

Relación entre el pH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia

Ramírez Velásquez, Iliana María; Vargas Ramírez, Andrés Felipe; Arroyave Cadavid, Andrés Felipe

Iliana María Ramírez Velásquez
ilianaramirez@itm.edu.co
Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín,
Colombia

Andrés Felipe Vargas Ramírez
andresvargas@itm.edu.co
Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín,
Colombia

Andrés Felipe Arroyave Cadavid
andresfarroyave@yahoo.es
Universidad de Medellín, Colombia

Revista Ingenierías USBMed
Universidad de San Buenaventura, Colombia
ISSN-e: 2027-5846
Periodicidad: Semestral
vol. 13, núm. 2, 2022
ingenierias.usbmed@usb.edu.co

Recepción: 08 Mayo 2020
Revisado: 06 Noviembre 2020
Aprobación: 30 Noviembre 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/536/5363548006/>

Resumen: Para asegurar un suelo adecuado para la agricultura, es muy importante medir el pH del suelo y su conductividad eléctrica (CE) puesto que estas variables pueden usarse para predecir la disponibilidad de nutrientes para las plantas en el suelo. Por lo tanto, en este estudio se estudiaron el pH y la CE para un suelo ubicado en Santa Elena, un pueblo rural cerca de Medellín, Colombia. El pH del suelo se midió en el laboratorio mediante extracción con agua y soluciones de CaCl₂, y también se midió en el campo. La CE del suelo se midió en el laboratorio utilizando extracción con agua. Los datos se usaron para trazar mapas de Variabilidad para pH y CE, y la regresión lineal de Deming se usó para encontrar las correlaciones entre las variables. Se encontró que el pH del suelo de la extracción de agua tenía una alta correlación con la CE del suelo.

Palabras clave: pH del suelo, conductividad eléctrica del suelo, mapas de variabilidad.

Abstract: To assure an adequate soil for agriculture, it is very important to measure the soil pH and its soil electrical conductivity (EC), because these variables can be used to predict the availability of nutrients for plants in the soil. Therefore, in this study pH and EC were studied for a soil located in Santa Elena, a rural town close to Medellín, Colombia. Soil pH was measured in the laboratory using extraction with water and solutions of CaCl₂, and it was also measured in the field. Soil EC was measured in the laboratory using extraction with water. The data were used to plot Variability maps for pH and EC, and Deming Linear regression was used to find the correlations among the variables. It was found that Soil pH from water extraction had a high correlation with soil EC.

Keywords: Soil pH, Soil Electric Conductivity, Variability Maps.

I. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país que tiene un alto potencial económico en la agricultura, por lo tanto, es importante comprender el comportamiento del suelo y cómo se puede mejorar la disponibilidad de nutrientes en éste. El rendimiento de un cultivo depende de varios factores, como el tipo de suelo, el historial del

cultivo, la posición del paisaje, las propiedades físicas y químicas y la disponibilidad de nutrientes [1]. Entre las variables fisicoquímicas importantes, se tiene la conductividad eléctrica CE y el pH del suelo, que pueden proporcionar información básica sobre la disponibilidad de nutrientes de los cultivos, la actividad microbiana, la descomposición de la materia orgánica, la toxicidad, entre otros [2]. Los procesos del suelo tales como: actividad de nitrificantes y fijadores de nitrógeno, formación de humus, capacidad de intercambio catiónico, reducción de óxido y la dinámica de los nutrientes de las plantas están relacionados con el pH del suelo, por lo tanto, la medición de este indicador es una variable incluida en los procedimientos de análisis del suelo. La medición del pH del suelo puede verse afectada por la presencia de electrolitos y estos pueden variar con las condiciones climáticas. Se han desarrollado varios métodos para evitar este problema, por ejemplo, el pH del suelo medido en soluciones de CaCl. o KCl se ve menos afectado por la concentración de electrolitos [2].

Se han llevado a cabo varios enfoques relacionados con las mediciones de pH por ejemplo, en la literatura se presenta la medición de pH en agua y CaCl. para diferentes tipos de suelo, encontrando que existe una correlación en el pH medido en el agua con el pH medido en CaCl. o KCl dependiendo del tipo de suelo [3].

Otros autores están orientados a desarrollar nuevos sensores que puedan medir el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura del suelo simultáneamente. En particular, se ha reportado la fabricación de un pequeño chip sensor multimodal que incluye un área de detección de pH, un área de detección de CE y un área de detección de temperatura: el sensor es capaz de medir la conductividad eléctrica del suelo para soluciones durante 6 días de forma continua [4].

Comprender la variabilidad espacial de las propiedades del suelo podría ser más importante que los valores promedio del pH y la conductividad eléctrica, ya que puede llevar a implementar un tratamiento específico de un sitio para mejorar la uniformidad en el rendimiento de un cultivo [5]. En esta línea de trabajo, se muestra aquí específicamente un estudio de la variabilidad espacial de la compactación del suelo, la conductividad eléctrica, el pH, la textura y la correlación de estas variables con la productividad. Ellos encontraron que las propiedades fisicoquímicas del suelo pueden usarse para dividir el campo experimental en varias zonas, y estas zonas pueden correlacionarse con la productividad [5]. Otras investigaciones consultadas del tema se centran en el mapeo del pH de un suelo de forma automática. Específicamente, se tiene el reporte del uso de un sensor disponible comercialmente para medir el pH del suelo in situ. El sistema completo consiste en un sensor que permite un muestreo del suelo, un subsistema de medición de pH a partir de electrodos y otro de lavado con agua. Este sistema se conecta a un vehículo para medir el pH mientras esta está en movimiento. Se realizaron pruebas en tres campos diferentes y determinaron que existe un alto grado de relación lineal entre los valores estándar de pH del suelo en CaCl. y los valores de pH del sensor [6].

Por otro lado, a partir de las mediciones de variables fisicoquímicas de un suelo, es posible crear mapas continuos a partir de la interpolación de datos discretos. En esta ruta, se han desarrollado varios enfoques para la interpolación espacial de las propiedades del suelo y el mapeo digital de éste, incluidos: modelos de regresión múltiple basados en los factores de formación del suelo, atributos del terreno, coordenadas espaciales o componentes principales derivados, suavizado (splines) y funciones y geoestadísticas basadas en regresión en procesos Gaussianos, y sus variaciones [7]. Adicionalmente, las mediciones en mención pueden estar correlacionadas, por ejemplo, se ha estudiado el pH y la conductividad eléctrica aparente (ECa) a diferentes profundidades del suelo con el fin de encontrar la correlación entre estas dos variables y la profundidad del suelo [1].

Estudios recientes han determinado la importancia de la selección del método apropiado para el análisis y caracterización de los cambios de salinidad y alcalinidad del suelo, a través de mediciones de variables tales como pH y conductividad eléctrica. Su relevancia radica en la precisión de la estimación de estas variables para tener conocimiento acerca la recuperación adicional de la tierra [8].

En el presente trabajo se estudiaron el pH y la conductividad eléctrica del suelo, en adelante abordará esta variable como CE. Se llevaron a cabo mediciones de pH in situ y en el laboratorio a partir de muestras de suelo

extraídas utilizando agua y solución de CaCl₂. La CE se midió solo en el laboratorio. Los objetivos de este estudio fueron (a) caracterizar las variaciones espaciales del pH del suelo y la CE del suelo y (b) determinar si existe correlación significativa entre el pH y la CE.

II. METODOLOGÍA

Este estudio se realizó en una parcela de 100 m² ubicada en el corregimiento de Santa Elena perteneciente a la ciudad de Medellín. Las coordenadas geográficas son: N 06°16'47.6", W 075°30'09.8". La temperatura promedio durante el estudio fue de 15°C y el rango de precipitación promedio de 1938 mm.

A. Toma y preparación de muestras

El terreno es aparentemente homogéneo con leves inclinaciones. Como primera medida se llevó a cabo una prueba piloto en el terreno de estudio, cuya área es de 100 m² y para determinar el número de observaciones de dicha prueba, se tuvo en cuenta la forma del terreno y el conocimiento de los expertos acerca del comportamiento de las variables de estudio.

Con la información derivada de la prueba piloto, el tamaño de la muestra n se determinó a partir de la expresión

$$n = \frac{t^2 CV^2}{r^2}$$

, donde t es el valor de Student para un nivel de de 0.05, es el coeficiente de variación y r es el rango aceptable de precisión (error permitido) [9].

La Tabla 1 muestra los valores utilizados para calcular el valor de n.

TABLA 1.
Datos para el cálculo del tamaño de la muestra.

Media	t	CV	Error permitido	n
5.453	0.033	6.483	0.05	18.309

n se aproxima a 18

Luego se muestreó el campo en una cuadrícula de

3.3 m 5 m, este muestreo dio como resultado 6 sitios de muestreo, en cada uno de ellos, se tomaron tres muestras, para un total de 18 muestras.

En cada sitio de muestreo, se retiró la capa superficial de hierba y hojarasca, luego se usó una pequeña pala para recolectar una muestra de una profundidad de 0 a 20 cm, que consistía en un bloque de tierra de 400 g, a cada bloque de tierra. Las capas externas se eliminaron para evitar la contaminación cruzada entre las muestras, y la pala se limpió entre las muestras. Cada muestra se puso en una bolsa de plástico sellada y etiquetada. Todas las muestras se almacenaron en una habitación con humedad y temperatura controladas [10].

Para eliminar pequeñas piedras, raíces y otros desechos, cada muestra se tamizó a través de una malla #4 y #8, luego se secaron en un horno a 40°C durante 24 horas. Luego cada muestra se tamizó con una malla #10. Las muestras se volvieron a colocar en bolsas de plástico etiquetadas y selladas, y se almacenaron en las mismas condiciones que antes. Cada muestra se subdividió en 2 muestras para las mediciones de laboratorio.

B. Medición de pH y CE

Desde la perspectiva de los cultivos, el pH se define como la ausencia o presencia de iones de hidrógeno (H_3O^+) en el suelo, cuanto mayor sea la concentración de protones, más acidez presenta el suelo. Por ejemplo, un suelo extremadamente ácido tiene un pH por debajo de 4.5.

De otro lado la conductividad eléctrica (CE) da cuenta de manera indirecta de la concentración de sales solubles, y se define como la relación constante de la densidad de corriente al campo eléctrico, en otras palabras, es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica aplicado, entre mayor sea la conductividad eléctrica más alto es el valor de la concentración de sales. El pH de un suelo controla las reacciones químicas que determina la disponibilidad de los nutrientes. La CE es directamente proporcional a la salinidad, que no es buena porque afecta el crecimiento de las plantas. A continuación, se describe de manera breve cómo se llevaron a cabo las medidas de las variables aquí consideradas en laboratorio y en campo [11]-[13].

En la medición de la CE se empleó un equipo Hach H170G. Esta medición se llevó a cabo de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC 5596 método B, el cual consiste en realizar una extracción de 20 g de muestra de suelo con 100 mL de agua desionizada a 20°C. Se agitó por un tiempo de 30 minutos y luego se filtró empleando un papel de filtro. El equipo fue verificado previo a la medición y se realizó la medida 2 veces por 2 operadores.

Para la medición del pH se utilizó un equipo Hach H170G con una sonda de pH tipo ISFET. Esta medición se realizó de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC5264, se empleó una proporción de suelo a agua de 1:2 peso/volumen, se agitó la suspensión por 20 minutos y luego se dejó reposar por 30 minutos. El equipo fue verificado previo a la medición. Cada muestra fue medida dos veces por dos operadores. De manera similar se procedió para la medición en solución

0.01 M de cloruro de calcio para la extracción en lugar de agua.

Para la medición directa del pH en el suelo, se descartaron los primeros 5 cm superficiales del suelo, luego se empleó el punzón incluido en el equipo para realizar una perforación de 20 cm. El electrodo se introdujo directamente en la perforación y se realizaron las medidas. El equipo fue verificado previo a la medición.

C. Mapas de pH y CE

La interpolación de datos permite crear una superficie continua a partir de datos discretos. El mapa se genera considerando las características del suelo y la estructura espacial de los datos. La literatura presenta tres tipos de interpolación: la determinística, la estadística y creación de superficies.

En cuanto a interpoladores, existe una técnica denominada Kriging o krigeado la cual pertenece a la clase de interpolación estadística. Emplea un modelo de variograma para la obtención de los ponderados que se asignan a cada punto de referencia usado en la estimación, es decir, se selecciona el promedio ponderado de los valores de las muestras que tenga la mínima varianza [7], [14], [15].

Para la obtención de los mapas de las variables pH (medido en laboratorio con agua y $CaCl_2$ y medido en campo) y conductividad eléctrica, se utilizó el método en mención y se utilizó el software ArcGIS.

D. Análisis estadístico

Luego de obtener la información brindada por los mapas de cada una de las variables de estudio, se procede a comparar los métodos de medición del pH a través del análisis de regresión lineal Passing-Bablok tomando como referencia el pH medido en agua y con él se compararon los demás métodos.

En la regresión lineal Passing-Bablok, los resultados se interpretan de la siguiente manera: si el valor de 0 está incluido en el intervalo de confianza (IC) del intercepto del modelo que corresponde a una línea recta, y la unidad está incluido en el intervalo de confianza (IC) de la pendiente de dicho modelo, los dos métodos son comparables dentro del rango de concentración investigado. Si el 0 no está en el IC del intercepto se presenta una diferencia sistemática y si el 1 no está en el IC de la pendiente, implica que hay una diferencia proporcional entre los dos métodos [16], [17].

Por último, se examina la correlación entre las mediciones de la CE y las de pH del suelo con el fin de obtener un posible modelo que asocie las variables mencionadas. Las técnicas estadísticas se llevaron a cabo con el entorno y lenguaje de programación R y el software IBM SPSS Statistics 24.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Mapas de pH y CE

La Figura 1 representa el mapa de la medición de pH medida en agua (a), en CaCl₂ (b), medido en campo (c) y de la conductividad eléctrica (d). Al lado derecho de cada figura, se muestra el rango de valores de cada variable y su respectivo color.

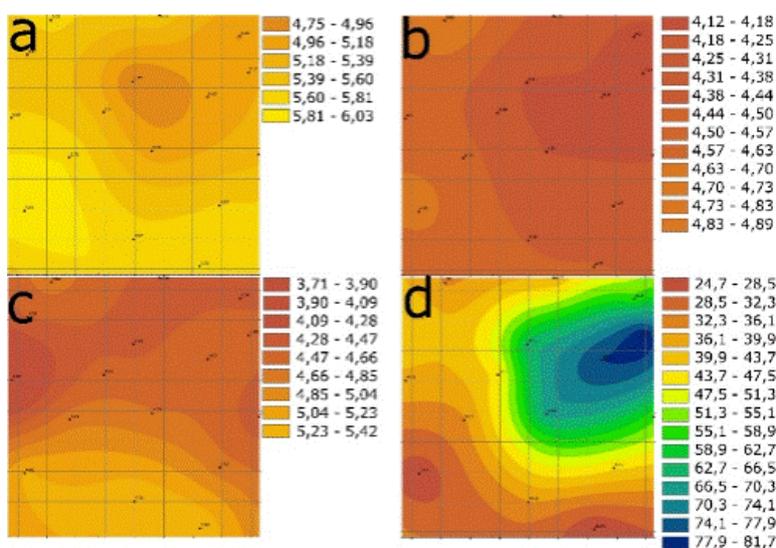


FIGURA 1. Mapa generado en ArcGIS para representar las mediciones de pH y CE

Se puede ver en los mapas de la Figura 1 que existe un acuerdo entre el pH en el agua y el pH en CaCl₂, ya que los valores más altos de pH se encuentran aproximadamente en las mismas áreas, no existe una asociación clara entre los valores de pH medidos en laboratorio (agua y CaCl₂) y pH medidos en el campo.

También se puede observar que podría existir una relación entre el pH medido en el agua y la CE, porque en las áreas donde el valor del pH es alto corresponde a un valor bajo de la CE, por lo tanto, el pH y la CE podrían estar asociados. Para el pH en CaCl₂ y CE también podría existir una relación, pero en una proporción menor que para el caso anterior. No existe una relación clara entre el pH de campo y la CE.

B. Análisis estadístico

La regresión Passing-Bablok es una técnica estadística para el análisis de regresión no paramétrico, adecuado para estudios de comparación de métodos. Como se mencionó antes, el conjunto de mediciones de referencia es el de pH medido en agua (pH_agua); en este primer caso, se compara con el pH medido en cloruro de calcio (pH_CaCl₂). La Tabla 2 muestra los estadísticos descriptivos de los dos métodos de medición, el método de referencia tiene una media mayor, y también una mayor varianza.

TABLA 2.
Estadísticos descriptivos (pH_agua, pH_CaCl₂).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	D. T.
pH_agua	4.77	6.04	5.45	0.35
pH_CaCl ₂	3.95	4.98	4.32	0.26

D.T.: desviación típica

Los coeficientes del modelo de regresión lineal PassingBablok se registran en la Tabla 3.

TABLA 3.
Coeficientes del modelo (pH_agua, pH_CaCl₂).

	Valor	L.I. del IC	L.S. del IC
Intercepto	0.65	1.34	1.42
Pendiente	0.67	0.53	1.03

El valor del intercepto es 0.65, y el intervalo de confianza IC incluye el valor 0, ello implica que la diferencia sistemática de los dos métodos es igual a 0. Además, el coeficiente de la pendiente es 0.67 y el intervalo de confianza IC incluye el valor 1, de allí se desprende que no hay diferencias proporcionales entre los dos métodos.

La Figura 2 muestra la línea recta la cual confirma lo previamente afirmado.

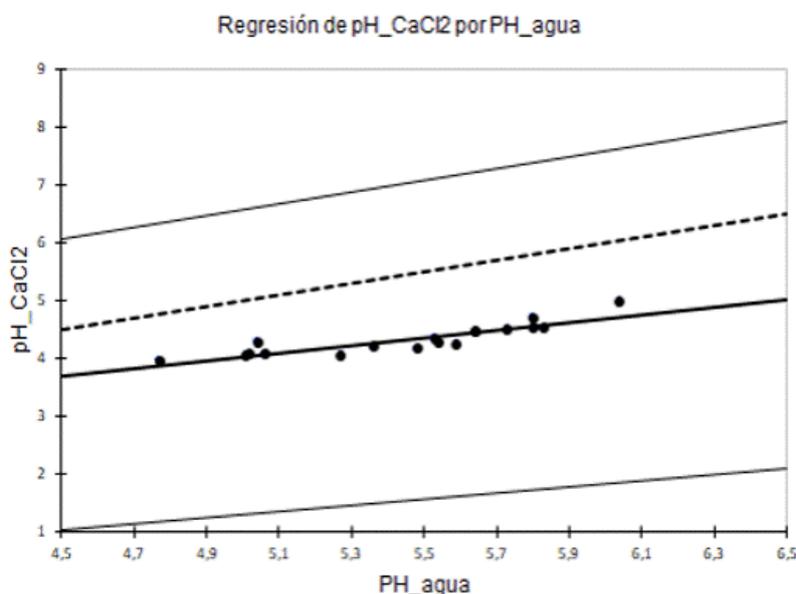


FIGURA 2.
Regresión Passing-Bablok de pH en agua y CaCl2

Adicionalmente, se puede comprobar que el modelo se ajusta a un modelo lineal, para ello se aplica la prueba de linealidad. La Tabla 4 muestra los resultados de la prueba.

TABLA 4.
Test de linealidad.

Max(Cusum) (Valor observado)	5.00
Max(Cusum) (Valor crítico)	5.76
valor-p	0.12
alfa	0.05

De acuerdo con la prueba, la hipótesis nula es que la relación entre las variables es lineal, y la hipótesis alternativa niega la hipótesis nula. Según la Tabla 4, el valor-p calculado es mayor que el nivel de significancia 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula.

Para el caso de evaluar la medición de pH en campo, se toma de nuevo como referencia el pH medido en agua. La Tabla 5 informa acerca de los estadísticos descriptivos de los dos métodos, el método de referencia tiene una media mayor, y también una menor varianza.

TABLA 5.
Estadísticos descriptivos (pH_agua, pH_Campo).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	D. T.
pH_agua	4.77	6.04	5.45	0.35
pH_Campo	3.02	5.68	4.72	0.62

D.T.: desviación típica

TABLA 6.
Coeficientes del modelo (pH_agua, pH_Campo).

	Valor	L.I. del IC	L.S. del IC
Intercepto	-4.10	-14.71	0.15
Pendiente	1.63	0.85	3.53

Los coeficientes del modelo de regresión lineal PassingBablok se registran en la Tabla 6.

El valor del intercepto es 4.10, y el intervalo de confianza IC incluye el valor 0. El coeficiente de la pendiente que es 1.63. El valor 1 está incluido en el intervalo de confianza IC, lo que quiere decir que no hay diferencias sistemáticas y diferencias proporcionales entre los dos métodos. En la Figura 3 se observa la línea recta.

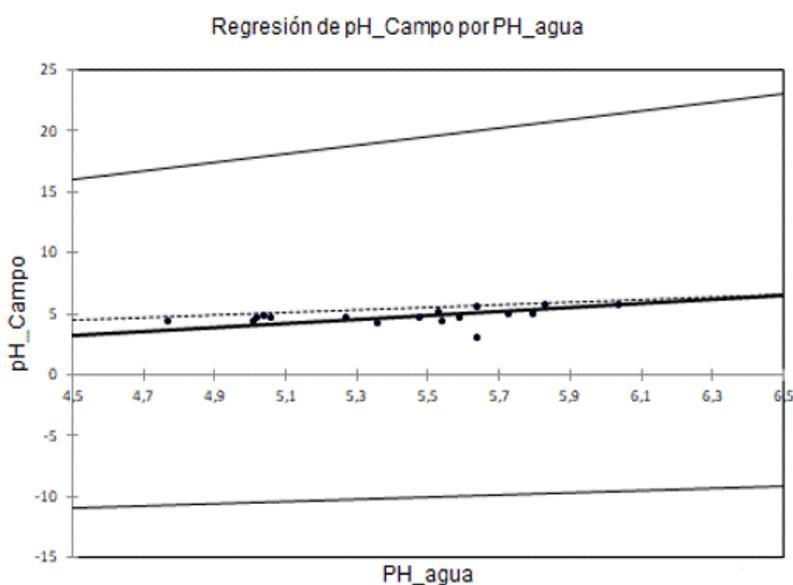


FIGURA 3.
Regresión Passing-Bablok de pH en agua y Campo

De acuerdo con lo anterior los métodos concuerdan y se puede verificar con la prueba de linealidad cuyo resultado se presenta en la Tabla 7.

TABLA 7.
Test de linealidad.

Max(Cusum) (Valor observado)	3.00
Max(Cusum) (Valor crítico)	5.76
valor-p	0.67
alfa	0.05

Como se describió antes, la hipótesis nula es que la relación entre las variables es lineal. Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significancia 0.05, no se puede rechazar dicha hipótesis.

Descrita la concordancia entre los métodos de medición, se continúa con el estudio de la relación entre la CE y el pH medido en campo. Para ello, se aplica el modelo de regresión Deming para observar el comportamiento de las variables. La Figura 4 representa el modelo mencionado.

Según la Figura 4 la posible relación entre la CE y el pH es negativa. El coeficiente de correlación es -0.88. Descrita la concordancia entre los métodos de medición y esbozar la posible relación entre las variables, se continúa con el estudio de la relación entre la CE y el pH medido en campo. La regresión de las variables observadas puede conducir a un sesgo extremo al estimar la pendiente. Esto se debe a la presencia de

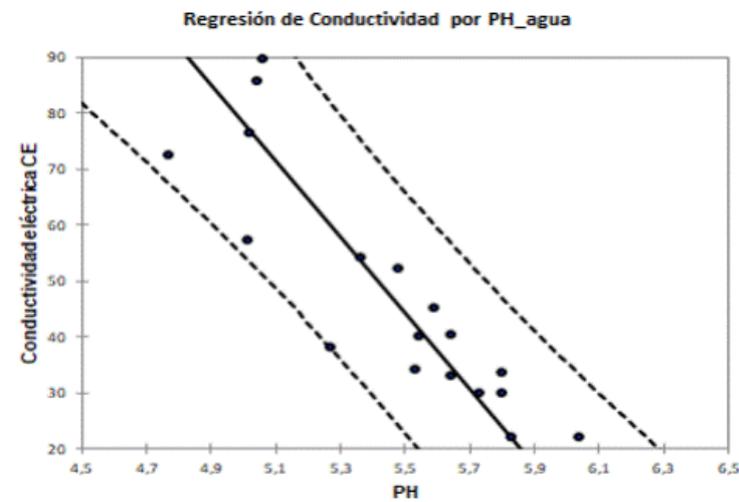


FIGURA 4.
Modelo de CE contra pH

un error de medición tanto en la variable respuesta como en las variables explicativas. Para ajustar modelos lineales cuando una o más variables son medidas con error, existen varias técnicas, entre ellas la denominada Simulación/extrapolación (SIMEX).

SIMEX es un método de inferencia basado en simulación para modelos de error de medición paramétricos en el que la varianza del error de medición es conocida o bien estimada, tal vez a partir de experimentos de calibración. El procedimiento consta de cuatro pasos: agregar un error de medición adicional en incrementos conocidos los datos; cálculos informáticos a partir de los datos corruptos; establecer una tendencia entre estas estimaciones y la varianza de los errores agregados, y extrapolar esta tendencia al caso de error de medición. Agregar error puede parecer contrario a la intuición. Sin embargo, el objetivo no es recuperar o incluso estimar los valores de medición verdaderos, sino calcular los parámetros por extrapolación al caso de las variaciones de error cero [18].

Considerando lo anterior, se extrapola la pendiente correspondiente a varianza cero. La Figura 5 muestra la gráfica de la media de las pendientes para cada varianza extra añadida.

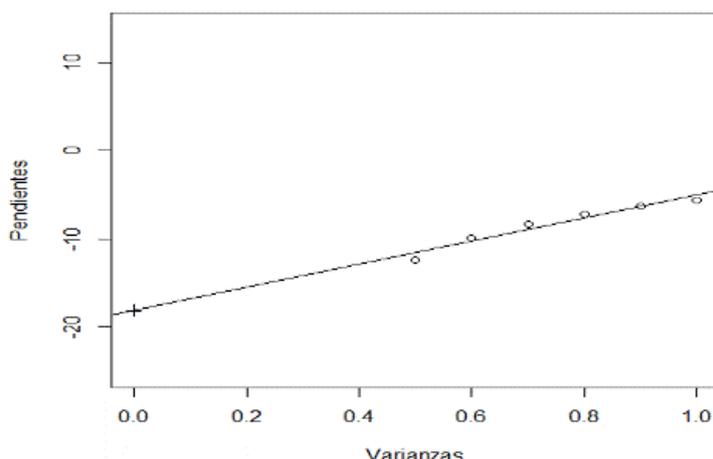


FIGURA 5.
Extrapolación de la pendiente a varianza cero

Se predice que una estimación para las pendientes es 18.11 a una varianza de cero. Los parámetros de extrapolación para el caso de varianza cero se pueden observar en el resumen que exhibe la Tabla 8:

TABLA 8.
Coeficientes del modelo.

Estimados	Error típico	t	Sig.	
Intercepto	18.11	1.21	-14.97	0.000
Varianza	13.08	1.57	8.32	0.001

Para los coeficientes del modelo de regresión, las puntuaciones t indican que las variables tenidas en cuenta aportan significativamente al modelo de predicción, los valores obtenidos se pueden generalizar a la población ($t = 14.97$ y $t = 8.32$), $p < 0,05$.

Esta información sugiere un modelo en donde la variable respuesta son las pendientes de los modelos ajustados y la variable explicativa son las varianzas correspondientes. En la Tabla 9 se puede observar el resumen del modelo.

TABLA 9.
Resumens del modelo.

R2	R2 ajustado	F	p-valor
0.94	0.93	69.28	0.001

Para este modelo se explica el 94 % de la varianza de la variable dependiente, es decir el coeficiente de determinación (R2) es 0.94.

Al resultado se llega al simular controladamente los efectos de añadir un error aleatorio replicando el experimento 1000 veces.

IV. CONCLUSIONES

Los métodos de medición mostraron concordancia, teniendo en cuenta que el pH medido en campo frente a las mediciones de pH medido en laboratorio con las condiciones controladas presentó presencia de sesgo, pero no en alto grado, esto se pudo observar en los mapas incluidos en la figura 1, era de esperarse dado la imposibilidad de controlar el ambiente. Estas variaciones no se atribuyen al instrumento. Este resultado es importante, ya que la medición de pH puede realizarse con cualquiera de los tres métodos incluidos en este trabajo.

La CE presenta una correlación negativa con respecto al pH. La salinidad del suelo tiende a ser menor si el suelo presenta mayor en acidez, salinidad que se puede controlar con los fertilizantes.

Un problema importante con las variables que contienen errores que se requiere de procedimientos de corrección que necesitan una gran cantidad de esfuerzo en los cálculos matemáticos para formular un nuevo estimador. Con el método SIMEX esto no es necesario

ya que se calculan los parámetros de interés como si la medición no estuviera presente y luego realiza el promedio, el ajuste del modelo y la extrapolación. Por lo tanto, conceptualmente, SIMEX es mucho más fácil de realizar que otros métodos.

REFERENCIAS

- [1] I. Nur Aini, M. H. Ezrin y W. Aimrun, "Relationship between soil apparent electrical conductivity and pH value of Jawa series in oil palm plantation," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, págs. 199-206, 2014.
- [2] B. Minasny, A. B. McBratney, D. M. Brough y D. Jacquier, "Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration," *European Journal of Soil Science*, vol. 62, n.o 5, págs. 728-732, oct. de 2011.
- [3] D. Čapka, I. Kisić, Z. Zgorelec y A. Jurišić, "Determination of soil pH in dominant soil types in the Republic of Croatia," *Agriculturae Conspectus Scientificus*, vol. 74, n.º1, págs. 13-19, 2009.
- [4] M. Futagawa, T. Iwasaki, H. Takao, M. Ishida y K. Sawada, "Fabrication of a multi-modal sensor with pH, EC and temperature sensing areas for agriculture application," en *SENSORS, 2009 IEEE*, IEEE, 2009, págs. 2013-2016.
- [5] E. Tola, K. A. Al-Gaadi, R. Madugundu, A. M. Zeyada, A. G. Kayad y C. M. Biradar, "Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity," *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 24, n.o 2, págs. 421-429, 2017.
- [6] M. Schirrmann, R. Gebbers, E. Kramer y J. Seidel, "Soil pH mapping with an on-the-go sensor," *Sensors*, vol. 11, n.o 1, págs. 573-598, ene. de 2011.
- [7] C. K. Gasch, T. Hengl, B. Gräler, H. Meyer, T. S. Magney y D. J. Brown, "Spatio-temporal interpolation of soil water, temperature, and electrical conductivity in 3D+T: The Cook Agronomy Farm data set," *Spatial Statistics*, vol. 14, págs. 70-90, nov. de 2015.
- [8] A. Datta, A. K. Mandal y R. K. Yadav, "Proper measurement of electrical conductivity and other parameters influence profile salinity and sodicity under different land uses," *Ecological Indicators*, vol. 101, págs. 1004-1006, jun. de 2019.
- [9] Z. Lozano, C. Bravo, F. Ovalles, R. M. Hernández, B. Moreno, L. Piñango y J. G. Villanueva, "Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos," *Bioagro*, vol. 16, n.o 1, págs. 61-72, 2004.
- [10] Ministerio del Ambiente de Perú, Guía para el muestreo de suelos, Lima, 2014.
- [11] USDANatural Resources Conservation Service, *Soil Quality Indicators: pH*, 1998.
- [12] W. Chesworth, Ed., *Encyclopedia of Soil Science*, Springer, 2008.
- [13] D. L. Corwin y S. M. Lesch, "Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, n.o 1-3, págs. 11-43, mar. de 2005.

- [14] S. J. Gumiere, J. A. Lafond, D. W. Hallema, Y. Périard, J. Caron y J. Gallichand, "Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: Characterisation and spatial interpolation methods," *Biosystems Engineering*, vol. 128, págs. 29-40, dic. de 2014.
- [15] H. Keskin y S. Grunwald, "Regression kriging as a workhorse in the digital soil mapper's toolbox," *Geoderma*, vol. 326, págs. 22-41, sep. de 2018.
- [16] R. F. Martin, "General Deming Regression for Estimating Systematic Bias and Its Confidence Interval in Method-Comparison Studies," *Clinical Chemistry*, vol. 46, n.o 1, págs. 100-104, ene. de 2000.
- [17] A. Carkeet, "Exact Parametric Confidence Intervals for Bland-Altman Limits of Agreement," *Optometry and Vision Science*, vol. 92, n.o 3, e71-e80, mar. de 2015.
- [18] J. P. Holcomb Jr, "Regression with covariates and outcome calculated from a common set of variables measured with error: estimation using the SIMEX method," *Statistics in medicine*, vol. 18, n.o 21, págs. 2847-2862, oct. de 1999.