

Modelo para la conversión de valores de pH del suelo con dos matrices de extracción en Urabá, Colombia

Conversion model of soil pH values with two extraction matrices in Urabá, Colombia

Laura Delgado Bejarano^{1,3}, Sebastián Zapata Henao^{1,4}, Darío Antonio Castañeda Sánchez^{2,5}, Miguel Ángel Bernal Monterrosa^{1,6}.

¹Centro de Investigaciones del Banano - Cenibanano. Medellín, Colombia. ²Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Medellín, Colombia. ³✉ auxsuelos1@augura.com.co; ⁴✉ dircenibanano@augura.com.co; ⁵✉ dacasta4@unal.edu.co; ⁶✉ suelos@augura.com.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v72n4.106568>

2023 | 72-4 p 324-329 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-12-29 Acep.: 2024-02-28

Resumen

La acidez es una de las principales propiedades del suelo y tiene relación directa e indirecta con propiedades físicas, químicas y biológicas. Su valor se determina a través de la medición del pH, metodología que varía entre los diferentes laboratorios, para lo cual las matrices de disolución más usadas son el agua destilada (H₂O) y el cloruro de potasio (KCl), que dan información sobre la acidez activa y potencial, respectivamente. El objetivo del presente artículo es proponer una estrategia para relacionar los valores de pH mediante ambos métodos de extracción; para esto se realizó un muestreo de suelo a 4 puntos/hectárea en una finca bananera de la zona de Urabá, Antioquia, con el fin de generar los modelos de regresión entre el pH determinado en una solución KCl [1M] y en H₂O, bajo dos proporciones de disolución (suelo:solución) de 1:1 y 1:2. El modelo más representativo para la zona estudiada se da con la relación 1:2, bajo una regresión polinómica de tercer grado guiada por la ecuación $pH_{KCl} = -0.12 + 2.31 - 13.41 + 28.10$, que arrojó un coeficiente de determinación (R²) de 83.91 % y un error cuadrático medio (RMSE) de 0.27. Adicionalmente, no se encontraron diferencias significativas entre las dos proporciones de disolución evaluadas. De esta forma, se puede concluir que para la zona de Urabá es posible usar modelos matemáticos para la conversión de valores de pH en H₂O a KCl y viceversa, lo que permite estimar los valores de acidez potencial para su respectiva neutralización.

Palabras clave: acidez en el suelo, agricultura, enmiendas, fertilización, modelo de pH.

Abstract

Acidity is one of the main properties of soil and is related directly and indirectly to other physical, chemical, and biological properties. It is determined through pH measurement, a methodology that varies among different laboratories. The most used dissolution matrices are distilled water (H₂O) and potassium chloride (KCl), which provide information on active and potential acidity, respectively. The objective of this work was to propose a strategy for relating pH using the above extraction methods. For this purpose, soil sampling was conducted at a density of 4 points per hectare (ha) on a banana farm in the Urabá region (Antioquia) to develop regression models between the pH develop in a KCl [1M] solution and in H₂O, using two dissolution ratios (soil:solution) of 1:1 and 1:2. The most representative model for the studied area was obtained using the 1:2 ratio, under a third-degree polynomial regression described by the equation $pH_{KCl} = -0.12 + 2.31 - 13.41 + 28.10$, which yielded a coefficient of determination (R²) of 83.91 % and a root mean square error (RMSE) of 0.27. Additionally, no significant differences were found between the two dilution ratios evaluated. Thus, it can be concluded that for the Urabá region, mathematical models can be used to convert pH values between H₂O and KCl, enabling the estimation of potential acidity values for neutralization purposes.

Keywords: acidity in soil, agriculture, amendments, fertilization, model of pH.

Introducción

La acidez del suelo se genera debido a procesos naturales que se dan durante la pedogénesis, cuando los procesos de meteorización química, física y biológica causan el aumento de cationes ácidos como el Al^{+3} y el H^+ , lo que a su vez genera una tendencia ácida, la cual es más común en climas húmedos. Adicionalmente existen procesos antrópicos que causan la acidificación del suelo, tales como la fertilización, industrialización, urbanización, agricultura, entre otros (Kabała *et al.*, 2016; Osman, 2018; Q. Wang *et al.*, 2018; Zapata, 2022). En el caso específico de la zona de Urabá, los procesos de acidificación son favorecidos por las altas precipitaciones que exceden las tasas de evapotranspiración y ocasionan un lavado de bases, además de los procesos propios del manejo agronómico del cultivo, la absorción de cationes por parte de las plantas e hidrólisis por presencia de Al^{3+} y Fe^{3+} (Agegnehu *et al.*, 2019; Kassa *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Wei *et al.*, 2020). La reacción del suelo representa el estado de la acidez o la alcalinidad del suelo y se establece mediante la medición del pH. Tradicionalmente su medición se realiza en una suspensión de suelo y agua destilada en diferentes grados de disolución (suelo:solución), estos oscilan generalmente entre 1:1 y 1:5. Sin embargo, debido a las variaciones estacionales que se presentan en el suelo, que ocasionan variaciones en los valores de pH, se han establecido diferentes matrices de suspensión para su evaluación, como lo son el CaCl_2 [0.01M] y KCl [1M] con el fin de obtener medidas más estables (Delgado *et al.*, 2019; International Organization for Standardization [ISO], 2021; Osman, 2018; USDA, 2018). Estas metodologías varían según el país y el laboratorio que realiza el análisis; para el caso de Estados Unidos, las mediciones se realizan generalmente con agua destilada en proporciones de 1:1 o 1:2, mientras que en países como Suráfrica estas mediciones se hacen con KCl y agua destilada en relaciones de 1:2.5. La ISO 10390 de 2021 como norma internacional establece que la relación de disolución para las mediciones debe de ser de 1:5, sin embargo, menciona que se pueden usar las tres matrices de extracción. Para el caso de Colombia se hace la claridad de que la matriz debe de ser agua destilada, pero la proporción puede variar entre 1:1 a 1:5 como lo establece la NTC 5264 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 2018), por lo que la comparación de valores de pH puede ser errónea si no se conoce la metodología con la que se realizaron las mediciones, dado que se pueden presentar diferencias significativas, ya que el aumento en la proporción de solución puede generar aumento en los valores de pH (Osorio, 2018); además, las soluciones electrolíticas pueden generar una sustitución de protones de H^+ que se encuentran fuertemente ligados a los coloides del suelo, ocasionando valores más bajos de pH

comparados con los medidos en agua (Cunha *et al.*, 2019; De Almeida *et al.*, 2019; Kahar *et al.*, 2019; Kassa *et al.*, 2020; Khadka *et al.*, 2021; Neves *et al.*, 2021). Por esta razón, se han establecido modelos para convertir los valores de pH entre las diferentes matrices de solución usadas y, a su vez, los radios de disolución, tal como lo presentan Kabała *et al.* (2016); Khadka *et al.* (2021); Kome *et al.* (2018); Nel *et al.* (2022) en sus investigaciones.

Comprender el comportamiento del pH en el suelo permite tomar decisiones acertadas en campo para mejorar la calidad del suelo y la productividad de los cultivos; también permite realizar los debidos procesos de neutralización mediante encalados, lo que aumenta los valores de pH. Sin embargo, es importante tener en cuenta las dosis adecuadas para evitar elevar el pH del suelo a valores por encima de los requeridos por el cultivo, lo cual puede afectar la disponibilidad de algunos nutrientes (Weil y Brady, 2017; Han *et al.*, 2023; Osorno y Osorno, 2010).

Finalmente, el objetivo de la investigación fue proponer un modelo que permitiera relacionar los valores determinados del pH del suelo usando diferentes matrices de disolución en la zona bananera de Urabá.

Materiales y métodos

Muestreo de suelo

Se realizó un muestreo de suelo durante marzo 2022, mediante una malla rígida de 110 puntos que se distribuyeron en el área total de una finca de banano ubicada en Carepa en la zona de Urabá, Antioquia, con coordenadas $7^{\circ}46'45''$ N, $76^{\circ}40'22''$ O. La precipitación promedio multianual es de 2961 mm, temperatura promedio 28°C (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales ([IDEAM], 2022), altitud de 26 m s. n. m. y presenta una zona de vida de bosque húmedo tropical (bh-T). Las muestras fueron obtenidas a 50 cm de la planta de banano, a una profundidad de 0-30 cm. El suelo se secó a temperatura ambiente, se molió y se tamizó a 2 mm, tal como lo establece la normatividad NTC – ISO 11464 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC], 1995).

Mediciones de laboratorio

El pH del suelo se midió usando dos proporciones de disolución (suelo: solución) de 1:1, 1:2 en cada una de las matrices de extracción (agua destilada y KCl [1M]). Para las mediciones se usó un potenciómetro de suelos profesional Groline HI98168 y un agitador orbital, Shaker Thermo Scientific SHKE2000, con el cual se mezclaron las muestras a 185 rpm durante un minuto; para ello se estableció un tiempo de reposo de 30 minutos y luego se agitó nuevamente durante 1 minuto.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software R 4.1.2 (R Core Team, 2023). Se estableció un análisis descriptivo y se evaluó el coeficiente de variación (CV) que presentaron las metodologías con el fin de determinar su reproducibilidad; igualmente se determinaron las distribuciones de los parámetros (pH KCl y pH H₂O). Mediante un análisis post hoc de Tukey se identificaron las diferencias estadísticas y se determinó la correlación de Pearson entre las metodologías implementadas. Finalmente, se propusieron los modelos de regresión teniendo en cuenta el coeficiente de determinación (R²) y el error cuadrático medio (RMSE) para determinar el modelo que presentó un mejor ajuste.

Resultados y discusión

Análisis descriptivo

El análisis descriptivo se ilustra en la Tabla 1, donde se observa que para los tratamientos de agua destilada los valores oscilan entre extremadamente ácidos hasta neutros, mientras que para el caso de los tratamientos con KCl los valores de pH están entre extremadamente ácidos y ligeramente ácidos, según la clasificación planteada por Centro de Investigaciones del Banano (Cenibanano, 2022) y Osorio (2018). El coeficiente de variación para las mediciones de pH KCl 1:1 se clasifica como bajo (15 % - 30 %), mientras que para las demás disoluciones, así como las realizadas en agua, se clasifican como muy bajo (0 % -15 %), con base en la clasificación del coeficiente de variación para variables de suelo presentado por Larreal *et al.* (2009). Esto nos indica que existe una buena reproducibilidad de las medidas y, por consiguiente, que los métodos presentan altos niveles de confianza, resultados similares a los encontrados por Nel *et al.* (2022).

En la Figura 1 se observan diferencias significativas para las metodologías usadas y se da en ambos radios de disolución ($p < 0.05$). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Khadka *et al.* (2021), Nel *et al.* (2022) y Neves *et al.* (2021), quienes encontraron en suelos de Nepal, Western Cape y Minas Gerais que las matrices de extracción presentan valores de pH

estadísticamente diferentes, dentro de los cuales las mediciones con agua fueron las que presentaron valores mayores en comparación con las soluciones electrolíticas (KCl y CaCl₂). Esto permite relacionar los diferentes conceptos de la acidez del suelo, en los que el pH con agua hace referencia a la acidez de la solución del suelo (acidez activa) (Kicińska *et al.*, 2022), mientras que los pH evaluados con KCl tienen en cuenta adicionalmente la reserva de acidez existente en la matriz del suelo, por lo que se denomina como acidez potencial (Kahar *et al.*, 2019; Kassa *et al.*, 2020; Khadka *et al.*, 2021; Kicińska *et al.*, 2022; Sadowski, 2019); por esta razón dichos valores suelen ser menores comparados con las mediciones realizadas en agua.

Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas entre los radios de disolución en ninguna de las matrices de solución ($p > 0.05$). Resultados similares se encontraron en las investigaciones de Nel *et al.* (2022) y Rambwawasvika *et al.* (2021), en las que evaluaron relaciones entre 1:1 y 1:5 en suelos con diferentes características de Western Cape y suelos cultivados en caña de azúcar de Zimbabwe. Kabala *et al.* (2016) mencionan que las diferencias en los radios de solución no son representativas, en especial si se comparan con la variabilidad espacial que presenta el pH en el suelo.

Existe evidencia altamente significativa ($p < 0.001$) para sugerir la relación entre las diferentes metodologías de evaluación de pH (Tabla 2). Estas correlaciones se clasifican como fuertes o muy fuertes (Schober *et al.*, 2018) y se observa que cuando el pH en H₂O aumenta, se incrementan también los

Tabla 1. Análisis descriptivo para las mediciones de pH con diferentes matrices y relaciones

	pH H ₂ O 1:1	pH H ₂ O 1:2	pH KCl 1:1	pH KCl 1:2
Min	4.25	4.18	3.11	3.19
Max	7.51	7.59	6.73	6.33
Mediana	6.26	6.34	4.54	4.58
Desviación estándar	0.68	0.69	0.71	0.68
CV%	11.09	10.92	15.68	14.80

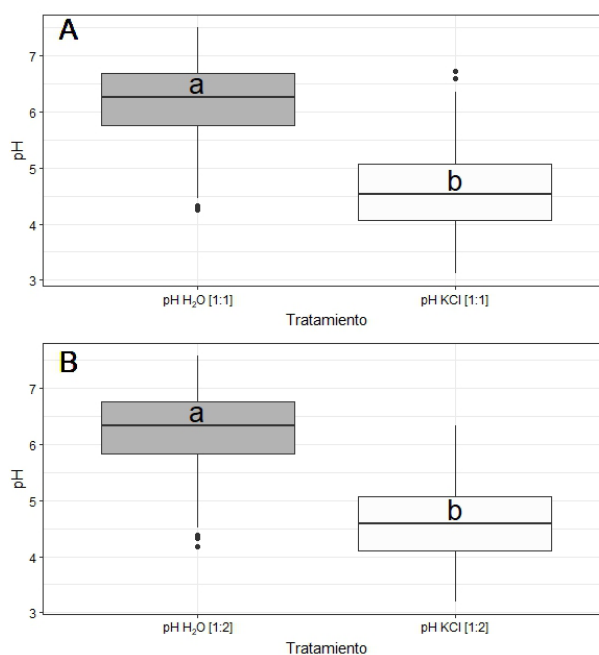


Figura 1. Boxplots de la distribución de los valores de pH en las matrices. A. Radio de disolución 1:1; B. Radio de disolución 1:2. Letras diferentes denotan diferencias estadísticas, Tukey ($p < 0.05$).

valores de pH en KCl, resultados que concuerdan con lo encontrado por Khadka *et al.* (2021) en su estudio en Nepal, en el que se hallaron correlaciones fuertes entre las metodologías. Adicionalmente Álvarez *et al.* (2019) mencionan que los valores de pH medidos con estas metodologías presentan una alta correlación. De esta forma se puede realizar un modelo para estimar conversiones entre metodologías de pH para la zona de Urabá.

Los modelos de conversión cobran importancia en el país y la zona, debido a que aproximadamente el 85 % de los suelos de Colombia presentan condiciones ácidas (Osorio, 2018) y bajo el régimen de humedad údico que presenta la zona de Urabá y el efecto antrópico, se genera una tendencia a la acidificación. Por esta razón es importante conocer la acidez potencial que presentan los suelos, la cual tiene en cuenta la acidez activa más la acidez no intercambiable ligada a los coloides. Conocer este valor permite tener una mejor interpretación y realizar mejores recomendaciones para el manejo de la reacción del suelo, sumado a que la normatividad internacional ISO 10390 implementa las mediciones con soluciones electrolíticas para mejorar la estabilidad de los resultados, por lo que en países como Nepal, Brasil y Sudáfrica se han venido implementando los modelos de conversión de pH entre matrices, lo cual disminuye los costos y tiempos de operación en los laboratorios de suelos.

De igual manera, se realizaron diferentes modelos de regresión para estimar el valor de pH medido en KCl desde los datos de pH de H₂O para ambos radios de solución evaluados. En la Tabla 3 se presentan las ecuaciones generadas ($p < 2.2e^{-16}$): los valores de R² obtenidos fueron entre 77.73 % y 79.09 %, mientras que los valores del RMSE oscilaron entre 0.33 y 0.34

Tabla 2. Correlación entre las metodologías de pH evaluadas

	pH H ₂ O 1:1	pH H ₂ O 1:2	pH KCl 1:1	pH KCl 1:2
pH H ₂ O 1:1	1.000			
pH H ₂ O 1:2	0.975***	1.000		
pH KCl 1:1	0.879***	0.887***	1.000	
pH KCl 1:2	0.897***	0.905***	0.975***	1.000

*** $p < 0.001$

Tabla 3. Modelos para la predicción de valores de pH.

Modelo	Radio	Ecuación	R ² (%)	RMSE
Lineal	1:1		77.73	0.34
	1:2		82.35	0.28
Cuadrático	1:1		78.07	0.33
	1:2		82.88	0.28
Cúbico	1:1		79.09	0.33
	1:2		83.91	0.27

para los modelos con un radio de disolución de 1:1. Para el caso de los modelos 1:2 se presentaron valores del R² entre 82.35 % y 83.91 % con valores de RMSE entre 0.27 y 0.28.

Así mismo, se evidenció que el mejor ajuste se presentó mediante una regresión polinómica de tercer grado (cúbico) para las mediciones en radio 1:2 con un valor de R²=83.91 % y RMSE= 0.27, lo que indica una menor dispersión de los datos (Figura 2). Estos resultados son similares a los obtenidos por Khadka *et al.* (2021), que determinaron que un modelo cuadrático o cúbico para la estimación del pH en KCl presenta un buen ajuste. Adicionalmente, Wang *et al.* (2019) para la zona de Guangxi en China, mediante una regresión cuadrática, obtuvieron un R²=83.6 %. Se observa que la precisión del modelo aumenta con el incremento del radio de disolución, tal como lo mencionan Kome *et al.* (2018).

Conclusiones

Las diferencias estadísticas encontradas ($p < 0.05$) entre matrices se deben a que el KCl presentan mayor capacidad de extracción de protones ligados a los coloides del suelo gracias a su carácter monovalente. Para las condiciones analizadas, fue posible efectuar un modelo para conversión de valores de pH en H₂O a KCl que permitió obtener una estimación de acidez potencial en la que el mejor ajuste correspondió a una regresión polinómica de tercer grado; el radio de disolución 1:2 fue el que presentó mejores resultados, con un valor de R² de 83.91 y un RMSE de 0.27. Es necesario generar más información respecto a manejo de acidez potencial en la zona de Urabá y su respectivo manejo agronómico, y de esta forma realizar recomendaciones de neutralización adecuadas.

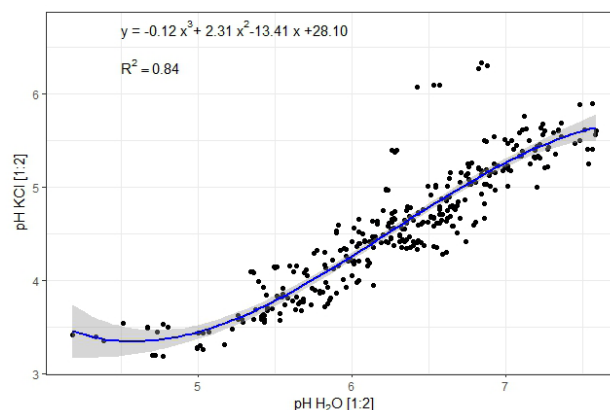


Figura 2. Regresión polinómica de tercer grado para la conversión de valores de pH.

Referencias

- Agegnehu, G.; Yirga, C. y Erkossa, T. (2019). *Soil acidity management*. Adis Abeba: Ethiopian Institute of Agricultural Research (EIAR). https://www.researchgate.net/publication/330039969_Soil_Acidity_Management.
- Álvarez, R.; Giménez, A.; Pagnanini, F.; Recondo, V.; Gangi, D.; Caffaro, M.; De Paepe, J. L. y Berhongaray, G. (2020). Soil acidity in the Argentine Pampas: Effects of land use and management. *Soil and Tillage Research*, 196, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104434>.
- Centro de Investigaciones del Banano (Cenibanano). (2022). Servicio integrado de suelos. En *Informe Anual 2021* (pp. 164-179). Carepa. Augura. <https://augura.com.co/wp-content/uploads/2022/04/Informe-Anual-Cenibanano-2021.pdf>
- Cunha, G. O. de M.; Almeida, J. A. de; Morais, F. A. de y Machado, M. R. (2019). Métodos de extração, formas e toxicidade de alumínio na soja cultivada em solos com elevados teores de Al-KCl. *Científica*, 47(2), 239-255. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n2p239-255>.
- De Almeida, J. A.; Da Silva, T. P.; De Mello Cunha, G. O.; Spido, D. R. y Dos Santos Silva, F. T. (2019). Chemical, physical and mineralogical attributes of soils derived from sedimentary rocks of the Planalto of Lages-SC, Brazil. *Revista Brasileira de Ciencias Agrarias*, 14(3), 1-12. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i3a6576>.
- Delgado, J. A.; Incio, F. A. y Valdez, J. V. (2023). Influencia de la dilución y concentración de los electrolitos en la medición del pH en suelos ácidos. *Revista Científica Pakamuros*, 7(2), 13-21. <https://doi.org/10.37787/ksq9jx59>.
- Han, D.; Zeng, S.; Zhang, X.; Li, J. y Ma, Y. (2023). Integrating soil pH, clay, and neutralizing value of lime into a new lime requirement model for acidic soils in China. *Agronomy*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy13071860>.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2018). *Calidad de suelo. Determinación del pH - NTC 5264* (n.º 5264). Bogotá. <https://tienda.icontec.org/gp-calidad-del-suelo-determinacion-del-ph-ntc5264-2018.html>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). (2022). *Gestión ambiental. Calidad del suelo. Pretratamiento de las muestras de suelo para análisis fisicoquímicos - NTC ISO 11464* (n.º 11464). Bogotá. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/11641/81663_62299.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Promedios climatológicos*. Bogotá. www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima
- International Organization for Standardization (ISO). (2021). *Soil, treated biowaste and sludge. Determination of pH - ISO10390:2021* (n.º 10390). Vernier. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f2ca1637-a0cb-47a8-a868-cd68a9defd91/iso-10390-2021>
- Kabala, C.; Muszyńska, E.; Galka, B.; Łabuńska, D. y Mańczyńska, P. (2016). Conversion of soil pH 1:2.5 KCl and 1:2.5 H₂O to 1:5 H₂O: Conclusions for soil management, environmental monitoring, and international soil databases. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 647-653. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61549>.
- Kahar, M. S.; Rosalina, F.; Febriadi, I. y Fahrizal, A. (2019). Effect of various extractors and time of shaking on soil reaction and micro element soil. *AIP Conference Proceedings*, 2081(1), 0-5. <https://doi.org/10.1063/1.5094025>.
- Kassa Cholbe, M.; Kebede Yeme, F. y Haile Woldeyohannes, W. (2020). Fertility status of acid soils under different land use types in Wolaita Zone, Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2020, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2020/3713967>.
- Khadka, D.; Amgain, R.; Joshi, S. y Shrestha, S. (2021). Evaluation of distilled water pH measurement with electrolyte methods in cultivated soils of Nepal. *Agrochemistry and Soil Science*, 92, 52-61. <https://doi.org/10.31073/acss92-06>.
- Kicińska, A.; Pomykała, R. e Izquierdo-Díaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), 1-14. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>.
- Kome, G. K.; Enang, R. K.; Yerima, B. P. K. y Lontsi, M. G. R. (2018). Models relating soil pH measurements in H₂O, KCl and CaCl₂ for volcanic ash soils of Cameroon. *Geoderma Regional*, 14, e00185. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00185>.
- Larreal, M.; Chirinos, I.; Jiménez, L.; Polo, V.; Peters, W. y Noguera, N. (2009). Variabilidad de algunas de las propiedades físicas de un suelo para la definición de la serie "Los Cortijos", sector semiárido de la altiplanicie de Maracaibo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 9(4), 925-936. <https://www.bioline.org.br/request?cg09109>.
- Li, Q.; Li, S.; Xiao, Y.; Zhao, B.; Wang, C.; Li, B.; Gao, X.; Li, Y.; Bai, G.; Wang, Y. y Yuan, D. (2019). Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012. *Catena*, 175 (April), 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.025>.
- Nel, T.; Hardie, A. G. y Clarke, C. E. (2022). Simple and multivariate linear regression models for pH conversion between measurement techniques. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(14), 1797-1808. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063324>.
- Neves, A. C.; Da Costa, P.; De Oliveira E Silva, C. A.; Pereira, F. R. y Mol, M. P. G. (2021). Analytical methods comparison for pH determination of composting process from green wastes. *Environmental Engineering and Management Journal*, 20(1), 133-139. <https://doi.org/10.30638/eemj.2021.014>.
- Osman, K. T. (2018). Acid soils and acid sulfate soils. En *Management of Soil Problems* (pp. 299-332). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4_11.
- Osorio, W. (2018). *Manejo de nutrientes en suelos del trópico* (3º ed.). Medellín. Editorial L. Vieco.
- Osorno, H. y Osorno, L. (2010). Determinación de los requerimientos de cal. *Suelos Ecuatoriales*, 41(1), 29-35. <https://www.researchgate.net/publication/317303413>.
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Rambwawasvika, H.; Size, P. y Mutatu, W. (2021). Relationship between different soil pH measurement methods for Zimbabwe sugar industry. *Proceedings of the Annual Congress-South African Sugar Technologists' Association*, 93, 193-207. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220257673>.
- Sadovski, A. N. (2019). Study on pH in water and potassium chloride for Bulgarian soils. *Eurasian Journal of Soil Science (EJSS)*, 8(1), 11-16. <https://doi.org/10.18393/ejss.477560>.
- Schober, P.; Boer, C. y Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>.

- United States Department of Agriculture (USDA). (2018). *Soil Survey Manual, USDA Handbook 18* (Issue 18). Washington. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
- Wang, A.; Li, D.; Huang, B. y Lu, Y. (2019). A brief study on using pHH₂O to predict pHKCl for acid soils. *Agricultural Sciences*, 10, 142-149. <https://doi.org/10.4236/as.2019.102012>.
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. (15° ed.). Columbus. Pearson Education. https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Wang, Q.; Yu, H.; Liu, J. y Li, F. (2018). Attribution of soil acidification in a large-scale region: artificial intelligence approach application. *Soil Science Society of America Journal*, 82(4), 772-782. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.08.0304>.
- Wei, H.; Liu, Y.; Xiang, H.; Zhang, J.; Li, S. y Yang, J. (2019). Soil pH responses to simulated acid rain leaching in three agricultural soils. *Sustainability*, 12(1), 280. <https://doi.org/10.3390/su12010280>.
- Zapata, R. (2022). *Los procesos químicos del suelo*. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. https://ciencias.medellin.unal.edu.co/centros/centro-editorial/images/libros-gratis/Zapata2020_compressed.pdf