el crecimiento de ciertas plantas y mejorar la fertilidad del suelo (González et al., 2021; Luz et al., 2021). No obstante, su uso indiscriminado puede generar impactos ambientales negativos debido a su alto contenido de demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO₅), conductividad eléctrica (CE) y su pH ácido, lo que puede afectar la calidad del suelo y las fuentes hídricas (Zielińska et al., 2021).

El aprovechamiento de la vinaza en la agricultura ecológica contribuye a la economía circular al reutilizar un residuo agroindustrial que, de otro modo, representaría un problema ambiental (Torres et al., 2022; Rachman et al., 2023). Su aplicación ha demostrado mejorar la estructura del suelo, incrementar la actividad microbiana y favorecer el contenido de nutrientes en cultivos como la caña de azúcar y el maíz (Otoya et al., 2023). Sin embargo, para maximizar sus beneficios y minimizar sus efectos adversos, es necesario someterla a tratamientos fisicoquímicos previos que modulen sus propiedades y reduzcan su fitotoxicidad (Duarte et al., 2023). Entre otros tratamientos se ha reportado la combinación de vinaza con bacterias promotoras del crecimiento en cultivos de riego, cuya aplicación puede contribuir con la seguridad alimentaria mediante el reciclaje de nutrientes para la agricultura (Soares et al., 2024).

En el ámbito donde se ha desarrollado la investigación, la acumulación diaria de vinaza durante la temporada de producción de alcohol artesanal se ubica en sitios improvisados e incluso es arrojada a esteros; lo cual causa un impacto ambiental severo para el ambiente y la comunidad en general.

Es por ello que, se ha realizado previamente un estudio sobre la aplicación de vinaza para establecer un protocolo que optimice su aprovechamiento como fertilizante y/o herbicida, lo que permitirá disminuir su impacto ambiental, mediante su utilización y así reducir los elevados volúmenes diarios que son drenados sin control y, por lo tanto, contribuyendo al desarrollo de tecnologías accesibles de tratamiento y aprovechamiento para transformar este pasivo ambiental en un recurso sostenible.

Investigaciones previas han evaluado estrategias para modificar la composición de la vinaza y optimizar su uso en la agricultura. En un bioensayo *in vitro* y *ex situ*, la aplicación de bicarbonato de sodio (NaHCO₃) permitió reducir la DQO y la CE a diferentes valores de pH (4, 5, 6 y 7), modulando su impacto herbicida y limitándolo a un efecto foliar del 5 al 20% en diversas especies de malezas, lo que sugiere la posibilidad de ajustar sus propiedades para mejorar su desempeño como biofertilizante y bioherbicida (Morales et al., 2023). No obstante, se requiere ampliar los estudios explorando otros compuestos que permitan mejorar su eficacia tanto como herbicida como fertilizante, optimizando su aplicación en condiciones agrícolas reales.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el Bosque Politécnico de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”, ubicado en el sector El Limón, parroquia de Calceta, provincia de Manabí, Ecuador. Los sitios seleccionados presentaron un clima tropical seco y suelos franco arenosos de buen drenaje, con baja pedregosidad y sin restricciones significativas para el uso agrícola (Cárdenas y Vélez, 2024).

La investigación tuvo un enfoque experimental y exploratorio para evaluar el efecto de distintos tratamientos fisicoquímicos aplicados a la vinaza. Se empleó un método cuantitativo enfocado en la medición de variables morfológicas de las plantas y parámetros fisico-químicos. Además, se complementó con un análisis cualitativo que permitió interpretar los datos numéricos considerando observaciones sobre el comportamiento de la vinaza como biofertilizante y bioherbicida. Esta combinación metodológica proporcionó una evaluación integral de los tratamientos, brindando una visión más completa de sus efectos en el control de malezas y el desarrollo vegetal (Gao y Su, 2024).

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, lo que resultó en un total de 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en parcelas de 1 m², delimitadas mediante cajones de madera en

campo abierto. Los tratamientos fueron asignados aleatoriamente a las parcelas para garantizar la homogeneidad y minimizar cualquier sesgo y se designaron como se muestra en la tabla 1. Las microparcelas presentaron diferentes especies y poblaciones de plantas silvestres en condiciones *in vivo* e *in situ*, lo que permitió observar el efecto de los tratamientos sobre la vegetación en su entorno natural. Las repeticiones fueron ubicadas aleatoriamente, tanto para evaluar el efecto del fertilizante como del herbicida, asegurando que las variables externas no afectaran los resultados del experimento.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos y nomenclatura.

Nomenclatura	Tratamiento
T1	Vinaza no tratada (VC)
T2	Vinaza + Bicarbonato de sodio (NaHCO_3)
T3	Vinaza + Hidróxido de calcio (Ca(OH)_2)
T4	Vinaza + Carbonato de calcio (CO_3Ca)

Manejo del experimento

Obtención y pretratamiento de la vinaza

Las muestras de vinaza fueron recolectadas como subproducto de la destilación del fermentado utilizado en la producción de alcohol artesanal (currincho) en el sector Agua Fria, ubicado en el cantón Junín, provincia de Manabí. De acuerdo con las normativas de almacenamiento establecidas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2013), el subproducto fue envasado en recipientes plásticos de 20 L, asegurando su conservación hasta su posterior tratamiento y aplicación en el ámbito experimental.

Antes de su aplicación experimental, la vinaza fue sometida a un ajuste de pH mediante la adición controlada de 15 g de CaCO_3 , NaHCO_3 o Ca(OH)_2 por cada 1000 mL de vinaza fresca, con el objetivo de alcanzar un pH en el rango de 6 a 6,5. Cada compuesto fue utilizado con un propósito específico: el CaCO_3 favoreció la precipitación de compuestos solubles, el NaHCO_3 redujo la acidez sin alterar otras propiedades fisicoquímicas, y el Ca(OH)_2 incrementó la alcalinidad de la solución, lo que promovió la solubilidad de nutrientes esenciales para su posterior aplicación como biofertilizante y bioherbicida (Toscano et al., 2022).

Caracterización fisicoquímica de la vinaza

La caracterización fisicoquímica de la vinaza se realizó una sola vez, después del pretratamiento, para evaluar los cambios en parámetros como la conductividad eléctrica, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y la salinidad. Los análisis fueron efectuados en laboratorio utilizando métodos específicos: la conductividad eléctrica se midió con un medidor de conductividad según el protocolo de Bamba et al. (2021), la DQO se determinó por oxidación con dicromato siguiendo la norma ASTM D1252 (Rawajfeh, 2021), la DBO₅ se evaluó mediante incubación a 20 °C durante 5 días de acuerdo con la metodología de la EPA, y la salinidad se midió mediante conductividad directa con un medidor de salinidad.

Estas mediciones permitieron observar los cambios en las propiedades físico-químicas de la vinaza tratada, lo que confirmó que cumplía con las condiciones óptimas para su aplicación como biofertilizante y bioherbicida.

Aplicación de los tratamientos para biofertilizante

Los tratamientos biofertilizantes fueron aplicados en parcelas previamente desmalezadas y acondicionadas, utilizando el suelo natural del área para replicar condiciones reales del entorno agrícola. Esta elección permitió evaluar la respuesta de las plantas en un contexto más representativo de su desarrollo en campo, tal como sugieren Hází et al. (2023) y Anggraini et al. (2024) al destacar la importancia de utilizar sustratos naturales para la evaluación de biofertilizantes. A cada unidad experimental se le aplicaron 200 mL de la solución correspondiente por tres ocasiones cada 7 días, garantizando una distribución uniforme del tratamiento.

Las variables morfológicas que evaluaron el efecto biofertilizante fueron la altura de las plantas y el número de hojas, mismas que se midieron en los días 9, 16 y 23 del crecimiento vegetativo. Estas variables fueron elegidas debido a su capacidad para reflejar los efectos de los tratamientos sobre el crecimiento, vigor y la salud de las plantas, tal como lo señalaron Atero et al. (2024), quienes recomendaron su uso para evaluar el impacto de biofertilizantes en etapas tempranas. Además, se realizó una identificación botánica de las especies emergentes en cada parcela, utilizando guías botánicas para asignarles los nombres científicos correspondientes. Este enfoque no solo permitió observar la respuesta diferencial de las especies a los tratamientos, sino que también enriqueció el análisis al ofrecer información sobre la efectividad del biofertilizante en distintas especies, tal como lo sugirieron Calcan et al. (2022).

Aplicación de los tratamientos para bioherbicida

A diferencia del ensayo biofertilizante, en esta evaluación no se alteró la vegetación del área experimental, conservando intactas las especies silvestres no comestibles presentes en el sitio. Este enfoque permitió analizar el impacto del tratamiento sobre la vegetación preexistente en condiciones naturales, evitando sesgos asociados a la eliminación de competencia o modificaciones en el ecosistema, como lo sugirieron Repajic et al. (2021). Se aplicaron en tres ocasiones cada 7 días 50 mL de la solución sobre el follaje de cada parcela en los días de afloración (16, 20 y 27), asegurando una distribución homogénea para evaluar el efecto directo del tratamiento a nivel foliar.

Las variables analizadas incluyeron el porcentaje de quemaduras foliares y la altura final de las plantas. El porcentaje de quemaduras foliares se consideró el indicador principal, ya que reflejó el daño visual y fisiológico causado por el herbicida, manifestado en la aparición de áreas secas o necróticas en las hojas, un criterio clave para determinar la efectividad del tratamiento en el control de la vegetación no deseada (Barroso et al., 2022; Kaur et al., 2023). La altura final de las plantas, medida al día 27, permitió identificar posibles efectos secundarios sobre el crecimiento,



considerando que un herbicida efectivo debe inhibir el desarrollo vegetal.

Para clasificar el nivel de daño foliar, se empleó una escala porcentual adaptada de Vieira et al. (2022), estableciendo las siguientes categorías: sin daño (0%), resistente (5%), subletal (6-90%) y letal (100%). Esta clasificación facilitó la comparación entre los tratamientos y proporcionó criterios objetivos para evaluar la severidad del efecto de quemaduras, permitiendo una interpretación precisa de la eficacia del bioherbicida.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos del efecto biofertilizante y herbicida fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. Antes de realizar este análisis, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente. Aquellas variables que no cumplieron se ajustaron con la transformación de datos Log10. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($P \leq 0,05$) para determinar diferencias específicas entre grupos. El análisis se llevó a cabo con el software InfoStat 2020, garantizando un análisis estadístico riguroso y adecuado a los objetivos del estudio.

Resultados y discusión

Los aditivos aplicados a la vinaza; CaCO_3 , NaHCO_3 y Ca(OH)_2 lograron reducir significativamente su conductividad eléctrica (CE) y salinidad, lo que indicó una mejora importante en su calidad (tabla 2). Se observó una disminución superior al 99% en la CE para todos los tratamientos, con valores promedio de $13,64 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para el tratamiento con CaCO_3 , $15,71 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para NaHCO_3 y $12,75 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para Ca(OH)_2 . Esta reducción fue crucial para prevenir la acumulación de sales en el suelo, condición esencial para evitar la salinización y preservar la fertilidad; lo que concordó con los resultados de Cedeño et al. (2024).

Tabla 2. Propiedades físico-químicas de los tratamientos.

Tratamiento	CE Promedio ($\mu\text{S m S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Salinidad (%) promedio	pH promedio	Disminución de CE (%)
Vinaza no tratada	$6420 \pm 9,13$	$0,34 \pm 0,008$	$4 \pm 0,09$	-
CaCO_3	$13,64 \pm 0,08$	$0,6 \pm 0,008$	$6 \pm 0,08$	99,82
NaHCO_3	$15,71 \pm 0,09$	$0,9 \pm 0,014$	$6 \pm 0,08$	99,7
$(\text{OH})_2\text{Ca}$	$12,75 \pm 0,13$	$0,7 \pm 0,008$	$5 \pm 0,08$	99,8

En cuanto a la salinidad, aunque los valores aumentaron ligeramente respecto a la vinaza no tratada, estos se mantuvieron dentro de límites aceptables para aplicaciones agrícolas, con promedios que oscilaron entre 0,6 y 0,9. El pH promedio alcanzó valores óptimos para suelos agrícolas de 6,00 en los tratamientos con CaCO_3 y NaHCO_3 , respectivamente, lo que favoreció la neutralización de la acidez inicial de la vinaza. En cambio, el tratamiento con Ca(OH)_2 mostró un pH promedio de 5,0, ligeramente inferior al deseado, lo que podría requerir ajustes en su dosificación (Hirzel et al., 2021).

La notable remoción de CE, superior al 99%, se atribuyó a la precipitación de sales insolubles, principalmente carbonatos y bicarbonatos, formados durante el proceso.

Soukaina et al. (2022) reportaron disminuciones similares, con reducciones del 96,82% en efluentes industriales tratados con NaHCO_3 , evidenciando que la formación y precipitación de sales, principalmente carbonatos y bicarbonatos, fue el mecanismo dominante. Aunque siguió siendo efectivo, este comportamiento podría requerir ajustes en su aplicación, tal como lo sugirieron Medina et al. (2024) quienes subrayan que su eficacia depende de las condiciones específicas del medio, especialmente en matrices complejas como la vinaza.

La aplicación de NaHCO_3 y Ca(OH)_2 redujo el DBO_5 de 10.000 a $5.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y equivalente a un 50% (figura 1), lo que indicó una mejora significativa en la biodegradación de la materia orgánica presente en la vinaza. Este resultado apunta que el aumento de la alcalinidad favoreció la oxidación de compuestos orgánicos simples, optimizando la biodegradabilidad del efluente. Este comportamiento coincidió con el mecanismo propuesto por Mensah et al. (2022) quienes reportaron que los iones hidroxilo generados en medios alcalinos promovieron la división de compuestos orgánicos.

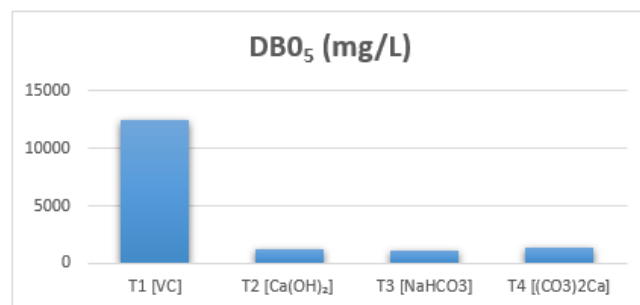


Figura 1. Medida de DBO_5 (mg·L⁻¹) en los tratamientos.

Sin embargo, en el caso de la DQO (figura 2), se observó una reducción del 20,58% con NaHCO_3 , de un 13,04% con $\text{Ca}(\text{HO})_2$ y de solo un 6,04% con $(\text{CO}_3)_2\text{Ca}$ proveniente de cáscara de huevo. Este resultado parece ser atribuido a la solubilización de compuestos orgánicos en la cáscara (González et al., 2019) lo cual incrementan la carga orgánica sin ser fácilmente biodegradables (Zielinska et al., 2021). De manera similar, destacaron que el pretratamiento alcalino con NaOH solubilizó compuestos orgánicos compatibles, aumentando el carbono disuelto, las proteínas y los carbohidratos.

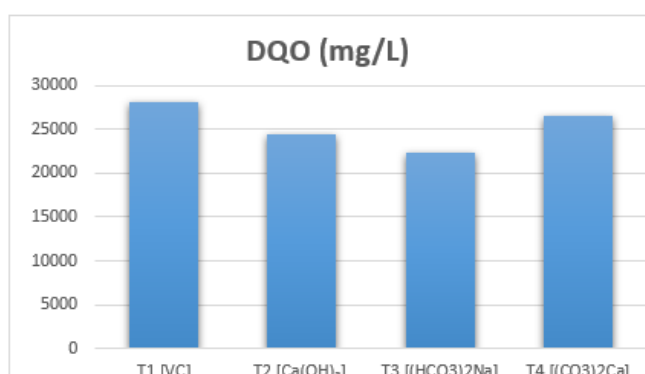


Figura 2. Medida de DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en los tratamientos.

Efecto biofertilizante

El análisis de varianza (ANOVA) no mostró diferencias estadísticamente significativas ($P>0,05$) entre los tratamientos evaluados en términos de altura y número de hojas de las plantas. Este resultado concordó con lo señalado por Pino et al. (2022) y Torres et al. (2022) al sugerir que la variabilidad en los efectos de la vinaza impidió diferencias significativas cuando no se controlaron factores ambientales claves, como el tipo de suelo, la humedad y los niveles de nutrientes.

Aun ante la ausencia de significancia estadística, los resultados descriptivos reflejaron ciertas tendencias en la respuesta de las plantas a los tratamientos. Como se observó en la tabla 3, en la mayoría de los casos (T2, T3 y T4), hubo una relación positiva entre la altura de las plantas y el número de hojas, sugiriendo una posible correlación entre ambas variables (Aditiawati et al., 2021). Sin embargo, el ritmo de crecimiento no fue uniforme, lo que indicó que factores como el tipo de tratamiento y el tiempo de evaluación influyeron en el desarrollo de las plantas.

Tabla 3. Crecimiento de plantas silvestres durante los días de muestreo.

Tratamiento	Altura promedio (cm)			Número de hojas			Especies identificadas
	9	16	Días 23	9	16	23	
T1 (Vinaza + CO_3Ca)	16,25	17,75	32,25	22,25	23,5	28,75	<i>Rauvolfia tetraphylla</i> <i>Streblus asper</i> <i>Heliotropium indicum</i> <i>H. indicum</i>
T2 (vinaza + NaHCO_3)	11,25	13,75	16,75	10,75	13,75	19	<i>Tabernanthe sp.</i> <i>Terminalia catappa</i> <i>Allamanda cathartica</i> <i>Heritiera sp.</i>
T3 (vinaza + $\text{Ca}(\text{OH})_2$)	15,5	23,5	26	16,5	24,5	25,75	<i>Nicotiana tabacum</i> <i>H. angiospermum</i> <i>Picconia excelsa</i> , <i>Blumea balsamifera</i>
T4 (Vinaza pura)	9,75	12,75	20,5	10,75	11,75	25,25	<i>H. angiospermum</i>
T5 (Agua - testigo)	13,25	27,25	31,75	19,00	27,75	34,5	<i>Acroceras sp.</i> <i>Streblus</i>

En términos de altura promedio, el tratamiento T1 (Vinaza + CO_3Ca) mostró un incremento notable, alcanzando $32,25 \pm 6,83$ cm al día 23. Este resultado reflejó una interacción positiva entre la vinaza y el carbonato de calcio, en la cual la vinaza actuó como una fuente rica en nutrientes, incluyendo nitrógeno, fósforo y potasio, esenciales para el crecimiento vegetal, mientras que el calcio fortaleció la estructura celular y mejoró la absorción de fósforo (Weng et al., 2022). En estudios previos, se ha observado que la vinaza mejoró significativamente el crecimiento en cultivos como la soya y la coliflor, lo que respaldó su eficacia como biofertilizante (González et al., 2018; Ma'rufah et al., 2020). Además, la vinaza puede reemplazar parcialmente los fertilizantes convencionales, cubriendo hasta el 50% del nitrógeno, 40% del fósforo y 100% del potasio necesarios, convirtiéndola en una fuente nutritiva eficiente y sostenible (Mahmoud et al., 2019).

Por otro lado, el tratamiento testigo (T5) con agua, aunque mostró una altura promedio de $31,75 \pm 6,83$ cm al día 23, tuvo un desarrollo más uniforme a partir del día 16. Este comportamiento resaltó la importancia del agua en procesos fundamentales

como la fotosíntesis, el transporte de nutrientes y la turgencia celular, lo que explicó el crecimiento estable de las plantas sin la aplicación de fertilizantes adicionales (Mahajan et al., 2024). Sin embargo, el hecho de que el testigo tuviera un desarrollo comparable al tratamiento con vinaza no implicó que la vinaza no aportó beneficios. El uso de vinaza en T1 no solo favoreció el crecimiento de las plantas en términos de altura, sino que también mejoró su nutrición general, lo cual puede ser crucial para la salud a largo plazo de las plantas y su capacidad para enfrentar condiciones adversas. De hecho, según Ma'rufah et al. (2020) la aplicación de vinaza también aportó compuestos que favorecieron la calidad del suelo y la retención de nutrientes, lo que podría tener impactos positivos en futuros ciclos de crecimiento.

Por otro lado, los tratamientos T2 (Vinaza + NaHCO_3) y T3 (Vinaza + Ca(OH)_2) registraron menores incrementos en altura, alcanzando $16,75 \pm 6,83$ cm y $26,00 \pm 6,83$ cm al día 23, respectivamente. La vinaza no tratada (T4), si bien mostró un aumento moderado en la altura promedio (20,5 cm), destacó particularmente por el desarrollo del número de hojas, alcanzando un promedio de $25,25 \pm 5,64$ hojas al día 23, un comportamiento que podría estar asociado con la composición fisicoquímica del tratamiento. En términos de número de hojas, con relación al testigo (T5) solo con agua presentó el valor más elevado con $34,50 \pm 5,64$ hojas, lo cual sugirió un desarrollo foliar óptimo en ausencia de vinaza.

Este comportamiento puede explicarse por la variabilidad en la eficacia de la vinaza, ya que su desempeño como biofertilizante dependió de factores como la especie tratada y las condiciones del suelo. Bridhikitti et al. (2023) destacaron que su efectividad estuvo influenciada por el tipo de suelo, los procesos de pretratamiento y las condiciones ambientales. Asimismo, Pino et al. (2022) y Zamarreño et al. (2022) sugirieron que la vinaza obtenida a partir de tejidos vegetales de caña de azúcar contenía fitoreguladores que contribuyeron al crecimiento vegetal. No obstante, su aplicación debe ajustarse a las condiciones específicas del entorno para maximizar sus beneficios.

La figura 2 resaltó la notable respuesta de *Heliotropium angiospermum* en el tratamiento T5 (testigo), alcanzando una altura máxima de 60 cm y 70 hojas al día 23. Esto confirmó el potencial de crecimiento de esta especie bajo condiciones óptimas y sin la influencia de la vinaza, coincidiendo con los hallazgos de Knauf et al. (2021) quienes argumentaron que las plantas en su estado natural aprovecharon eficientemente los recursos disponibles cuando no estuvieron expuestas a fuentes externas de materia orgánica.

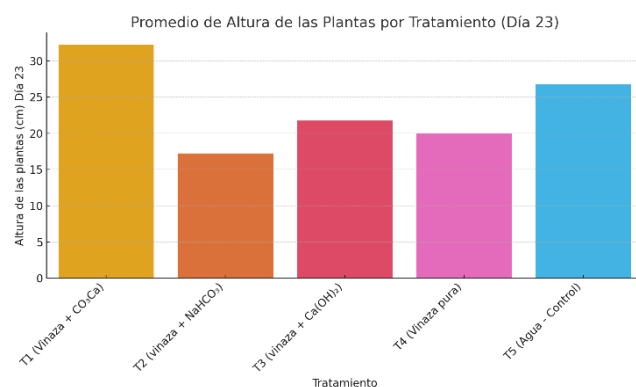


Figura 3. Altura de las plantas al día 23 por especie y tratamiento.

Los tratamientos con vinaza mostraron efectos diferenciados en el crecimiento en altura según el tipo de enmienda utilizada. En T1 (Vinaza + CO_3Ca), especies como *Rauvolfia tetraphylla* y *H. indicum* alcanzaron alturas destacadas, con promedios superiores a $38 \text{ cm} \pm 2,5$, lo cual respaldó la hipótesis planteada por Stephen et al. (2024) sobre la sinergia positiva entre la vinaza y fuentes de calcio carbonatado. En contraste, los tratamientos T2 (Vinaza + NaHCO_3) y T3 (Vinaza + Ca(OH)_2) presentaron respuestas más heterogéneas, con promedios de altura inferiores, lo cual podría explicarse por la limitada disponibilidad de micronutrientes como el hierro y el manganeso, según lo propuesto por Sagwal et al. (2023). El tratamiento 4 que empleó vinaza sin adición alcalina, logró respuestas notables especialmente en *H. angiospermum*, lo que sugirió que en ciertas especies el efecto estimulante de la vinaza no requirió ajustes de pH ni sinergias químicas adicionales. Estos resultados confirmaron que la combinación de vinaza con ciertas enmiendas potenció el crecimiento vegetal dependiendo de la especie y la formulación utilizada.

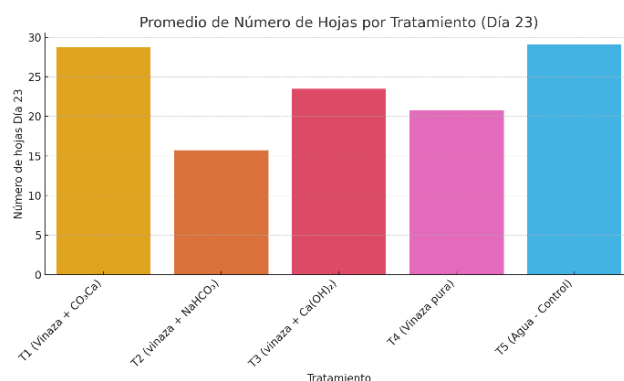


Figura 4. Número de hojas al día 23 por especie y tratamiento.

La variabilidad en el desarrollo foliar fue evidente entre los tratamientos, siendo T1 y T4 los más efectivos en estimular la formación de hojas. En T1, se observó un número elevado de hojas en *R. tetraphylla* y *H. indicum*, lo cual sugirió una respuesta fisiológica favorable atribuible al calcio proveniente del CO_3Ca , elemento clave en la división celular y la expansión foliar. Por otro lado, T4 (vinaza no tratada) destacó significativamente en *H. angiospermum*, con registros de hasta 61 hojas por planta, lo que confirmó el potencial bioestimulante de la vinaza en aplicaciones dirigidas, en concordancia con lo descrito por Jolayemi et al. (2022). En contraste, los tratamientos con NaHCO_3 y Ca(OH)_2 (T2 y T3) indujeron un desarrollo foliar más limitado, posiblemente debido a efectos osmóticos adversos o a la reducción en la disponibilidad de nutrientes esenciales. Estos resultados respaldaron el uso estratégico de biofertilizantes derivados de subproductos agroindustriales, especialmente en fases tempranas de desarrollo, donde la densidad foliar fue un indicador clave del vigor vegetal.

Efecto herbicida

El análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto herbicida, a través del porcentaje de quemadura y el crecimiento de las plantas, mostró resultados claros. En cuanto al porcentaje de quemadura, el *p*-valor de 0,2655 indicó que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos, lo que sugirió que los herbicidas no causaron efectos notables en el daño foliar. Las medias de los tratamientos fueron similares (entre 0,29 y 0,65), y la baja desviación estándar de 0,15 reflejó poca variabilidad en la respuesta, lo que confirmó la ausencia de un impacto significativo en las quemaduras. Sin embargo, esto podría indicar una alta variabilidad entre especies y la falta de homogeneidad en la respuesta a los tratamientos, como ha sido documentado en estudios previos sobre variabilidad genética en plantas (Chuchert et al., 2022).

Respecto a la altura, que en este contexto se interpretó como un indicador inverso del efecto herbicida (menor altura implicó mayor eficacia), el *p*-valor de 0,0021 mostró que hubo diferencias significativas entre los tratamientos. La prueba múltiple de Tukey (tabla 4) reveló que el tratamiento con vinaza no tratada (T4) presentó las mayores alturas (20,25 cm), lo que sugirió que este tratamiento tuvo un efecto herbicida menor. En cambio, los tratamientos con vinaza combinado con NaHCO_3 (T2) y Ca(OH)_2 (T3) mostraron alturas más bajas (10,50 cm y 10,75 cm), lo que implicó un mejor efecto herbicida. La desviación estándar de 1,56 en la altura mostró mayor variabilidad en la respuesta de las plantas en comparación con las quemaduras, lo que señaló que el efecto sobre el crecimiento fue más notorio.

Tabla 4. Comparación de las alturas de las plantas según los tratamientos.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	Grupo estadístico
T4 (Vinaza pura)	20,25	4	1,56	A
T5 (Agua - Control)	16,25	4	1,56	A B
T1 (Vinaza + CO_3Ca)	12,75	4	1,56	B
T3 (Vinaza + Ca(OH)_2)	10,75	4	1,56	B
T2 (Vinaza + NaHCO_3)	10,5	4	1,56	B

Test: Tukey, Alfa = 0,05, DMS = 6,81212,

E.E.= error estándar.

Error: 9,7333, **gl:** 15

Estadísticamente, los tratamientos con vinaza combinada con CO_3Ca , Ca(OH)_2 , NaHCO_3 y como NaHCO_3 y Ca(OH)_2 , demostraron ser más efectivos como herbicidas, reduciendo el crecimiento vegetal de manera más consistente. Estos resultados concordaron con lo reportado por Luz et al. (2021), quienes mencionaron que las fracciones de vinaza produjeron actividad fitotóxica contra las malezas.

Aun ante la evidencia estadística en la reducción del crecimiento, el análisis descriptivo del porcentaje de quemaduras foliares y su relación con la altura de las plantas mostró tendencias interesantes. Se observó una mayor presencia de plantas con quemaduras subletales, lo que sugirió un efecto acumulativo en la estructura foliar y el desarrollo de las especies analizadas. Como se evidenció en la figura 3, la interacción entre el daño foliar y el crecimiento de las plantas parece seguir un patrón consistente, lo que podría indicar según Chen et al. (2021) un mecanismo de respuesta fisiológica ante el estrés inducido por los tratamientos.

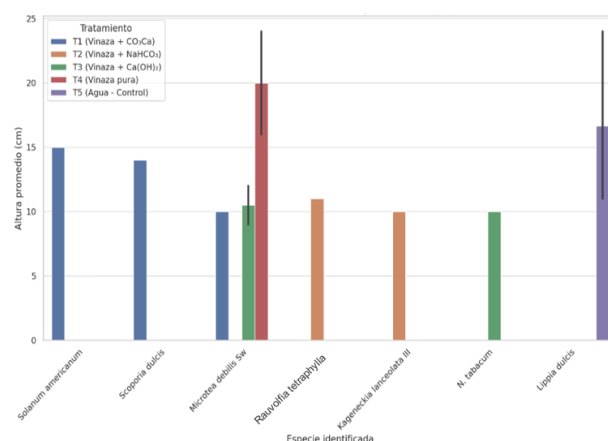


Figura 5. Altura promedio de plantas quemadas según tratamiento y especies.

El tratamiento T1 (vinaza + CO_3Ca) afectó a *Solanum americanum*, que presentó una altura promedio de 15 cm y un 70% de quemaduras, indicando alta susceptibilidad. En

Scoporia dulcis, con una altura promedio de 14 cm y un 40% de quemaduras, se observó mayor resistencia. Por su parte, *Microtea debilis* alcanzó 10 cm de altura con un 50% de quemaduras, evidenciando una afectación moderada (tabla 5). Este patrón de daño concordó con lo reportado por Hamouzová et al. (2023) quienes indicaron que los compuestos cálcicos aumentaron la eficacia herbicida en plantas sensibles debido a la alteración del pH foliar, lo cual también se observó en los resultados de este estudio.

Tabla 5. Plantas con quemaduras subletales (6-90%).

Tratamiento	Altura promedio (cm)	Porcentaje de quemaduras (%)	Especie identificada
T1 (Vinaza + CO ₃ Ca)	15	70	<i>Solanum americanum</i>
T1 (Vinaza + CO ₃ Ca)	14	40	<i>Scoporia dulcis</i>
T1 (Vinaza + CO ₃ Ca)	10	50	<i>Microtea debilis</i>
T2 (Vinaza + NaHCO ₃)	11	47	<i>Rauvolfia tetraphylla</i>
T2 (Vinaza + NaHCO ₃)	10	52	<i>Kageneckia lanceolata III</i>
T3 (Vinaza + Ca(OH) ₂)	12	60	<i>M. debilis</i>
T3 (Vinaza + Ca(OH) ₂)	10	40	<i>N. tabacum</i>
T3 (Vinaza + Ca(OH) ₂)	9	25	<i>M. debilis</i>
T4 (Vinaza no tratada)	16	80	<i>M. debilis</i>
T4 (Vinaza no tratada)	24	50	<i>M. debilis</i>

El tratamiento T2 (vinaza + NaHCO₃) generó un 47% de quemaduras en *Rauvolfia tetraphylla* con una altura promedio de 11 cm, mientras que *Kageneckia lanceolata III* presentó un 52% de quemaduras y una altura de 10 cm. Estos resultados indicaron una afectación moderada en ambas especies, posiblemente debido a la deshidratación celular por estrés osmótico causada por bicarbonatos, como señalaron Azevedo et al. (2024). En el tratamiento T3 (vinaza + Ca(OH)₂), *M. debilis* mostró diferencias significativas en el daño recibido, con quemaduras del 60 y 25% y alturas de 12 cm y 9 cm, respectivamente. De manera similar, *Nicotiana tabacum* registró un 40% de quemaduras y una altura de 10 cm, evidenciando una susceptibilidad intermedia. Según Ferreira et al. (2021) este tipo de efectos podría estar relacionado con una cutícula más gruesa en algunas especies, lo que redujo la penetración del tratamiento, esto podría explicar la menor afectación en *N. tabacum* y parte de las variaciones observadas en *M. debilis*.

El tratamiento T4 (vinaza no tratada) produjo efectos contrastantes en *M. debilis*, que presentó quemaduras del 80

y 50%, con alturas de 16 cm y 24 cm, respectivamente. Aun ante la presencia de daño significativo, las plantas mostraron un crecimiento compensatorio, lo que sugirió la activación de mecanismos de recuperación post-estrés. Este hallazgo coincidió con lo propuesto por Bridhikitti et al. (2023), quienes indicaron que las plantas activaron mecanismos de recuperación tras un estrés severo, incluida la sequía, la toxicidad de los metales y la salinidad. Durante el estrés por sequía, los cloroplastos desempeñaron un papel crucial en la activación de respuestas protectoras y mecanismos de reparación tras la rehidratación (Chen et al., 2021).

Finalmente, el tratamiento T5 (agua - testigo) aplicado a *L. dulcis* resultó en alturas de 15, 24 y 11 cm, con quemaduras del 70, 40 y 50%, respectivamente. Aunque este tratamiento no implicó compuestos herbicidas, la presencia de quemaduras bajo condiciones controladas podría sugerir una posible influencia de factores ambientales o predisposición previa (tabla 6). La vinaza es apreciada por su capacidad para mejorar la fertirrigación, una aplicación excesiva puede causar salinización del suelo y toxicidad, afectando negativamente la salud de las plantas (Yin et al., 2019). No obstante, Portocarrero et al. (2023) mencionaron que su uso a largo plazo en campos de caña de azúcar ha mostrado beneficios, como un aumento en la disipación de herbicidas atrazina y ametrina en un 45 y 33%, respectivamente, en comparación con sistemas de fertilización convencionales, lo que sugirió su potencial para mejorar la sostenibilidad de los suelos agrícolas.

Tabla 6. Plantas con quemaduras letales (100%).

Tratamiento	Altura promedio (cm)	Especie identificada
T1 (Vinaza + CO ₃ Ca)	12	<i>Cyanthillium cinereum</i>
T4 (Vinaza no tratada)	20	<i>Marsdenia</i> sp.

Las plantas que experimentaron un 100% de quemaduras foliares fueron clasificadas como letalmente afectadas, mostrando un colapso total en su estructura foliar. En el tratamiento T1 (Vinaza + CO₃Ca), *Cyanthillium cinereum* presentó una altura promedio de 12 cm, evidenciando un daño letal considerable. Este resultado está en línea con investigaciones previas, las cuales indicaron que la vinaza, por su alta concentración de nutrientes y compuestos orgánicos, puede alterar el pH del suelo, afectando la absorción de nutrientes y generando un estrés fisiológico extremo en las plantas (Luz et al., 2020). En comparación, el tratamiento T4, con vinaza no tratada, provocó un daño letal en *Marsdenia*, que, aunque mostró una altura promedio de 20 cm, presentó una pérdida total de su estructura foliar, indicando que la vinaza no tratada es igualmente fitotóxica, aunque con un menor impacto sobre la altura de las plantas en comparación con

T1. Estos hallazgos coincidieron con estudios previos que han documentado la alta toxicidad de la vinaza sobre diversas especies vegetales. Tal es el caso de Brito et al. (2024) que mencionó que altas concentraciones pueden ser tóxicas para algunas plantas acuáticas, ciertas especies como *Eichhornia crassipes* mostraron tolerancia a concentraciones de vinaza del 10 al 20%.

Por otro lado, el tratamiento T5, con agua (testigo), mostró que *Richardia scabra* alcanzó una altura promedio de 15 cm, sin efectos letales inmediatos, pero con una ligera disminución en su crecimiento. Este resultado resaltó la importancia de factores adicionales, como la competencia por recursos y las condiciones ambientales, que también influyeron en el desarrollo de las plantas, como sugirieron estudios que analizaron el estrés hídrico y la dinámica del suelo en presencia de nutrientes orgánicos (Parise et al., 2021; Rehling et al., 2021). La comparación con estos estudios mostró que, aunque la vinaza tiene un gran potencial como herbicida, su efectividad y los daños dependieron de la dosis aplicada, el tipo de vinaza y la tolerancia específica de cada especie.

Tabla 7. Plantas resistentes (0%-5%).

Tratamiento	Porcentaje de quemaduras	Especie identificada
T2 (Vinaza + NaHCO ₃)	5	<i>Symphyotrichum subulatum</i>
T4 (vinaza no tratada)	2	<i>Microtea debilis</i>

En contraste con las plantas letalmente afectadas, las resistentes mostraron un nivel mínimo de quemaduras foliares. Estas especies demostraron una alta tolerancia a los tratamientos aplicados. En esta categoría, *Symphyotrichum subulatum* (T2, vinaza + NaHCO₃) mostró un 5% de quemaduras, mientras que *M. debilis* (T4, vinaza no tratada) presentó solo un 2% de quemaduras. Estos resultados sugieren que la vinaza, tanto en combinación con bicarbonato de sodio como pura, fue menos efectiva en estas especies específicas, lo que indicó una variabilidad significativa en la respuesta de las plantas a los tratamientos herbicidas. La tolerancia observada en estas especies podría estar relacionada con mecanismos fisiológicos o bioquímicos que les permiten resistir los efectos de los compuestos presentes en la vinaza sin sufrir daños significativos en la estructura foliar. La resistencia a los herbicidas en las plantas implica mecanismos fisiológicos y bioquímicos complejos. La selectividad puede ocurrir a través de factores físicos o procesos fisiológicos que afectan la retención, penetración, movimiento y desintoxicación de los herbicidas (Gwatidzo et al., 2023).

Conclusión

El tratamiento de la vinaza con CaCO₃, NaHCO₃ y Ca(OH)₂ mejora significativamente su calidad, reduciendo la conductividad eléctrica en más del 99% y manteniendo la salinidad dentro de los límites agrícolas aceptables. Además, el ajuste del pH a valores más cercanos a la neutralidad y la disminución de la DBO₅ sugieren que estos tratamientos pueden mitigar el impacto ambiental de la vinaza y hacerla más viable para su uso agrícola.

La vinaza tratada con CaCO₃ mostró un efecto biofertilizante más pronunciado, favoreciendo el crecimiento de ciertas especies como *Heliotropium angiospermum*, *Rauvolfia tetraphylla* y *H. indicum*. Sin embargo, el desempeño varió según el tratamiento y la especie evaluada, lo que indicó que su efectividad como biofertilizante depende de factores específicos como la composición del suelo y las características de la planta.

La vinaza combinada con compuestos cálcicos, especialmente NaHCO₃ y Ca(OH)₂, muestra un efecto herbicida significativo al reducir el crecimiento de las plantas (T1 y T4). Sin embargo, su impacto en las quemaduras foliares es variable según la especie, evidenciando diferencias en susceptibilidad y mecanismos de resistencia. Aunque algunos tratamientos causaron efectos letales en ciertas plantas, otras mostraron tolerancia, lo que resalta la necesidad de ajustar las dosis y evaluar su selectividad para un uso eficaz y sostenible como bioherbicida.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

Referencias bibliográficas

- Aditiawati, P., Viridi, S., Palupi, S., Rostiani, R., Samosir, M. D. y Primaresti, P. D. (2021). Mathematical modelling of soybean var. Anjasmoro plant growth. *Journal of Physics: Conference Series*, 2072(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2072/1/012009>
- Anggraini, D., Idris, M. y Rahmadina, R. (2024). Effectiveness of eco farming as organic fertilizer on vegetative growth Basil (*Ocimum basilicum* L.). *Jurnal Biologi Tropis*, 24(1), 774-780. <https://doi.org/10.29303/jbt.v24i1.6694>
- Atero, S., Izquierdo, M. J., García, C., Rodríguez, M., Navarro, I. y Navarro, E. (2024). An evaluation of the effectivity of the green leaves biostimulant on lettuce growth, nutritional quality, and mineral element efficiencies under optimal growth conditions. *Plants*, 13(7), 917. <https://doi.org/10.3390/plants13070917>
- Azevedo, V. M., Fernandes, J. A., De Souza Andrade, G., De Moraes, P. M., Magurran, A. E., Pelicice, F. M. y Giarrizzo, T. (2024). An overview of vinasse pollution in aquatic ecosystems in Brazil. *Environmental Management*, 74(6), 1037-1044. <https://doi.org/10.1007/s00267-024-01999-x>
- Bamba, J. N. Y., Almendrala, M. C., Caparanga, A. R. y Doma, B. T. (2021). Effect of biochemical pretreatment and nutrient supplementation on anaerobic co-digestion of sugarcane press mud and distillery effluent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 801(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/801/1/012001>
- Barroso, G. M., De Carvalho, A. J. E., Custódio, I. G., Correa, J. M., Duque, T. S., Silva, D. V., Fernandes, B. C. C.,



- Batista, L. P. y Dos Santos, J. B. (2022). Sensitivity of *Eucalyptus* clones to herbicides associated with foliar fertilizers. *Forests*, 13(9), 1490. <https://doi.org/10.3390/f13091490>
- Beltrán, M. E. y Bernal, A. A. (2022). Biofertilizantes: Alternativa biotecnológica para los agroecosistemas. *Revista Mutis*, 12(1). <https://doi.org/10.21789/22561498.1771>
- Bridhikitti, A., Kaewsuk, J., Karaket, N., Friend, R., Sallach, B., Chong, J. P. J. y Redeker, K. R. (2023). Balancing agriculture and industry through waste utilization for sugarcane sustainability. *Sustainability*, 15(20), 14711. <https://doi.org/10.3390/su152014711>
- Brito, L. F. P. D., Espíndola, E. L. G. y Ogura, A. P. (2024). Tolerance of free-floating aquatic macrophytes to sugarcane vinasse and its implications for phytoremediation strategies. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 14(4), 325-331. <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.240>
- Calcan, S. I., Pârvulescu, O. C., Ion, V. A., Răducanu, C. E., Bădulescu, L., Madjar, R., Dobre, T., Egri, D., Moș, A., Iliescu, L. M. y Jerca, I. O. (2022). Effects of biochar on soil properties and tomato growth. *Agronomy*, 12(8), 1824. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081824>
- Cárdenas, A. y Vélez, J. (2024). *Conflictos de usos del suelo como aporte a la sostenibilidad agroproductiva del bosque Politécnico de la ESPAM MFL* [bachelor Thesis, Escuela Superior Politécnica de Manabí Manuel Felix López]. <https://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/2344>
- Cedeño, E. P., Dilas, J. O. y Carrillo, M. D. (2024). Cambios de algunas propiedades químicas en tres suelos salinos, tratados con cinco enmiendas cálcicas. *Agronomía Costarricense*, 111-123. <https://doi.org/10.15517/rac.v48i1.59139>
- Chen, S., Li, P., Tan, S., Pu, X., Zhou, Y., Hu, K., Huang, W. y Liu, L. (2021). Combined proteomic and physiological analysis of chloroplasts reveals drought and recovery response mechanisms in *Nicotiana benthamiana*. *Plants*, 10(6), 1127. <https://doi.org/10.3390/plants10061127>
- Chuchert, S., Nualsri, C. y Soonsuwon, W. (2022). Genetic variability and diversity of upland rice landraces. *Turkish Journal Of Field Crops*, 27(2), 175-181. <https://doi.org/10.17557/tjfc.998285>
- De Sousa, T. A. T., Do Monte, F. P., Silva, J. V. D. N., Lopes, W. S., Leite, V. D., Van Lier, J. B. y De Sousa, J. T. (2021). Alkaline and acid solubilisation of waste activated sludge. *Water Science and Technology*, 83(12), 2980-2996. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.179>
- Duarte, F. P., Silva, A. F. R., Lange, L. C., Amaral, M. C. S., Neta, L. S. D. F. y Moravia, W. G. (2023). Vinasse processing by electrodialysis combined with nanofiltration: Emphasis on process optimization and environmental sustainability. *Water Science & Technology*, wst2023355. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.355>
- Ferreira, L. C., Moreira, B. R. D. A., Montagnolli, R. N., Prado, E. P., Viana, R. D. S., Tomaz, R. S., Cruz, J. M., Bidoia, E. D., Frias, Y. A. y Lopes, P. R. M. (2021). Green manure species for phytoremediation of soil with tebuthiuron and vinasse. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 613642. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.613642>
- Gao, W.-T. y Su, W.-H. (2024). Weed management methods for herbaceous field crops: A review. *Agronomy*, 14(3), 486. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030486>
- González Suárez A., Hernández Alfonso I. y Pereda Reyes I. (2019). Pretratamiento alcalino de bagazo de caña para mejorar la producción de biometano. *Revista Centro Azúcar*, 46, 79-88. <https://centroazucar.uclv.edu.cu>
- González, J. A., Buedo, S. E., Prado, F. E. y Álvarez, S. (2018). Efecto de la vinaza sobre el crecimiento y productividad de la Soja (*Glycine max*) en condiciones semicontroladas. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 53(4), 597-608. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v53.n4.21982>
- González, J. A., Languasco, P. y Prado, F. E. (2021). Efecto de las vinazas sobre la germinación de soja, trigo y quinoa en condiciones controladas. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 49(4), Article 4. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v49.n4.9825>
- Gwatidzo, V., Chipomho, J. and Parwada, C. (2023). Understanding mechanisms of herbicide selectivity in agro-ecosystems: A review. *Advanced Chemicobiology Research*, 77-86. <https://doi.org/10.37256/acbr.2120232351>
- Hamouzová, K., Sen, M. K., Bharati, R., Košnarová, P., Chawdhery, M. R. A., Roy, A. and Soukup, J. (2023). Calcium signalling in weeds under herbicide stress: An outlook. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1135845. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1135845>
- Házi, J., Purger, D., Penksza, K. y Bartha, S. (2023). Interaction of management and spontaneous succession suppresses the impact of harmful native dominant species in a 20-year-long experiment. *Land*, 12(1), 149. <https://doi.org/10.3390/land12010149>

- Hirzel, J., Meier, S., Morales, A., Undurraga, P. y Salazar, F. (2021). Soil chemical properties and wheat production in three Andisol with applications of materials from the cellulose industry. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 45, e0200193. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200193>
- Jolayemi, O. L., Malik, A. H., Ekblad, T., Fredlund, K., Olsson, M. E. y Johansson, E. (2022). Protein-based biostimulants to enhance plant growth—state-of-the-art and future direction with sugar beet as an example. *Agronomy*, 12(12), 3211. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123211>
- Kaur, R., Chahal, P. S., Shi, Y., Lawrence, N. C., Knezevic, S. Z. y Jhala, A. J. (2023). Effect of plant height on control of multiple herbicide-resistant Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in glufosinate/glyphosate-resistant corn. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1293293. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1293293>
- Knauf, A. E., Litton, C. M., Cole, R. J., Sparks, J. P., Giardina, C. P., Gerow, K. G. y Quiñones-Santiago, M. (2021). Nutrient-use strategy and not competition determines native and invasive species response to changes in soil nutrient availability. *Restoration Ecology*, 29(5), e13374. <https://doi.org/10.1111/rec.13374>
- Koskey, G., Mburu, S. W., Awino, R., Njeru, E. M. y Maingi, J. M. (2021). Potential use of beneficial microorganisms for soil amelioration, phytopathogen biocontrol, and sustainable crop production in smallholder agroecosystems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606308. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606308>
- Luz, D., Gomes, A., Simas, N., Heringer, O., Romão, O., Lovatti, W., Scherer, B., Filgueiras, P. and Kuster, R. (2020). Sugarcane waste products as source of phytotoxic compounds for agriculture. 9, 385-397. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2020.1885536.1007>
- Mahajan, M., Singh, R., Gupta, P. y Chelliapan, S. (2024). Quantitative assessment of irrigation water and organic/inorganic amendment on biometric growth profiles of *Abelmoschus esculentus* and *Solanum lycopersicum* and their varieties. 26(7), 1735-1752. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.394>
- Mahmoud, S., Siam, H., Taalab, A. y Mahamed, S. (2019). Significant use of vinasse as a partial replacement with chemical fertilizers sources for spinach and barley production and their effect on growth and nutrients composition of plant. *Plant Archives*, 19(1), 1593-1600.
- Ma'rufah, S., Sari, R. y Rusdiana, R. Y. (2020). Pemanfaatan vinasse sebagai pupuk organik cair untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil bunga kol (*Brassica oleracea* var. *Botrytis* L.). *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 20(1), 18. <https://doi.org/10.25181/jppt.v20i1.1552>
- Medina, J. T., Ayllon, M., Julca, C., Moreyra, G., Carrasco, L. A., Ancieta, C. A., Rodríguez, O. J., Avelino, C., Diaz, P. y Montañó, J. A. (2024). Processes coupled to electrocoagulation for the treatment of distillery wastewaters. *Sustainability*, 16(15), 6383. <https://doi.org/10.3390/su16156383>
- Mensah, M., Tia, R., Adei, E. y De Leeuw, N. H. (2022). A DFT mechanistic study on base-catalyzed cleavage of the β -O-4 ether linkage in lignin: Implications for selective lignin depolymerization. *Frontiers in Chemistry*, 10, 793759. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.793759>
- Morales Avendaño, E. D., Navarrete Álava, J., Garzón Cedeño, F. y Zambrano Lara, M. (2023). Aplicación del NaHCO_3 como estrategia físico-química para mitigar el impacto ambiental de la vinaza producida en la destilación de alcohol artesanal. *La Técnica*, 13(2), 93-101. DOI: <https://doi.org/10.33936/latecnica.v13i2.6179>
- Otoya, A., Haro, E., Gutiérrez, L. y Solís, H. (2023). *Vinaza. Evaluación de su impacto en un campo de cultivo* (69). Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.69>
- Parise, A. G., Bertoli, S. C. y Souza, G. M. (2021). Belowground interactions affect shoot growth in *Eucalyptus urophylla* under restrictive conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 16(9), 1927589. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1927589>
- Pino, A. D., 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(09):2022, 1107-1116. <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.09.p3617>
- Portocarrero, R., Vera, J., Vallejo, J., Gerónimo, E., Costa, J. y Aparicio, V. (2023). Long-term vinasse application enhanced the initial dissipation of atrazine and ametryn in a sugarcane field in Tucumán, Argentina. <https://doi.org/10.1002/ieam.4876>
- Rachman, L. M., Hartono, A., Hazra, F., Noorwicaksono, T., Wasono, K. B., Adityasari, A. D., Prabowo, B., Putri, N. y Davik. (2023). Essence, principle, and technique in utilization and converting vinasse waste to bio-organic fertilizer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1133(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012023>
- Rawajfeh, K. (2021). Precipitation of solid waste in olive mill wastewater by coagulation using calcium carbonate (CaCO_3). *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries (JJECI)*, 4(3), 78-85. <https://doi.org/10.48103/jjeci4102021>
- Rehling, F., Sandner, T. M. y Matthies, D. (2021). Biomass partitioning in response to intraspecific competition



- depends on nutrients and species characteristics: A study of 43 plant species. *Journal of Ecology*, 109(5), 2219-2233. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13635>
- Repajić, M., Cegledi, E., Zorić, Z., Pedisić, S., Elez Garofulić, I., Radman, S., Palčić, I. y Dragović-Uzelac, V. (2021). Bioactive compounds in wild nettle (*Urtica dioica* L.) leaves and stalks: polyphenols and pigments upon seasonal and habitat variations. *Foods*, 10(1), 190. <https://doi.org/10.3390/foods10010190>
- Sagwal, A., Wadhwa, P., Shubham y Kaushal, S. (2023). Essentiality of micronutrients in soil: A review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(24), 56-65. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i244297>
- Soares, A. D. A. V. L., Prado, R. D. M., Bertani, R. M. D. A., Da Silva, A. P. R., Deus, A. C. F., Kano, C. y Furlaneto, F. D. P. B. (2024). Contribution of using filter cake and vinasse as a source of nutrients for sustainable agriculture—A review. *Sustainability*, 16(13), 5411. <https://doi.org/10.3390/su16135411>
- Soukaina, N., Chaimaa, M., Kabriti, M., Abdelmotalib, N., Naamane, A., Mohamed, C. y Nadia, I. (2022). Treatment of surface treatment effluents by electrocoagulation process using aluminium electrodes. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 91-99. <https://doi.org/10.12911/22998993/143974>
- Stephen, G. S., Shitindi, M. J., Bura, M. D., Kahangwa, C. A. y Nassary, E. K. (2024). Harnessing the potential of sugarcane-based liquid byproducts—Molasses and spentwash (vinasse) for enhanced soil health and environmental quality. A systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1358076. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1358076>
- Tiwari, A. K. (2023). The role of organic farming in achieving agricultural sustainability: environmental and socio-economic impacts. *Acta Biology Forum*, 2(2), 29-32. <https://doi.org/10.51470/ABF.2023.2.2.29>
- Torres, M. A., Valdez, A. L., Angelicola, M. V., Raimondo, E. E., Pajot, H. F. y Nieto, C. G. (2022). *Cultivation of plant-growth promoters in vinasse: Contributions for a circular and green economy*. Bioengineering. <https://doi.org/10.1101/2022.12.28.522132>
- Toscano, P., Cutini, M., Cabassi, G., Pricca, N., Romano, E. y Bisaglia, C. (2022). Assessment of a deep burial destoning system of agrarian soils alternative to the stone removal and on-site crushing. *AgriEngineering*, 4(1), 156-170. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010011>
- Vieira, G. S., Fonseca, A. U., Rocha, B. M., Sousa, N. M., Ferreira, J. C., Felix, J. P., Lima, J. C. y Soares, F. (2022). Insect predation estimate using binary leaf models and image-matching shapes. *Agronomy*, 12(11), 2769. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112769>
- Weng, X., Li, H., Ren, C., Zhou, Y., Zhu, W., Zhang, S. y Liu, L. (2022). Calcium regulates growth and nutrient absorption in poplar seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 13, 887098. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.887098>
- Yin, J., Deng, C. y Wang, X. (2019). Effects of long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. *Sugar Tech.* 21, 62-70. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0630-2>
- Zielińska, M., Bułkowska, K. y Mikucka, W. (2021a). Valorization of distillery stillage for bioenergy production: A review. *Energies*, 14(21), 7235. <https://doi.org/10.3390/en14217235>

Declaración de contribución a la autoría según CRediT

Washington Agapo Guzmán Paredes: conceptualización, investigación, curación de datos, redacción – borrador original. **Ever Darío Morales Avendaño:** conceptualización, metodología, supervisión, redacción – revisión y edición.