

Efecto de la aplicación de tres enmiendas edáficas en las características químicas de dos suelos ácidos

Effect of the chemical characteristics of two acid soils on the application of three edaphic amendments

Gisella Katiuska Calero Bravo ^{1,2}, Diego Ricardo Villaseñor Ortiz ^{1,3}, Julio Enrique Chabla Carrillo ^{1,4}, Irán Rodríguez Delgado ^{1,5}, Ángel Eduardo Luna Romero ^{1,6}.

¹Universidad Técnica de Machala. ²✉ gcalero1@utmachala.edu.ec; ³✉ dvillaseñor@utmachala.edu.ec; ⁴✉ jchabla@utmachala.edu.ec; ⁵✉ irodriguez@utmachala.edu.ec; ⁶✉ aeluna@utmachala.edu.ec



<https://doi.org/10.15446/acag.v72n4.106387>

2023 | 72-4 p 209-216 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-12-16 Acep.: 2024-06-04

Resumen

La acidez del suelo es un factor crítico que limita el rendimiento agrícola y representa una de las principales formas de degradación del suelo. Para abordar este problema, es esencial aplicar enmiendas edáficas que puedan restaurar las condiciones óptimas del suelo. El presente estudio evaluó el impacto de 3 enmiendas edáficas –carbonato de calcio (CaCO₃), ceniza y biocarbón de origen vegetal– sobre las propiedades químicas del suelo, incluyendo el pH, la conductividad eléctrica (CE), el carbono orgánico (CO) y la materia orgánica del suelo (MOS), en 2 localidades de la provincia de El Oro, Ecuador. Se utilizó un experimento factorial en parcelas sub-subdivididas completamente al azar, en el que se evaluaron 297 recipientes con 250 g de suelo en cada localidad y se aplicó un análisis de varianza factorial intergrupos para determinar la presencia o no de diferencias estadísticas entre enmiendas, en distintos tiempos de incubación. Así mismo, se aplicaron 3 tipos de enmiendas con 11 dosis crecientes, en 3 períodos de incubación y 3 repeticiones. Los resultados demostraron que la aplicación de cal agrícola incrementó significativamente los niveles de pH en cloruro de potasio (KCl) en ambas localidades. La adición de ceniza resultó en un aumento de la conductividad eléctrica, lo cual mejoró la fertilidad general del suelo. El uso de cal agrícola fue especialmente efectivo en incrementar los niveles de materia y carbono orgánicos en la localidad 1, aunque en localidad 2 el biocarbón mostró un impacto positivo en estas mismas propiedades. Estos hallazgos subrayan la importancia de las enmiendas, tanto químicas como orgánicas, en la posible corrección de las propiedades químicas del suelo, lo que las convierte en alternativas viables para mejorar la salud del suelo y aumentar los rendimientos agrícolas.

Palabras claves: acidez de suelos, degradación de suelos, dosis, medidas correctivas, mejora de productividad, recuperación de suelos.

Abstract

Soil acidity is a critical factor that limits agricultural yield and represents one of the main forms of soil degradation. To address this problem, it is essential to apply amendments that can restore optimal soil conditions. This study evaluated the impact of 3 soil amendments –calcium carbonate (CaCO₃), ash, and biochar of plant origin– on the chemical properties of the soil, including pH, electrical conductivity (EC), organic carbon (OC), and soil organic matter (SOM), in 2 locations in the province of El Oro, Ecuador. A factorial experiment was conducted using completely randomized split-split plot designs, evaluating 297 containers with 250 g of soil in each location. An intergroup factorial analysis of variance was applied to determine the presence of statistical differences between amendments at different incubation times. 3 types of amendments were applied at 11 increasing doses, over 3 incubation periods, and with 3 replications. The results showed that the application of agricultural lime significantly increased pH levels in potassium chloride (KCl) in both locations. The addition of ash resulted in an increase in electrical conductivity, thereby improving the overall soil fertility. The use of agricultural lime was particularly effective in increasing organic carbon and organic matter levels in location 1, whereas in location 2, biochar showed a positive impact on these same properties. These findings underscore the importance of both chemical and organic amendments in the potential correction of soil chemical properties, presenting them as viable alternatives to improve soil health and increase agricultural yields.

Keywords: doses used, corrective measures, productivity improvement, soil acidity, soil recovery.

Introducción

La degradación de los suelos es un problema generado por cambios en el uso y prácticas de manejo específicas de cada cultivo. Estas prácticas causan modificaciones paulatinas en el potencial productivo de los suelos (Jamioy *et al.*, 2015). Este efecto limita el desarrollo de los cultivos, sin embargo, puede mitigarse mediante el uso de correctivos agrícolas (Luna *et al.*, 2021). En Ecuador el 24 % de la superficie agrícola presenta suelos ácidos (Chico, 2019). Los suelos de los órdenes inceptisol y ultisol, por lo general, poseen un pH ácido, baja fertilidad y alto contenido de aluminio (Al^{+++}), que puede ser tóxico para el normal desarrollo de las raíces (Calva y Espinosa, 2017). Por lo tanto, es necesario el uso de programas a base de enmiendas que busquen corregir las alteraciones degradantes que puedan ocasionar las condiciones de acidez en el suelo (Sadeghian y Marín, 2020).

El origen de la acidez en los suelos se debe a la pérdida de bases intercambiables, cuyo efecto es producido cuando los iones de calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), potasio (K^+) y sodio (Na^+) son reemplazados por iones de hidrógeno (H^+) en los sitios de intercambio (Álvarez y Rimski-Korsakov, 2015), lo que influye en las características químicas y biológicas del suelo (Valerio y Molina, 2012). Otras formas de degradación incluyen la disminución de los niveles de salinidad, medida por la conductividad eléctrica, así como los niveles de carbono orgánico y materia orgánica (Estrada-Herrera *et al.*, 2017). Los compuestos usados como correctivos deben contener fuentes minerales de origen natural o industrial que puedan reponer las pérdidas de bases cambiables en el suelo y mejorar las condiciones de acidez (Castro y Munévar, 2013).

Según Hirzel *et al.* (2017), la principal estrategia para manejar y controlar la acidez del suelo es el uso de enmiendas calcáreas, como el carbonato de calcio ($CaCO_3$). En este sentido, Calva y Espinosa (2017) destacan que las enmiendas, mejoran las condiciones físicas y microbiológicas del suelo, mediante el incremento del pH. De la misma forma, Combatt *et al.* (2017) afirman que una técnica común para suprimir la acidez de los suelos ácidos corresponde al uso de otros compuestos químicos alcalinos, como el carbonato de calcio y magnesio (cal dolomita), y el carbonato de calcio (cal agrícola). Pérez (2016) señala que usar estos compuestos mejoran el pH del suelo, así como la actividad microbiana y la asimilación de nitrógeno orgánico y azufre por el sistema de raíces de las plantas.

En este contexto, las cenizas, fruto de la combustión de biomasa vegetal, también se han usado para aliviar las deficiencias nutricionales en plantaciones de suelos ácidos (Solla-Gullón *et al.*, 2001; Arias-Cedeño *et al.*, 2021). Estos autores indican que las cenizas incrementan el pH del suelo y mejoran las

concentraciones de fosfatos, calcio y magnesio, que contribuyen a incrementar la producción. Además, Downie *et al.* (2009) y Santalla *et al.* (2011) ratifican que las cenizas mejoran tanto el estado nutricional de los cultivos, como la estructura del suelo debido a su doble función como fertilizante y enmendante.

Finalmente, se han verificado trabajos en los que el biocarbón, producido por pirólisis de material vegetal, ha mostrado beneficios significativos al ser aplicado en suelos, lo cual mejora sus propiedades químicas y físicas (Gómez *et al.*, 2016; Gilces, 2014). En este contexto, Omil *et al.* (2013) y Zheng *et al.* (2013) destacan sus beneficios para mejorar la actividad microbiana y optimizar el uso de nutrientes como el nitrógeno.

Ante los argumentos expuestos, la presente investigación se enfoca en evaluar el efecto de 3 enmiendas edáficas —carbonato de calcio, ceniza y biocarbón— a diferentes dosis y con distintos tiempos de incubación (30, 60 y 90 días), sobre las características químicas (pH en KCl, conductividad eléctrica, carbono y materia orgánicos del suelo) de 2 localidades (Dumarí y El Guabo) de la provincia de El Oro, Ecuador.

Materiales y métodos

Localización y caracterización del área de procedencia de las muestras de suelo

Las muestras de suelo se extrajeron de 2 localidades específicas en la provincia de El Oro: Dumarí se encuentra situada a 1200 m s. n. m., en las coordenadas 79°35'05" longitud sur y 3°27'03" latitud oeste, está caracterizada por un clima subtropical húmedo, temperaturas que oscilan entre 21 °C y 30 °C, humedad relativa promedio del 78 % y precipitaciones anuales aproximadas de 950 mm (Ecuador - GAD Municipal de Chilla, 2014). El Guabo se encuentra ubicado a una altitud de 180 m s. n. m., en las coordenadas 79°84'42" longitud sur y 3°24'12" latitud oeste, donde predomina un clima subtropical, megatérmico seco a semihúmedo (Kottek *et al.*, 2006).

Dumarí y El Guabo presentan suelos pertenecientes a los órdenes oxisol e inceptisol, clasificados específicamente como alfic ustox y oxic dystrudepts, respectivamente (Espinosa *et al.*, 2022).

Recolección de muestras de suelos

En cada localidad (Dumarí y El Guabo) se tomó una muestra de suelo del horizonte A, a partir de un recorrido en zigzag, donde se realizaron perforaciones para extraer aproximadamente 8 kg de suelo, en 20 submuestras y a una profundidad estándar de 20 cm, las cuales fueron homogeneizadas con la finalidad de conformar una muestra compuesta (Osorio y

Casamitjana, 2011) y representativa (Hernández *et al.*, 2014), para un total de 160 kg de suelo por localidad. Posteriormente, fueron secadas y tamizadas con una malla de 2 mm previo al análisis de laboratorio (Vargas, 2010).

Diseño experimental

Para el desarrollo del estudio se planteó un experimento factorial en parcelas sub-subdivididas completamente al azar fraccionado en 3x3x11, en el cual se manipularon 3 factores de estudio: enmiendas orgánicas (carbonato de calcio, ceniza de caña de azúcar y biocarbón); tiempo de incubación (30, 60 y 90 días) y dosis de enmiendas (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 t ha⁻¹), lo cual generó 99 unidades experimentales por cada localidad. La parcela principal consistió en los 3 tipos de enmiendas edáficas; las subparcelas abarcaron 3 tiempos de incubación; y las sub-subparcelas incluyeron las 11 dosis de cada enmienda, incluido el control. Las combinaciones de tratamientos se replicaron 3 veces, de forma completamente al azar en las unidades experimentales a nivel del experimento, para lo que se utilizó la tabla de números aleatorios, por ello, cada unidad experimental presentó la misma probabilidad de recibir una combinación de tratamientos cualquiera. El ensayo se condujo entre febrero y junio de 2022, bajo un control adecuado del material y entorno experimental.

En las unidades experimentales (recipientes plásticos de 500 g de capacidad) se añadieron 250 g de suelo (representan proporcionalmente 1 ha de terreno) tratado con las enmiendas, según las dosis establecidas en la Tabla 1. Posteriormente, se procedió a la homogenización y humectación por capilaridad, dejando drenar el exceso de agua durante 24 horas antes de estabilizar el peso para el ensayo. La reposición de agua se efectuó con un gotero, 2 veces por semana, ajustando el peso a las condiciones iniciales. Las muestras de suelo fueron expuestas a un periodo de incubación dentro del laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de

la Universidad Técnica de Machala, por 30, 60 y 90 días, en un ambiente con una temperatura promedio entre 25 y 26 °C de temperatura.

Métodos de análisis

Se analizaron el pH y la conductividad eléctrica (CE) utilizando una relación suelo-agua de 1:2 (10 g de suelo a 20 ml de agua destilada). Para el pH en KCl se empleó la misma proporción usando una solución de KCl 1 M, conforme a lo descrito por Ames y Castillo (2014). El porcentaje de carbono orgánico (% CO) se determinó mediante el método de ignición, y para calcular el contenido de materia orgánica (% MO) se utilizó el factor empírico de 1.724 (Eyherabide *et al.*, 2014). Las determinaciones analíticas se realizaron en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de Universidad Técnica de Machala.

Procedimiento estadístico

Para conocer si se presentaron o no diferencias estadísticas significativas entre las combinaciones de tratamientos generadas por los tipos de enmiendas, los tiempos de incubación y las dosis de enmiendas en función de los valores de pH en KCl, CE, % CO y % MO, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) factorial intergrupos, previo cumplimiento a los requisitos de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas. Cuando se presentaron diferencias entre las combinaciones de tratamientos o los tratamientos en cada factor de estudio se aplicó la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey, mediante el software AGROESTAT® (Barbosa y Maldonado, 2010).

Resultados

Efecto de las enmiendas sobre el pH en KCl

La prueba ANOVA para el efecto de las enmiendas (cal, ceniza y biocarbón) en las 2 localidades mostraron diferencias significativas a los 30, 60 y 90 días (Tabla 1). Esto indica que los 3 tipos de enmiendas, los periodos de incubación y su interacción (E x T) influyeron significativamente en el incremento del pH en KCl. La cal agrícola demostró un efecto superior en mejorar las condiciones de pH (L1 = 6.58 y L2 = 6.41) comparado con la ceniza (L1 = 5.26 y L2 = 4.38) y el biocarbón (L1 = 4.69 y L2 = 3.92), lo cual se alineó con el objetivo de evaluar la eficacia de diferentes enmiendas en la modificación del pH del suelo (Figura 1). La variación en los tiempos de respuesta entre las localidades (90 días en L1 = 5.61 y 30 días en L2 = 5.06) se muestra en Figura 2, en la que se observa un comportamiento distinto entre las 2 localidades, lo que puede estar sujeto a distintas condiciones edafoclimáticas y al manejo agrícola, subrayando la importancia de considerar las condiciones locales en la gestión del pH del suelo.

Tabla 1. Experimento factorial en parcelas sub-subdivididas completamente al azar fraccionado en 3x3x11

Parcela principal (enmiendas)	Subparcela (tiempos de incubación)	Sub-subparcela (dosis de enmiendas t ha ⁻¹)
Carbonato de calcio	30 días	
	60 días	(0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50)
	90 días	
Ceniza de caña azúcar	30 días	
	60 días	(0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50)
	90 días	
Biocarbón	30 días	
	60 días	(0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50)
	90 días	

Efecto de las enmiendas sobre la conductividad eléctrica (CE)

Los resultados de ANOVA para la CE mostraron diferencias significativas en la respuesta a las enmiendas (cal, ceniza y biocarbón) (Tabla 3). Estos resultados confirman que las enmiendas y su interacción con los tiempos de incubación (E x T) fueron determinantes en el incremento de la CE; en ellos, la ceniza mostró un impacto particularmente

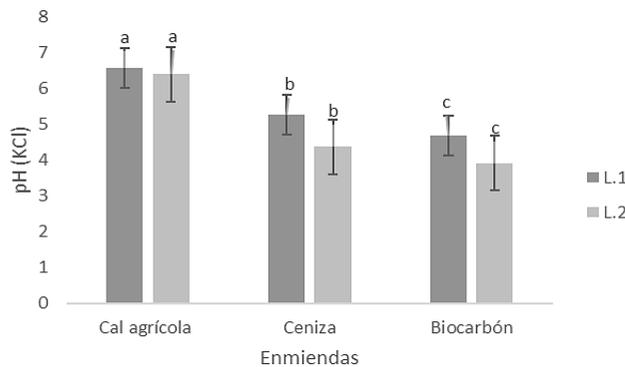


Figura 1. Comparación entre las medias del efecto de las enmiendas sobre los niveles de pH en KCl en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

alto en el aumento de la CE comparado con otras enmiendas (Figura 3). Esta observación es crucial para nuestro objetivo de identificar enmiendas que efectivamente modifiquen la conductividad eléctrica del suelo y faciliten la selección de estrategias de manejo adecuadas para mejorar la fertilidad del suelo. La CE se incrementó ligeramente en L1 (de 0.47 a 0.67 d Sm⁻¹), no así en L2, donde los valores se mantuvieron sin variaciones (Figura 4).

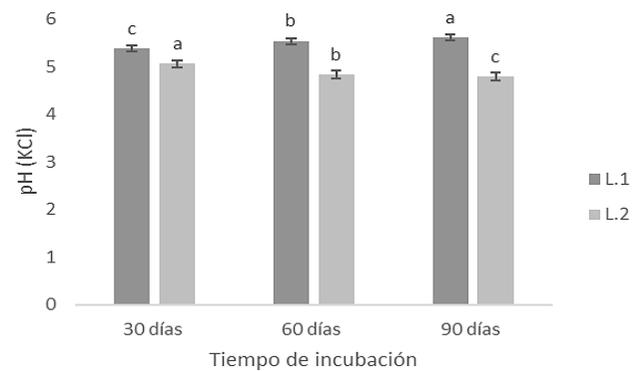


Figura 2. Comparación entre las medias del efecto del tiempo de incubación sobre los niveles de pH en KCl en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

Tabla 2. Niveles de significancia de los resultados de pH tomados en KCl, bajo el efecto de 3 enmiendas edáficas, incubadas en 3 tiempos, con 11 dosis distintas

Fuentes de variación	gl	Cuadrados medios	Significancia	CV %
Localidad 1				
Enmiendas (E) ¹	2	93.36	**	2.66
Tiempo de incubación (T) ²	2	1.47	**	3.29
E x T	4	1.83	**	
Dosis (D) ³	10	7.13	**	
E x D	20	1.40	**	2.12
T x D	20	0.09	**	
E x T x D	40	0.08	**	
Localidad 2				
Enmiendas (E) ¹	2	173.7	**	4.61
Tiempo de incubación (T) ²	2	1.86	**	3.03
E x T	4	0.16	**	
Dosis (D) ³	10	7.37	**	
E x D	20	2.58	**	2.92
T x D	20	0.09	**	
E x T x D	40	0.14	**	

+Valores dados según el ANOVA factorial intergrupos para pH en KCl. Donde: ¹ 3 tipos de enmiendas: cal agrícola, ceniza y biocarbón; ² 3 tiempos de incubación: 30, 60 y 90 días; ³ 11 dosis de enmiendas: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 t ha⁻¹.

* y ** indican significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente. NS: no significativo. Según la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey.

Tabla 3. Niveles de significancia de los resultados de CE tomados en agua, bajo el efecto de 3 enmiendas edáficas, incubadas en 3 tiempos, empleando 11 dosis distintas

Fuentes de variación	gl	Cuadrados medios	Significancia	CV %
Localidad 1				
Enmiendas (E) ¹	2	6.20	**	12.12
Tiempo de incubación (T) ²	2	1.00	**	16.10
E x T	4	0.65	**	
Dosis (D) ³	10	1.98	**	
E x D	20	0.33	**	12.07
T x D	20	0.04	**	
E x T x D	40	0.03	**	
Localidad 2				
Enmiendas (E) ¹	2	3.17	**	21.47
Tiempo de incubación (T) ²	2	0.01	NS	16.63
E x T	4	0.14	**	
Dosis (D) ³	10	1.59	**	
E x D	20	0.36	**	18.94
T x D	20	0.0	NS	
E x T x D	40	0.01	NS	

+Valores dados según el ANOVA factorial intergrupos para CE. Donde: ¹ 3 tipos de enmiendas: cal agrícola, ceniza y biocarbón; ² 3 tiempos de incubación: 30, 60 y 90 días; ³ 11 dosis de enmiendas: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 t ha⁻¹.

* y ** indican significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente. NS: no significativo. Según la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey.

Impacto de las enmiendas sobre el carbono orgánico (% CO)

La variabilidad en el contenido de carbono orgánico en respuesta a las diferentes enmiendas y dosis fue estadísticamente significativa en ambas localidades (Tabla 4). Este hallazgo es relevante para el objetivo de explorar cómo distintas enmiendas afectan la materia orgánica del suelo, un factor crucial para la sostenibilidad del suelo y la productividad agrícola. La cal agrícola presentó el mayor valor de % CO (1.87 %), diferente a lo obtenido cuando se utilizó ceniza (1.43 %) y biocarbón (1.39 %) en L1; sin embargo, en L2 el uso de biocarbón (1.54 %) mostró el mayor valor (1.54 %), diferente a cal agrícola (1.34 %) y ceniza (1.37 %) (Figura 5). En cuanto al tiempo de incubación, el comportamiento del % CO mostró una ligera disminución a medida que transcurrió el tiempo de incubación en L1; sin embargo, en L2 los valores se mantuvieron sin variación.

Influencia de las enmiendas sobre la materia orgánica (% MO)

Consistentes con los resultados anteriores, las pruebas ANOVA revelaron un aumento significativo en la materia orgánica como resultado de la aplicación de enmiendas, con diferencias notables entre las enmiendas y entre los tiempos de incubación (Tabla 5). Los resultados indican que tanto la cal agrícola como el biocarbón son particularmente efectivos en mejorar el contenido de materia orgánica del suelo, lo cual cumple con el objetivo de aumentar la materia orgánica disponible, esencial para la mejora de la estructura y la salud del suelo (Figuras 7 y 8).

La variabilidad en el contenido de materia orgánica, en respuesta a las diferentes enmiendas y dosis aplicadas, resultó ser estadísticamente significativa en ambas localidades estudiadas (Tabla 4). Esta determinación se encaja en el objetivo de analizar cómo las distintas enmiendas afectan la materia orgánica del suelo, un factor importante para la sostenibilidad del suelo y la productividad

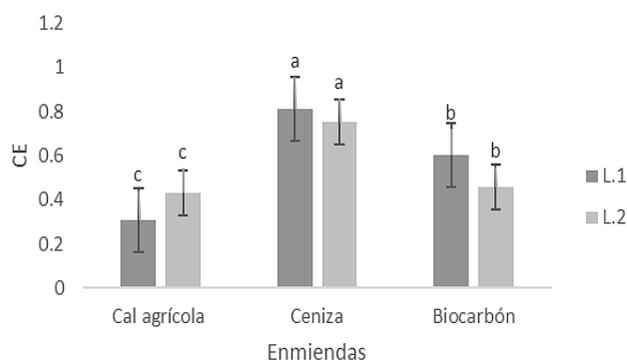


Figura 3. Comparación entre las medias del efecto de las enmiendas sobre los niveles de CE en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras, indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

agrícola. La cal agrícola registró el mayor porcentaje de materia orgánica (% MO) con un valor de 3.23 %, superando a la ceniza (2.46 %) y al biocarbón (2.49 %) en L1. Sin embargo, en L2, el biocarbón presentó el mayor valor de % MO con 2.66 %, en comparación con la cal agrícola (2.31 %) y la ceniza (2.36 %) (Figura 6). En cuanto al tiempo de incubación, el % MO mostró una ligera disminución a medida que avanzaba el periodo de incubación en L1; por el contrario, en L2, los valores permanecieron constantes.

Tabla 4. Niveles de significancia de los resultados obtenidos, de % CO tomados bajo el efecto de 3 enmiendas edáficas, incubadas en 3 tiempos, empleando 11 dosis distintas

Fuentes de variación	gl	Cuadrados medios	Significancia	CV %
Localidad 1				
Enmiendas (E) ¹	2	7.13	**	9.04
Tiempo de incubación (T) ²	2	0.44	**	8.61
E x T	4	2.84	**	
Dosis (D) ³	10	0.32	**	
E x D	20	0.12	**	5.30
T x D	20	0.04	**	
E x T x D	40	0.08	**	
Localidad 2				
Enmiendas (E) ¹	2	1.20	**	5.89
Tiempo de incubación (T) ²	2	0.01	NS	4.81
E x T	4	0.14	**	
Dosis (D) ³	10	0.05	**	
E x D	20	0.04	**	5.74
T x D	20	0.03	**	
E x T x D	40	0.03	**	

+Valores dados según el ANOVA factorial intergrupos para % CO. Donde: ¹ 3 tipos de enmiendas: cal agrícola, ceniza y biocarbón; ² 3 tiempos de incubación: 30, 60 y 90 días; ³ 11 dosis de enmiendas: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 t ha⁻¹.

* y ** indican significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente. NS: no significativo. Según la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey.

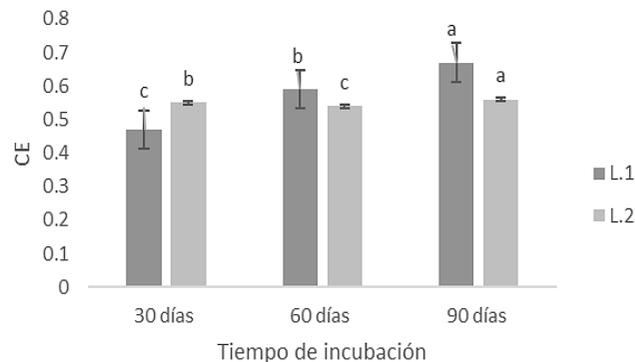


Figura 4. Comparación entre las medias del efecto del tiempo de incubación sobre los niveles de CE en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

Discusión

Los resultados de este estudio confirman la efectividad del encalado, específicamente utilizando cal agrícola, para controlar la acidez del suelo, en concordancia con lo reportado por Hirzel *et al.* (2017). Como se refleja en la Tabla 2 y en la Figura 1, la aplicación de cal agrícola provocó un incremento significativo del pH medido en KCl. Este hallazgo es consistente con los resultados de Combatt *et al.* (2017), Pérez (2016) y Calva y Espinosa (2017), quienes demostraron que la

Tabla 5. Niveles de significancia de los resultados obtenidos del % MO tomados bajo el efecto de 3 enmiendas edáficas, incubadas en 3 tiempos, empleando 11 dosis distintas

Fuentes de variación	gl	Cuadrados medios	Significancia	CV %
Localidad 1				
Enmiendas (E) ¹	2	21.19	**	9.04
Tiempo de incubación (T) ²	2	1.31	**	8.61
E x T	4	8.45	**	
Dosis (D) ³	10	0.96	**	
E x D	20	0.36	**	5.30
T x D	20	0.10	**	
E x T x D	40	0.24	**	
Localidad 2				
Enmiendas (E) ¹	2	3.56	**	5.89
Tiempo de incubación (T) ²	2	0.03	NS	4.81
E x T	4	0.40	**	
Dosis (D) ³	10	0.15	**	
E x D	20	0.12	**	5.74
T x D	20	0.08	**	
E x T x D	40	0.08	**	

+Valores dados según el ANOVA factorial intergrupos para % MO. Donde: ¹ 3 tipos de enmiendas: cal agrícola, ceniza y biocarbón; ² 3 tiempos de incubación: 30, 60 y 90 días; ³ 11 dosis de enmiendas: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 t ha⁻¹.

* y ** indican significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente. NS: no significativo. Según la prueba de rangos y comparaciones múltiples de Tukey.

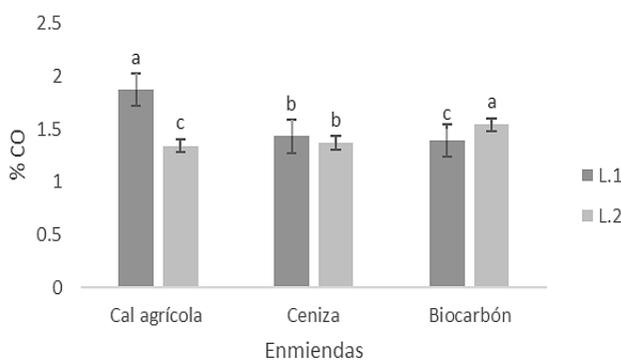


Figura 5. Comparación entre las medias del efecto de las enmiendas sobre los niveles de CO en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

cal agrícola mejora las características fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos ácidos, facilitando así una mayor disponibilidad de nutrientes y mejorando la estructura del suelo.

Por otro lado, la ceniza como enmienda edáfica también mostró resultados positivos en el aumento de la conductividad eléctrica y en la corrección de deficiencias del suelo, como se observa en la Tabla 3 y en la Figura 3. Estos efectos corroboran los estudios de Solla-Gullón *et al.* (2001), Arias-Cedeño *et al.* (2021), Downie *et al.* (2009) y Santalla *et al.* (2011), que indican que las enmiendas de Ceniza no solo aumentan el pH del suelo, sino que también mejoran la concentración de macronutrientes, contribuyendo así a la reestructuración del suelo y al aumento de la productividad agrícola.

Además, los incrementos en los niveles de carbono orgánico y materia orgánica observados en las Tablas 4 y 5, y visualizados en las Figuras 5 y 7, fueron notables con la aplicación de cal agrícola y biocarbón. En la Localidad 1, los efectos beneficiosos de la cal agrícola sobre el CO y la MO están alineados con las investigaciones previas de Hirzel *et al.* (2017), Combatt *et al.* (2017), Pérez (2016) y Calva y Espinosa (2017), que resaltan su capacidad para neutralizar la acidez del suelo y mejorar su estructura, lo que facilita la asimilación de nutrientes por parte de las plantas.

En la Localidad 2, el biocarbón mostró un efecto similar, lo que apoya los estudios de Gómez *et al.* (2016), Gilces (2014), Omil *et al.* (2013) y Zheng *et al.* (2013). Estos autores destacan que el biocarbón mejora las propiedades del suelo mediante la encapsulación de metales pesados y el fomento de la actividad microbiana, lo que, a su vez, favorece la asimilación del nitrógeno y otras funciones esenciales para el manejo eficaz de la acidez del suelo.

En conjunto, estos resultados destacan la importancia de seleccionar enmiendas edáficas adecuadas basadas en las características específicas del suelo y las condiciones agronómicas locales. Además, subrayan la capacidad de las enmiendas

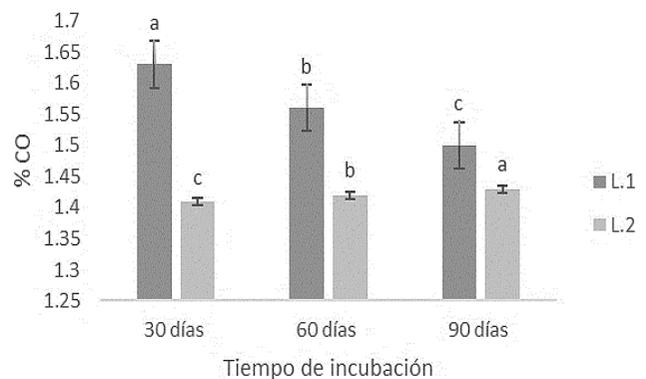


Figura 6. Comparación entre las medias del efecto del tiempo de incubación sobre los niveles de CO en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

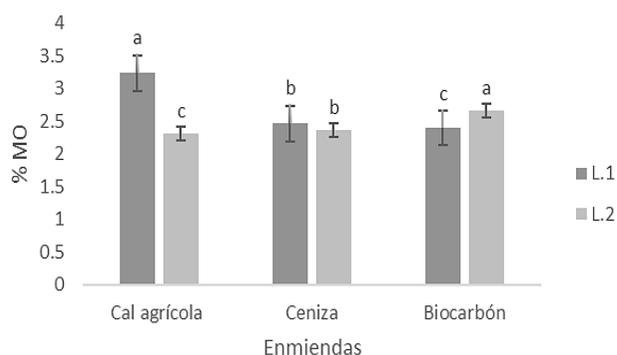


Figura 7. Comparación entre las medias del efecto de las enmiendas sobre los niveles de MO en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05)

como la cal agrícola y el biocarbón para modificar de manera efectiva las propiedades químicas y biológicas del suelo, en concordancia con los objetivos establecidos en nuestro estudio.

Referencias

- Álvarez C. y Rimski-Korsakov, H. (2015). Muestreo de suelos. En *Manejo de la fertilidad de suelos en planteos orgánicos* (pp. 114-120). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. http://www.ciaorganico.net/documypublic/126_libro_fertilidad_de_suelos-pvo_isbn.pdf
- Arias-Cedeño, Q.; López-Sánchez, R.; Sainz-Rosales, L. R.; Verdecia-Casanova, M. V. y Eichler-Löbermann, B. (2021). Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras. *Revista Cubana de Química*, 33(3), 452-466. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212021000300452&lng=es&tlng=es
- Barbosa, J. C. y W. Maldonado. (2010). *Software AgroEstat: sistema de análisis estadísticas de ensaios agronômicos*. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista.
- Calva, C. y Espinosa, J. (2017). Efecto de la aplicación de cuatro materiales de encalado en control de la acidez de un suelo de Loreto, Orellana. *Siembra*, 4(1), 110-120. <https://doi.org/10.29166/siembra.v4i1.505>
- Castro, H., & Munevar, Ó. (2013). Mejoramiento químico de suelos ácidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 409-416.
- Chico, J. (2019). *Evaluación del cambio en la capacidad de intercambio iónico de suelos ácidos por efecto del encalado*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Combatt Caballero, E.; Álvarez, V. H. y Lima, J. C. (2017). Estimación y alteraciones químicas de suelos tiomórficos con la aplicación de cal en invernadero. *Idesia (Arica)*, 35(4), 7-16. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017000400007>
- Downie, A.; Van, Z.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K.; Rust, J.; Joseph, S. y Cowie, A. (2009). *Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility*. [Tesis doctoral]. University of New South Wales.
- Ecuador - GAD Municipal de Chilla. (2014). Ubicación geográfica. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Chilla.
- Espinosa, J., Moreno, J. y Bernal, G. (eds.). (2022). *Suelos del Ecuador: clasificación, uso y manejo*. Quito: Instituto

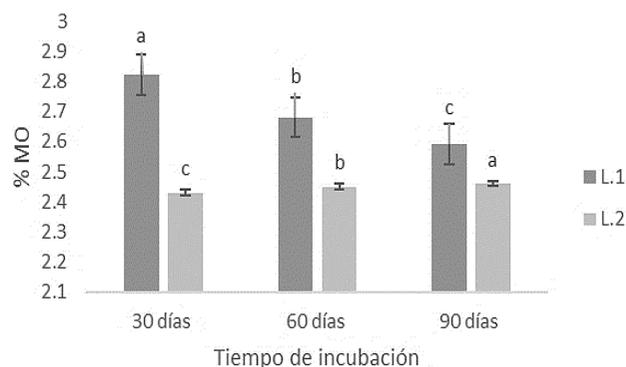


Figura 8. Comparación entre las medias del efecto del tiempo de incubación sobre los niveles de MO en 2 localidades (L.1-L.2). Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según prueba de Tukey (p -valor ≤ 0.05).

- Geográfico Militar (IGM). https://www.researchgate.net/publication/360783766_Suelos_Ecuador_Uso_del_Suelo
- Estrada-Herrera I. R.; Hidalgo-Moreno, C.; Guzmán-Plazola, R.; Almaraz Suárez, J. J.; Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000800813&script=sci_arttext
- Eyherabide, M.; Saínz Rozas, H.; Barbieri, P. y Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo*, 32(1), 13-19. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672014000100002&script=sci_arttext&tlng=en
- Gilces Reyna, M. A. (2014). *Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo*. [Tesis de máster]. Universidad de Valladolid. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6632>
- Gómez, L. A.; Cruz-Domínguez, A.; Jiménez-Madrid, D.; Ocampo-Duran, Á. Y Parra-González, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n2.2016.88>
- Hernández, L. V.; Viveros, G. S.; Martínez, N. A. V.; Rocha, D. G. C. y Contreras, R. G. C. (2014). Análisis de suelo y foliar en guanábano (*Annona muricata* L.) en Blanca Espuma municipio de Alto Lucero, Veracruz. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36, 157-165. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452014000500019>
- Hirzel, J.; Lecannelier, R.; Cuevas, E. y Rodríguez, F. (2017). Efectividad de cales granuladas en el manejo de dos suelos ácidos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 26, 21-30. <https://fertilizar.org.ar/wp-content/uploads/2021/09/21.pdf>
- Jamioy Orozco, D. D.; Menjivar Flores, J. C. y Rubiano Sanabria, Y. (2015). Indicadores químicos de calidad de suelos en sistemas productivos del Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia. *Acta Agronómica*, 64(4), 302-307. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.38731>
- Kottek, M., J.; Grieser, C.; Beck, B.; Rudolf, y F. Rubel. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Luna, D. M.; Triana, C. F. T.; Palencia, L. G. y Pulido, H. M. Q. A. S. (2021). Emisiones de CO₂ por aplicación de cal en suelos ácidos de Colombia. IDEAM. <https://biocarbono.org/wp-content/uploads/2021/09/02-emisiones-co2-por-aplicacion-cal-suelos-acidos-colombia.pdf>

- Omil, B., Piñeiro, V. y Merino, A. (2013). Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. *Forest Ecology and Management*, 295, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.024>
- Osorio, W. y Casamitjana, M. (2011). Toma de muestras de suelo para evaluar la fertilidad del suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 23-28.
- Pérez, R. J. (2016). Determinación de la necesidad de cal en los suelos agrícolas de. [Tesis de grado]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/5867>
- Sadeghian, S. y Marín, C. D. (2020). Corrección de la acidez del suelo: alteraciones químicas del suelo. *Revista Cenicafé*, 71(1), 7-20. <https://doi.org/10.38141/10778/1116>
- Santalla, M.; Omil, B.; Rodríguez-Soalleiro, R. y Merino, A. (2011). Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region. *Plant and Soil*, 346, 63-78. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-011-0794-y>
- Solla-Gullón, F.; Rodríguez-Soalleiro, R. y Merino, A. (2001). Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, 16(3), 379-393.
- Valerio, J. M., & Molina, E. (2012). Evaluación de una fuente de enmienda líquida en el rendimiento del arroz en un Ultisol de la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 89-96.
- Vargas Gutiérrez, D. L. (2010). Efecto del tiempo, temperatura de almacenamiento y tamizado del suelo sobre algunas poblaciones microbianas. [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/8648>
- Zheng, H., Z.; Wang, X.; Deng, S.; Herbert y B. Xiang. (2013). Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*, 206, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.018>