

Muestreo de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales

Saquicela Rojas Rodrigo Alberto
<https://orcid.org/0000-0003-2608-3150>
rodrigo.saquicela@ute.edu.ec
Maestrante del Instituto de Posgrado
de la Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador
Universidad UTE
Santo Domingo-Ecuador

Useche Castro Lelly
<https://orcid.org/0000-0002-4294-9009>
lelly.useche@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo-Ecuador

González Pedraza Ana Francisca
<https://orcid.org/0000-0002-4392-3724>
ana.gonzalez2@unipamplona.edu.co
Universidad de Pamplona
Pamplona-Colombia

Recibido (11/07/2022), Aceptado (17/09/2022)

Resumen. - Las propiedades de los suelos con pastizales de pastoreo frecuentemente se degradan en las zonas tropicales. El objetivo de este trabajo fue revisar la literatura de la teoría y resultados del muestreo y análisis de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de pastizales a nivel mundial y en Ecuador. Se revisó la metodología, resultados y discusión de 15 artículos del tema, disponibles en las bases de datos: Scopus, SciELO, ScienceDirect, Scimago Journal & Country Rank, Dialnet y SpingerLink; y la teoría respectiva de 5 libros. Se encontró que a nivel mundial existen trabajos de muestreo de suelos que evalúan la variabilidad espacial de sus propiedades; mientras que a nivel nacional los muestreos no consideran dicha variabilidad. Es importante llevar a cabo en Ecuador investigaciones de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales, que permitan tomar decisiones fiables para su manejo y conservación.

Palabras clave: Semivariograma, krigeado, variabilidad espacial del suelo, pastizal.

Sampling the spatial variability of grassland soil properties

Abstract. - The properties of grazed grassland soils are frequently degraded in tropical areas. The objective of this work was to review the literature on the theory and results of sampling and analysis of the spatial variability of grassland soil properties worldwide and in Ecuador. The methodology, results, and discussion of 15 articles were reviewed, available in the databases: Scopus, SciELO, ScienceDirect, Scimago Journal & Country Rank, Dialnet, and SpringerLink, and the respective theory of 5 books. It was found that worldwide there are soil sampling works that evaluate the spatial variability of their properties, while at the national level, the samples do not consider such variability. Therefore, it is crucial to conduct research in Ecuador on the spatial variability of soil properties with grasslands, allowing reliable decisions to be made for their management and conservation.

Keywords: Semivariogram, kriging, soil spatial variability, grassland.



I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un conjunto dinámico formado por partes físicas, químicas y biológicas que básicamente mantienen la productividad biológica y conservan la calidad del ambiente [8]. Dichas partes son propiedades que varían espacialmente en el suelo debido al manejo, clima y biota [19]. El pastoreo en un manejo que influye en sus propiedades, como la compactación que está relacionada con el pisoteo del ganado [6]. Así, a nivel mundial hay investigaciones de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de agricultura y pastizales [7], [12], [13], [17].

En Ecuador se desconoce la situación actual del muestreo de las propiedades de los suelos con pastizales de pastoreo, con fines de planificar diseños de muestreos que evalúen la variabilidad espacial y predigan con precisión el valor esperado de estas propiedades.

El objetivo de esta revisión de literatura fue conocer el estado actual del diseño y análisis de muestreo de la variabilidad espacial de propiedades de suelos de pastizales y el comportamiento de la variación de estas. Esta revisión se basa en el hecho de que las propiedades del suelo varían principalmente por el manejo agronómico, clima, biota y tipo de suelo [19]. La medición de propiedades del suelo con predicciones precisas permite tomar decisiones fiables para su manejo y conservación. De esta forma, existen herramientas para medir y analizar la variabilidad espacial de propiedades del suelo, como el muestreo basado en el modelo, semivariograma y krigeado [2].

Se analizaron diversas publicaciones científicas relacionadas con la medición de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de pastizales a nivel mundial y en Ecuador. También se examinaron libros acerca del muestreo y análisis de la variabilidad espacial del suelo. Se resumió la información encontrada.

El presente artículo tiene la siguiente estructura: resumen, traducción del resumen, introducción, desarrollo de la revisión de la literatura, metodología, resultados, conclusiones y referencias.

II. DESARROLLO

A. Propiedades del suelo

El suelo es una unidad dinámica con componentes físicos, químicos y biológicos que interactúan de forma compleja y definen su funcionamiento para variados fines. El funcionamiento se refiere a la calidad del suelo, que es su capacidad para impulsar la salud de animales y plantas, conservar la calidad ambiental y mantener la productividad biológica [8].

Los componentes del suelo son materia con cualidades y atributos denominados propiedades, que sirven para distinguir entre muestras de suelo [5], [8]. El suelo tiene propiedades físicas, químicas y biológicas. Las físicas no cambian la composición de la muestra mientras se mide u observa la propiedad [8]. Las químicas son los cambios en la composición de una muestra en condiciones de reacción química [5]. Finalmente, las biológicas son cambios causados por los organismos en las propiedades físicas y químicas [8].

Entre las propiedades físicas del suelo están la conductividad hidráulica, retención de agua, porosidad y propiedades mecánicas. Entre las químicas se encuentran el potencial de hidrógeno (pH), estado redox, retención de iones en el suelo, salinidad y sodicidad. Por último, las biológicas se consideran la mineralización potencial de nitrógeno o carbono, tasa de respiración, lombrices de tierra, biomasa bacteriana, diversidad bacteriana, presencia de patógenos [8].

Por otro lado, las propiedades del suelo tienen variación y correlación espacial debido al manejo agronómico, biota, tipo de suelo y clima [19]. Las observaciones más cercanas entre sí son frecuentemente más parecidas que las más lejanas [20]. Se ha reportado investigaciones de variabilidad espacial de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo [1], [6].

Medir con precisión las propiedades del suelo ayuda a su diagnóstico y toma de decisiones para su manejo y conservación. Para tal efecto, se han desarrollado herramientas para el diseño del muestreo de la variación espacial de las propiedades del suelo, tales como el muestreo basado en el diseño, que no considera la variación espacial; y el basado en el modelo, que considera la variación espacial [20].

B. Muestreo del suelo basado en el diseño

Existen dos enfoques para el muestreo de propiedades del suelo: los basados en el diseño y los basados en el modelo. El muestreo basado en el diseño sirve para muestrear con objetividad y sin sesgos. La inferencia se basa completamente en el diseño del muestreo y la independencia obtenida con la selección aleatoria de las muestras. Cada punto de muestreo en el espacio y tiempo se considera fijo, así como el valor de la variable que se obtenga en dicho punto [19], [18].

Con respecto a la inferencia, se infiere parámetros poblacionales (como media y varianza) únicos (¿cuánto es su valor?) para todo el dominio espacial, siempre que el tamaño de la muestra sea adecuado, con los supuestos de independencia espacial (que no exista correlación espacial de las variables) y que la población (de datos) esté distribuida idénticamente en el dominio espacial. Los estimadores de los parámetros son insesgados [18], [19], [20].

De esta forma, el muestreo basado en el diseño, para poblaciones idénticamente distribuidas e independientes, utiliza los diseños de muestreos aleatorios clásicos: simple, sistemático, estratificado, conglomerados, además del muestreo aleatorio en dos pasos. El último consiste en la elección aleatoria de estratos y elección aleatoria de muestras dentro de los estratos elegidos. En los muestreos simple, sistemático y conglomerados se supone la independencia y población idéntica dentro del dominio espacial; mientras que en el estratificado y de dos pasos la suposición es dentro de los estratos. No obstante, la variación y correlación espacial de las variables está presente en el dominio espacial [20], lo que no permitiría muestreos fiables basados en el diseño.

C. Muestreo del suelo basado en el modelo

El muestreo basado en el modelo permite muestrear sin el supuesto de independencia espacial, por tanto, no es necesaria la aleatorización para elegir cada punto de muestreo [19]. Los valores de la variable en cada punto de muestreo se consideran aleatorios y representa un muestreo único, la población, de infinitos muestreos posibles a un universo representado por un modelo estocástico (con variables aleatorias que cambian entre instantes de muestreo), la superpoblación. De esa manera, la aleatoriedad del diseño se genera por un conjunto de modelos estocásticos [18]. Además, se asume la independencia espacial al muestrear variables aleatorias de un universo estocástico. Un modelo estocástico usado es el krigado [19], [20].

En lo referente a la inferencia, las variables se suponen aleatorias en los puntos de muestreo de un diseño basado en el modelo, así, la verdadera media espacial también es aleatoria. Por tanto, se predice (¿dónde están los valores?) dicha media en el dominio espacial, no se estima con un único valor [18]. De esta manera se puede predecir valores de la variable en puntos no muestreados, elaborar mapas de la variación de las propiedades del suelo y estimar parámetros del modelo estocástico [20].

Por otro lado, existen los siguientes objetivos a cumplir cuando se muestrea con base en el diseño: minimizar la estimación de la varianza del error, cubrir por igual el dominio espacial y cubrir por igual en el espacio de las características [20]. Para minimizar la estimación de la varianza del error se usa el krigado, que estima imparcialmente los valores de una variable en puntos no muestreados con un mínimo error de estimación cuadrático medio. También existen las medias de superficie con no homogeneidad [20].

Por otro lado, para cubrir por igual el dominio espacial se asignan los puntos de muestreo de tal forma que cubran el dominio lo más uniformemente posible por medio de una cuadrícula finita, según el criterio de la mínima distancia promedio entre los puntos adyacentes de la cuadrícula aplicada a su centro [20]. De esta forma, la cuadrícula triangular equilátera cumple esta condición para un dominio sin restricciones en asignar puntos de muestreo [11]. También existen otras opciones para la distancia mínima, como la media ponderada de las distancias más cortas y la distancia media cuadrática basada en polígonos de Thiessen. Otras formas de cuadrícula usadas en la práctica son: muestreo en cuadrícula, muestreo en transecto, muestreo secuencial y muestreo anidado [20].

Para cubrir por igual el espacio de las características del dominio espacial se distribuye las unidades de muestreo de una forma tal que permita obtener la mejor distribución posible de la población. Para el efecto, se aplican dos criterios principales: el muestreo de hipercubo latino y el de Warrick-Myers. En caso de desconocer distribuciones de la población previas al muestreo se utiliza la experiencia en casos similares o datos auxiliares [20].

En lo referente al tamaño de la cuadrícula, para el muestreo de la variabilidad de propiedades químicas del suelo, varía entre 1 m a 100 m por lado. Los puntos de muestreo se ubican principalmente en el centroide o en las esquinas de las cuadrículas. También pueden estar distribuidos por toda la celda [19]. Por otro lado, la cantidad de puntos de muestreo para estimar semivarianzas (base para estimar el modelo estocástico) dentro de límites de confianza aceptables se sugiere al menos entre 100 a 150 puntos de muestreo [11]. Así mismo, se han desarrollado técnicas estadísticas para el análisis espacial de datos, como el semivariograma, para analizar la estructura de la variación espacial de propiedades del suelo; y el krigeado, que predice las variables espaciales en función del semivariograma [2].

D. Análisis estructural

El análisis estructural consiste en encontrar una función que explique la estructura de la dependencia o correlación espacial de las variables medidas. La función es la base para la predicción espacial de las variables y se denominan funciones de covarianza (covariogramas) y semivariogramas. La función de covarianza empírica se indica en (1), donde $\hat{C}(h)$ es la covarianza empírica para la clase de distancia de intervalo; es el número de pares de distancias separadas por la distancia h ; $Z(s_i)$ y $Z(s_i + h)$ y son los valores de la muestra medidos en la posición i e $i+h$, respectivamente; es la verdadera media de la población y se estima con el promedio de $Z(s_i)$; N es el número total de datos [10].

$$\hat{C}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - \mu][Z(s_i + h) - \mu] \quad (1)$$

La función del semivariograma empírico usualmente se calcula con el estimador de momentos de Matheron (2), donde es el semivariograma empírico para la clase de distancia de intervalo [2].

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_i + h)]^2 \quad (2)$$

No obstante, cuando la varianza residual es pequeña, el semivariograma se puede calcular de forma menos sesgada con el estimador de Cressie-Hawkins [2]. El semivariograma se completa al modelar el semivariograma en función de la distancia h , con los modelos exponencial (3), esférico (4), gaussiano (5); donde C_0 es la ordenada de origen del semivariograma (pepita o nugget) que representa la varianza total de los errores aleatorios o sin estructura espacial y los errores por no medir con menor distancia de intervalo; C es la varianza estructural o meseta del semivariograma (sill); R es el rango e indica la distancia desde el origen hasta cuando se llega a la meseta. El rango práctico es la distancia desde el origen hasta cuando la semivarianza es el 95 % de la varianzal total; siempre que el semivariograma llegue asintóticamente a la meseta; C_{95} indica la varianza umbral y a partir de ahí las observaciones son independientes [10]. Además, hay otros modelos como el exponencial-coseno, de onda, De Wijsian, cúbico, pentaesférico, pepita puro [10]. Los métodos de ajuste de los datos al modelo son por mínimos cuadrados y modelos lineales mixtos [2]. No obstante, cuando la varianza residual es pequeña, el semivariograma se puede calcular de forma menos sesgada con el estimador de Cressie-Hawkins [2]. El semivariograma se completa al modelar el semivariograma en función de la distancia h , con los modelos exponencial (3), esférico (4), gaussiano (5); donde C_0 es la ordenada de origen del semivariograma (pepita o nugget) que representa la varianza total de los errores aleatorios o sin estructura espacial y los errores por no medir con menor distancia de intervalo; C es la varianza estructural o meseta del semivariograma (sill); R es el rango e indica la distancia desde el origen hasta cuando se llega a la meseta. El rango práctico es la distancia desde el origen hasta cuando la semivarianza es el 95 % de la varianzal total; siempre que el semivariograma llegue asintóticamente a la meseta; C_{95} indica la varianza umbral y a partir de ahí las observaciones son independientes [10]. Además, hay otros modelos como el exponencial-coseno, de onda, De Wijsian, cúbico, pentaesférico, pepita puro [10]. Los métodos de ajuste de los datos al modelo son por mínimos cuadrados y modelos lineales mixtos [2].

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{R}\right) \right) & h \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2R} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{R} \right)^3 \right) & 0 < h \leq R \\ C_0 + C & h > R \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \right) \right) & h \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

La varianza estructural relativa es la razón entre la varianza estructural y la varianza umbral e indica el grado de estructuración espacial. Mientras más alto sea el valor de la varianza estructural relativa, más eficientes serán las predicciones estadísticas. Se clasifica en bajo, < 25 %; medio, 25 % a 75 %; alto, > 75 % [2].

E. Predicción espacial

La predicción de la variable en el dominio espacial (campo, de terreno, donde se muestrea) se denomina predicción espacial. El método de predicción común es el krigeado (kriging) que tiene su base en el semivariograma empírico. El krigeado genera el valor esperado con el mejor estimador lineal insesgado y el error de estimación (varianza krigeada). Existe el krigeado puntual y en bloques. El puntual se usa para predecir la variable en lugares (puntos) no muestreados mucho menores que las distancias espaciales; mientras que el krigeado en bloques es para predecir el promedio de la variable en una superficie mayor que el puntual, por medio de estimaciones puntuales en dicha superficie [2].

Entre el krigado puntal existen el krigado ordinario (6), simple (7) y universal (8) para la predicción espacial, donde es la variable predicha en cualquier nuevo punto; son los pesos asignados a cada observación con suma de uno; es función de las coordenadas espaciales. El ordinario y simple es para variables con distribución normal y el universal para variables con media que depende de la varianza. El krigado ordinario se utiliza para estimar localmente la media de la variable; el krigado simple, cuando se conoce la media poblacional de la variable; el universal, para estimar la influencia espacial de los datos con las coordenadas espaciales [2].

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N w_i Z(s_i) \quad (6)$$

$$\hat{Z}(s_0) = \mu + \sum_{i=1}^N w_i Z(s_i) \quad (7)$$

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N w_i f_k Z(s_i) \quad (8)$$

También existe el krigado indicador para variables binarias o variables continuas transformadas a binarias; el krigado disyuntivo (y el krigado indicador) para interpolación no lineal, el krigado intrínseco para variables heterogéneas con varias medias; kriging recursivo con el filtro Kalman y krigado con la máxima entropía bayesiana que tiene menos restricciones e incorporar más conocimiento previo [10]. En cuanto al krigado en bloques el más común es el krigado ordinario en bloques, donde es la variable predicha en el dominio centrado en el punto de interés [2].

III. METODOLOGÍA

La información de muestreo de variabilidad espacial de las propiedades del suelo de pastizales se hizo con el motor de búsqueda Google Académico. Las palabras clave usadas fueron las siguientes: "spatial variability soil physical", "kriging", "gaussian secuential simulation", "soil degradation", "soil properties spatial variation grass", "soil sampling", "grid soil sampling" y "variabilidad espacial do solo pastagem". Se eligieron 20 documentos científicos, de los cuales 15 eran artículos y 5 eran libros. Los artículos que generó la búsqueda estuvieron en bases de datos indexadas como Scopus, SciELO, ScienceDirect, Scimago Journal & Country Rank, Dialnet, SpringerLink. Los libros consultados fueron publicados por editoras como Elsevier, Springer, Pearson, Brujas, Mundi-Prensa y Wiley. Los artículos elegidos se revisaron principalmente las metodologías, resultados y conclusiones, y se escribieron los respectivos resúmenes. En los libros se revisaron conceptos de propiedades del suelo y de muestreo de la variabilidad espacial de dichas propiedades.

IV. RESULTADOS

Se presentan los resultados de la revisión de literatura de diseño de muestreo y análisis de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales.

A. Diseños de muestreo de la variabilidad espacial de propiedades del suelo a nivel mundial

En Portugal se diseñó un muestreo para medir la variabilidad espacial de la textura, humedad, pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio del suelo de un pastizal cultivado y con pastoreo de ovejas y ganado bovino. Se tomaron 76 muestras compuestas en un terreno de 6 ha dividido en cuadrículas de 28 m por 28 m. Las muestras se tomaron de 0-30 cm de profundidad del suelo. La muestra compuesta, para obtener una muestra por cuadrícula, consistió en cinco submuestras, cuatro muestreadas en las esquinas de la cuadrícula y una de su centro. Los datos se analizaron con estadística descriptiva, correlación y mapas de variabilidad espacial con un interpolador de distancia al cuadrado inverso [17].

En otra investigación llevada a cabo en Brasil en un pasto cultivado y con pastoreo de bovinos se muestreó propiedades del suelo para medir la variabilidad espacial y elaborar mapas de fertilidad del suelo. Se muestreó el pH, contenidos de carbono orgánico y arcilla, fósforo, calcio y magnesio disponibles, potasio aluminio e hidrógeno intercambiables, capacidad de intercambio catiónico efectiva, saturación de bases y conductividad eléctrica. El pastizal tenía 5,3 ha dividido en 270 potreros donde se tomaron 73 muestras de suelo, excepto para la conductividad eléctrica, que fueron 4 794. Se utilizó el muestreo por zonas de manejo, que consiste en delimitar zonas de similares rendimientos del pasto y presencia de malezas, dentro de las cuales se tomó una muestra compuesta de al menos 10 submuestras. No se hizo el muestreo por cuadrículas, no se indica las dimensiones de las zonas de muestreo. La profundidad de muestreo fue de 0-20 cm de profundidad. Se usó el semivariograma ajustado a modelos empíricos y programas de sistemas de información geográfica para elaborar mapas de fertilidad del suelo. No se indica la cantidad total de muestras para la conductividad eléctrica [7].

Así mismo, en Brasil, se muestreó un pastizal cultivado (degradado) para pastoreo las propiedades del suelo para evaluar su variabilidad espacial. Se muestreó el contenido de arena, limo, arcilla, de 0-20 cm de profundidad, la densidad aparente de 0-10 cm y de 10-20 cm, resistencia a la penetración cada 5 cm de profundidad de 0-30 cm, permeabilidad e infiltración tridimensional de 0-20 cm. El pH, potasio, calcio, magnesio, fósforo, aluminio, materia orgánica, suma de bases, acidez potencial, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases y de aluminio, se muestrearon de 0-10 cm y de 10-20 cm. El pastizal tenía 3,67 ha y se tomaron 50 muestras de suelo cada 30 m aproximadamente, con espaciados irregulares (no cuadrículas) entre puntos de muestreo (definidos con sistema de posicionamiento global, GPS, de navegación). Los datos se analizaron con estadísticas descriptiva, semivariograma ajustado a modelos y krigeado ordinario [6].

También en Brasil, se investigó las propiedades del suelo de un pasto cultivado y con pastoreo para evaluar la variabilidad espacial. Las propiedades muestreadas fueron: pH, calcio, magnesio y aluminio intercambiables, fósforo, acidez potencial, capacidad de intercambio catiónico, suma de bases, saturación de bases, saturación de aluminio y carbono orgánico. el muestreo se hizo en un área de 56 m por 80 m en cuadrículas de 8 m con espaciado regular. Los puntos de muestreo fueron las intersecciones de las cuadrículas, 88 en total. En cada punto de muestreo se tomaron muestras de 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm de profundidad. Los datos se analizaron con la estadística descriptiva, semivariograma ajustado al modelo esférico y krigeado [4].

En Brasil se muestreó un pastizal de pastoreo para medir la variabilidad espacial de flujo de dióxido de carbono, temperatura y humedad del suelo. El lugar de muestreo fue de 70 m por 70 m, en cuadrículas regulares de 10 m de espaciado. Los puntos de muestreo fueron las intersecciones de las cuadrículas y la profundidad de muestreo fue de 0-20 cm. Los datos fueron analizados con estadística descriptiva, semivariograma ajustados a modelos y krigeado [1].

Por otro lado, en Venezuela se muestrearon las propiedades del suelo de un cultivo agrícola: arena, arcilla, limo, pH y materia orgánica. Una finca de 286 ha se dividió en cinco unidades de suelo según la variabilidad analizada en una fotografía aérea (escala 1:25 000). Se muestreó en el primer horizonte genésico (no se indica la profundidad) por puntos de muestreo separados sistemáticamente entre sí de 50-100 m y se obtuvo un total de 67 muestras que cubría toda la finca. Los datos se analizaron con la estadística descriptiva, semivariograma ajustado a modelos teóricos y krigeado puntual [13].

En otro lugar, Arabia Saudita, se muestreó un suelo con pasto cultivado para medir la variabilidad espacial de sus propiedades: pH, conductividad eléctrica, textura y compactación. Se muestreó 16 ha de suelo por medio de cuadrículas regulares de 40 m por 40 m de separación. Los puntos de muestreo fueron 86, la profundidad de muestreo fue de 0-20 cm, excepto para la compactación que fue de 0-15 m. Los datos fueron analizados con semivariograma y krigeado ordinario [3].

Finalmente, en España se diseñó un muestreo para medir la variabilidad de la conductividad eléctrica, resistencia a la penetración y humedad gravimétrica del suelo de un cultivo de maíz, que antes tenía pasto de corte. El diseño consistió en 40 puntos de muestreo cada 10 cm hasta los 90 cm de profundidad, distribuidos en 6 ha, con muestreo no aleatorio dentro de los transectos donde se midió la conductividad eléctrica. La mínima distancia entre dos puntos adyacentes fue de 12 m y máxima de 113 m. La mínima distancia entre transectos fue de 4 m y la máxima de 30 m. Se usó la conductividad eléctrica del suelo para elegir los puntos de muestreo, por estudios previos que indican una relación de la conductividad eléctrica con la textura, humedad y salinidad del suelo. Los datos se analizaron con la estadística descriptiva, modelado del variograma y krigeado ordinario y universal [12].

B. Diseños de muestreo de propiedades del suelo en Ecuador

En una investigación realizada en El Oro se muestreó las propiedades del suelo de un pastizal cultivado para pastoreo y bosque: textura, pH, fósforo, potasio, calcio, hierro, magnesio, carbono orgánico, flora total y bacterias. Se muestreó 3 ha de 2 parcelas por medio de 2 transectos de 30 m cada uno, separados entre sí cada 50 m de distancia. Los puntos de muestreo fueron a los 0 m, 15 m y 30 m dentro de cada transecto por medio de calicatas escalonadas. Una de las parcelas tenía forma de L y se muestreó a los 0 m y 25 m en dirección vertical y de 25-50 m en dirección horizontal. La profundidad de muestreo fue de 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. También se muestrearon 2 ha de bosque nativo en 4 transectos ubicados a lo largo de los pastizales. El análisis estadístico se hizo con análisis de varianza y correlación. No se reporta análisis de la variabilidad espacial del suelo [9].

En otra investigación ejecutada en Quevedo se muestreó propiedades del suelo en cinco sistemas de uso del suelo: bosque primario, pasto cultivado para pastoreo, cacao, palma aceitera y maíz. Las propiedades evaluadas fueron: conductividad hidráulica, densidad aparente, densidad real, porosidad total, porosidad de aireación, textura, arcilla dispersa en agua, grado de floculación, materia orgánica e índice de materia orgánica. En cada sistema se tomaron muestras hasta 60 cm de profundidad cada 10 cm, por triplicado y se obtuvo 18 muestras en cada sistema. No se reporta las distancias de muestreo ni el área de muestreo. Se utilizó el análisis de varianza, correlación y análisis de componentes principales para el analizar los datos. No se indica análisis de variabilidad espacial del suelo [14].

Por otro lado, en Machala se investigó las propiedades del suelo de cinco agrosistemas: banano (8,32 ha), ciclo corto (1,74 ha), pastos cultivados para pastoreo (4,89 ha), cacao (5,98 ha) y bosque secundario (2,43 ha). El área total de los agrosistemas es de 23,36 ha. Las propiedades medidas fueron: densidad real, textura, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico. Dentro de cada agroecosistema se fijaron aleatoriamente tres puntos de muestreo y las muestras se tomaron cada 15 cm hasta los 30 cm de profundidad por medio de calicatas. En total se obtuvieron 6 muestras por agroecosistema. No se indica las distancias entre puntos de muestreo. El análisis estadístico empleado fue el análisis de varianza. No se reportan análisis de la variabilidad espacial del suelo [15].

Finalmente, en Pastaza se muestrearon propiedades de suelos con varios usos que fueron 3 chacras distintas (terrenos con varios cultivos), 3 pastos distintos y 1 boque natural: densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, porosidad total y de aireación, pH, calcio, magnesio, potasio, fósforo, zinc, aluminio, cobre, acidez intercambiable, carbono orgánico total, número de lombrices. En cada suelo se definió un transecto que cubrió el terreno y se muestreó sistemáticamente en 5 parcelas de 10 m por 10 m, donde se tomó una muestra compuesta de 5 submuestras, a profundidades de 0-10 cm y de 10-30 cm. Las muestras para el análisis físico y químico del suelo se tomaron separadas, que fueron 20 en total por parcela. No se indica en área de muestreo ni la distancia entre parcelas de muestreo. El análisis utilizado fue el análisis de varianza, análisis de componentes principales y correlación. No se indica análisis de variabilidad espacial del suelo [16].

C. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo a nivel mundial

Una de las investigaciones de muestreo de la variabilidad de propiedades del suelo cultivado con pastos de pastoreo que fue hecha en Brasil, se observa que el semivariograma indica independencia de propiedades de fertilidad del suelo entre 62 m para el Mg a 10 000 m para el pH. Los modelos que se ajustan al semivariograma fueron el esférico, gaussiano y exponencial. Para el suelo en particular muestreado se recomienda distancias de 62 m para el muestreo de la variabilidad espacial de las propiedades de fertilidad del suelo [7].

En otra investigación, asimismo en Brasil, la independencia espacial de propiedades físicas de un suelo con pastizal cultivado con pastoreo está entre 35 m para la resistencia a la penetración y 110 m para la infiltración. En cuanto a las propiedades químicas de fertilidad del suelo se observa la distancia de independencia espacial entre 50 m para la capacidad de intercambio catiónico y 140 m de distancia para el potasio. Se ajustan los modelos: exponencial, gaussiano y, en su mayoría, el esférico. Con respecto a la relación entre variables, la compactación del suelo no tiene relación con la textura del suelo, si tiene con el pisoteo del ganado. En general hay dependencia entre los mapas de pH, capacidad de intercambio catiónico y saturación de bases con los de materia orgánica, calcio y magnesio, las propiedades físicas del suelo permiten detectar áreas degradadas del pastizal y la producción del pasto está más influida por las propiedades físicas que por las químicas [6].

Por otro lado, en España, en un suelo cultivado con maíz que anteriormente tenía pasto de corte, se obtiene un semivariograma de la resistencia a la penetración hasta 50 cm de profundidad ajustado al modelo semiesférico; sin embargo, de 50-90 cm solo hay efecto pepita puro debido a que se tomaron frecuentemente datos poco útiles. Además, la conductividad eléctrica aparente (medida directamente en campo) representa eficientemente la variación espacial de la resistencia a la penetración, porque ambas variables están relacionadas con la humedad, además de mejorar ligeramente el krigado al ser usada como cokrigado universal [12].

Finalmente, en Venezuela se muestreó las propiedades de un suelo de cultivo agrícola y se reporta que la independencia espacial está entre 347,3 m para el limo y arena y 469,7 m para el pH. La dependencia espacial es fuerte para la materia orgánica, pH y limo; moderada para la arena; débil para la arcilla. El modelo que se ajusta a la semivarianza fue el esférico. El krigado muestra que el terreno se puede dividir en unidades de suelo con alta coincidencia a la división con base en la fotografía aérea, que inicialmente se usó para dividir el terreno en dichas unidades y muestrear [13].

D. Variabilidad de las propiedades de suelos en Ecuador

En una investigación realizada en los Ríos se muestreó propiedades físicas del suelo de sistemas de uso del suelo. El suelo con pasto cultivado para pastoreo presentó cambios de las propiedades principalmente en las capas superficiales del suelo, al igual que los monocultivos, al ser comparados con el suelo de bosque primario. Los cambios de las propiedades perjudicaron el movimiento vertical del agua en el suelo. Según el análisis de componentes principales el suelo del pastizal tiene los mayores contenidos de humedad volumétrica, limo, conductividad hidráulica y relación materia orgánica/(limo más arcilla). Asimismo, en todos los sistemas de uso de suelo la densidad aparente y materia orgánica, la densidad real y arcilla dispersa en agua, la conductividad hidráulica y materia orgánica/(limo más arcilla) tienen las mayores correlaciones positivas; mientras que la humedad volumétrica con la densidad real y arcilla dispersa en agua, la arena con la densidad aparente y materia orgánica tuvieron las mayores correlaciones negativas [14].

Por otro lado, en El Oro se muestreó en suelos destinados a varios agrosistemas y se encuentra que la densidad real, materia orgánica, del suelo con pastos cultivados para pastoreo es significativamente menor que el suelo de bosque, banano, cacao y maíz; mientras que la capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica del suelo de pastos son significativamente mayores que los demás cultivos nombrados [15].

Por último, en Pastaza se observó que el suelo destinado al cultivo de pastos tuvo diferencias significativas de propiedades físicas, químicas y biológicas al ser comparadas con el suelo de bosque y chacras. También se evaluó los suelos con un índice de calidad y reportan que los destinados a los pastos y chacras en general tienen una calidad levemente superior; sin embargo, las chacras y bosque tienen mayor calidad en la capa superficial del suelo. Los suelos de 10-30 cm de profundidad de los pastos tienen los mayores valores de densidad aparente, porosidad de retención y pH; mientras que a profundidades de 0-10 cm el aluminio, potasio, magnesio y calcio tienen los mayores valores. Por otro lado, la conductividad hidráulica saturada y la porosidad de aireación, el potasio, calcio y magnesio, la densidad aparente y porosidad de retención tienen las mayores correlaciones positivas; mientras que la densidad aparente con la conductividad hidráulica saturada y porosidad de aireación, y la porosidad de retención con la materia orgánica tienen las mayores correlaciones negativas [16].

CONCLUSIONES

Se ha realizado una revisión preliminar de literatura acerca del muestreo de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales. A nivel mundial existen diseños de muestreo de suelos con pastizales que evalúan la variabilidad espacial del suelo; mientras que a nivel nacional (Ecuador) los muestreos revisados no estudian la variabilidad espacial del suelo (relación de las propiedades con sus coordenadas donde fue medida), generalmente se muestrea dentro de parcelas de un terreno para estimar parámetros descriptivos de las propiedades del suelo, comparaciones entre diferentes usos del suelo, correlaciones o relaciones entre propiedades.

Los diseños del muestreo de la variabilidad espacial del suelo empleados son en cuadrículas regulares, transectos o sin un patrón regular de muestreo. Los muestreos en cuadrículas regulares tienen de 8 m hasta 40 m de lado de cuadrícula y los puntos de muestreo son generalmente en las intersecciones de la cuadrícula. Mientras que los muestreos en transectos o sin un patrón regular tienen distancias de 4 m a 50 m entre sí, con puntos de muestreo espaciados de 12 m a 113 m. El número de puntos de muestreo va de 40 a 88 distribuidos en áreas de 0,45 ha hasta 700 ha. La profundidad de muestreo va de 0-90 cm, en capas de al menos 5 cm de espesor.

Las técnicas usadas para estudiar la variabilidad espacial del suelo son el semivariograma ajustado a los modelos esférico, gaussiano y exponencial, y el krigado ordinario y universal. En general, las propiedades del suelo empiezan a tener independencia espacial a partir de los 35 m de distancia.

Finalmente, es importante llevar a cabo en Ecuador investigaciones de la variabilidad espacial de propiedades del suelo de pastizales, que permitan tomar decisiones fiables para su manejo y conservación.

REFERENCIAS

- [1] D. Silva, M. Costa, B. Mantovanelli, L. Coutrim, M. Rodrigues, J. Cunha, "Variabilidade espacial da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área de pastagem na região Amazônica, Brasil", *Revista de Ciências Agroveterinárias*, vol. 18, no. 1, pp. 119-126, noviembre 2019, [En línea], <http://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/10155/pdf>.
- [2] M. Córdoba, P. Paccioletti, F. Giannini, C. Bruno, M. Balzarini. "Guía para el análisis de datos espaciales en agricultura", 1ª ed., Serie Estadística Aplicada, Córdoba: Brujas, 2019, [En línea], https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/128391/CONICET_Digital_Nro.º5eab968-1409-4511-b6d6-07134144803b_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

- [3] E. Tola, K. Gaadi, C. Biradar, R. Madugundu, A. Zeyada, A. Kayad, "Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity", *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 24, pp. 421-429, abril 2017, [En línea], <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.04.013>
- [4] A. Lima, M. Campos, J. Cunha, L. Silva, F. Oliveira, B. Mantovanelli, E. de Brito, R. Gomes, 2019, "Spatial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earths under pasture in southern Amazonas, Brazil", *SOIL Discuss*, junio 2019, [Preimpreso], [En línea], <https://doi.org/10.5194/soil-2019-26>
- [5] R. Petrucci, F. Herring, J. Madura, C. Bissonnette, "Química general", Madrid: Pearson, 2011.
- [6] C. Grego, C. Gonçalves, S. Nogueira, F. Andrade, A. de Oliveira, C. Ferrer, A. dos Santos, J. de Abreu, "Variabilidade espacial do solo e da biomassa epígea de pastagem, identificada por meio de geostatística", *Pesquisa agropecuária brasileira*, vol. 47, np. 9, pp. 1404-1412, septiembre 2012, [En línea], <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900026>
- [7] A. Bernardi, K. Santos, G. Bettiol, L. Rabello, R. Ferreira, R. Inamasu, "Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil", *Precision Agriculture*, vol. 17, pp. 737-752, abril 2016, [En línea], <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9>.
- [8] A. Delgado, J. Gómez, "The Soil. Physical, Chemical and Biological Properties", en *Principles of Agronomy for Sustainable*, Springer, 2016. [En línea], https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46116-8_2
- [9] S. Barrezueta, K. Velepucha, L. Hurtado, E. Jaramillo, "Soil properties and storage of organic carbon in the land use pasture and forest", *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 36, no. 2, pp. 31-45, abril 2019, [En línea], <https://doi.org/10.22267/rcia.193602.116>
- [10] J. Wu, J. He, G. Christakos, "Quantitative analysis and modeling of earth and environmental data. Space-time and spacetime data considerations", India: Elsevier, 2022, [En línea], <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00055-9>
- [11] M. Oliver, R. Webster, "Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging", Springer, 2015, [En línea], https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-15865-5?error=cookies_not_supported&code=76d5fdbcb77b-4658-a544-6bf0d847312f
- [12] G. Machado, J. Dafonte, J. Bueno, M. Valcacer, E. Farias. "Using Soil Apparent Electrical Conductivity to Optimize Sampling of Soil Penetration Resistance and to Improve the Estimations of Spatial Patterns of Soil Compaction", *The Scientific World Journal*, pp. 1-12, diciembre 2014, [En línea], <http://dx.doi.org/10.1155/2014/269480>
- [13] A. González, J. Rey, J. Atencio, "Variabilidad espacial de los suelos de la unidad experimental la glorieta con fines agropecuarios", *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, suplemento 1, pp. 539-553, junio 2014, [En línea], https://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/suplemento_2014/ing/ingsupl12014539553.pdf
- [14] Novillo I.; Carrillo, M.; Cargua, J.; Moreira, V.; Albán, K.; Morales, K, "Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador". *Temas Agrarios*, vol. 23, no. 2, pp. 177 - 187, mayo 2018, https://www.researchgate.net/publication/329046726_Propiedades_fisicas_del_suelo_en_diferentes_sistemas_agricolas_en_la_provincia_de_Los_Rios_Ecuador
- [15] I. Rodríguez, H. Pérez, R. García, A. Quezada. "Efecto del manejo agrícola en propiedades físicas y químicas del suelo en diferentes agroecosistemas", *Universidad y Sociedad*, vol. 12, no. 5, pp. 389-398, septiembre 2020, [En línea], <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v12n5/2218-3620-rus-12-05-389.pdf>
- [16] C. Bravo, F. Goyes, Y. Arteaga, Y. Garcia, D. Changoluisa. "A soil quality index for seven productive landscapes in the Andean-Amazonian foothills of Ecuador", *Land Degradation & Development*, vol. 32, pp. 2226-2241, enero 2021, [En línea], <https://doi.org/10.1002/ldr.3897>
- [17] J. Serrano, S. Shahidian, J. Silva, "Spatial variability and temporal stability of apparent soil electrical conductivity in a Mediterranean pasture", *Precision Agriculture*, vol. 18, pp. 245-263, julio 2017, [En línea], <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9460-y>
- [18] D. Brus, J. de Gruijter, "Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion)", *Geoderma*, vol. 80, pp. 1-44, octubre 1997, [En línea], [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00072-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00072-4).

[19] P. Lawrence, W. Roper, T. Morris, K. Guillard, "Guiding soil sampling strategies using classical and spatial statistics: A review", *Agronomy Journal*, vol. 112, pp. 493-510, enero 2020. [En línea], <https://doi.org/10.1002/agj2.20048>.

[20] J. Wang, A. Stein, B. Gao, Y. Ge, "A review of spatial sampling", *Spatial Statistics*, vol. 2, pp. 1-14, agosto 2012, [En línea], <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2012.08.001>.



Rodrigo Saquicela, ingeniero agropecuario, especializado en nutrición vegetal. Maestrante del Instituto Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí, UTM, Portoviejo, Ecuador. Docente de la Universidad UTE.



Lelly María Useche Castro, ingeniero industrial, PhD. es estadística. Directora de del Grupo de Análisis Multivariante y Estocástico (G.A.M.E). Instituto de Ciencias Básicas, Departamento de Matemáticas y Estadística. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.



Ana Francisca González Pedraza, Ingeniera Agrónoma, Magister en manejo de los recursos agua y suelo. Doctora en Ciencias, mención Ecología. Docente de la Universidad de Pamplona, Pamplona. Norte de Santander, Colombia.