



**ARTÍCULO ORIGINAL**  
**INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES Y ESTADÍSTICA**

## **Análisis geoestadístico como base para contribuir al manejo sostenible del agrosistema azucarero**

## **Geostatistics analysis as base to contribute to sustainable management of the sugarcane agrosystem**

**Yasmany García-López**

 <http://orcid.org/0000-0002-5629-4074>

**Miriam Bárbara Orozco-Bravo**

 <https://orcid.org/0000-0002-8229-5011>

Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Antonio Mesa Hernández.  
Matanzas, Cuba

E-mail: [yasmany.garcia@epicamt.azcuba.cu](mailto:yasmany.garcia@epicamt.azcuba.cu), [miriam.orozco@epicamt.azcuba.cu](mailto:miriam.orozco@epicamt.azcuba.cu)

Recibido: 7 de abril del 2021.

Aprobado: 10 de junio del 2021.

### **RESUMEN**

En este trabajo se analizó la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo, como premisa del manejo sostenible en un agrosistema azucarero. El estudio se realizó en el año 2015, entre las coordenadas 22° 25' 42" N a 22° 29' 39" N y 80° 57' 22" O a 80° 52' 43" O de suelo *Ferralsol*, en Matanzas, Cuba. El muestreo de suelo se ajustó a áreas menores o iguales a cinco hectáreas, para un total de 671 muestras colectadas en 4086,23 hectáreas. El modelo exponencial ajustado al semivariograma experimental, arrojó un rango de 235 metros para este elemento. Se definieron sitios específicos asociados a categorías del elemento estudiado, que no coinciden con las estructuras para el manejo de fertilizantes en el agrosistema azucarero, lo que demostró la necesidad de dosis variables del fertilizante fosfórico dentro de los campos de caña de azúcar, para contribuir a la sostenibilidad de este agrosistema.

**Palabras claves:** Variabilidad espacial, manejo sostenible, agrosistema.

### **Abstract**

In this work it was analyzed the spatial variability of soil available phosphorus, as premise of sustainable management in a sugarcane agrosystem. The study it was carried out in the year 2015, among the coordinates 22° 25' 42" N to 22° 29' 39" N and 80° 57' 22" W to 80° 52' 43" W, on a *Ferralsol* soil, in Matanzas, Cuba. The soil sampling it was adjusted for smaller or equal to five hectares, for 671 soil samples collected in 4086, 23 hectares. The exponential model fitted to the experimental semivariogram, found a range of 235 meters for this element. Specific sites associated with categories of the studied element were defined, which did not match with structures for fertilizer management in sugarcane agrosystem, which demonstrated the need of variable doses of phosphoric fertilizer within sugarcane fields, to contribute to the sustainability of this agrosystem.

**Key words:** *spatial variability, sustainable management, agrosystem.*

## I. INTRODUCCIÓN

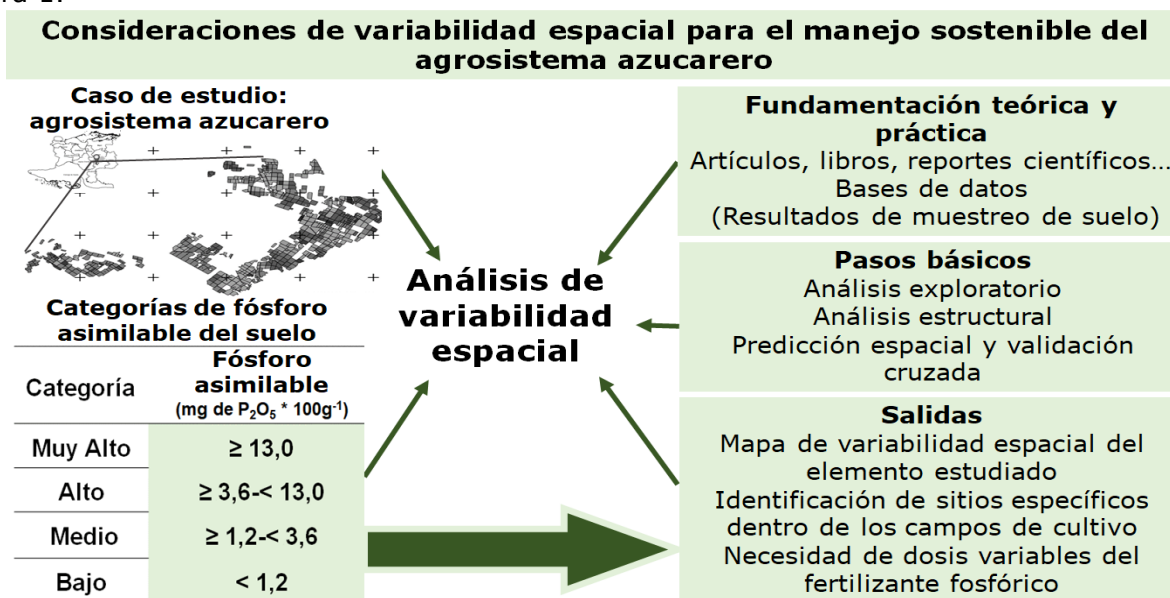
El suelo posee propiedades manejables que determinan la provisión de cultivos en los agrosistemas. Reforzar sus propiedades es esencial para mantener la productividad de la tierra y la calidad medioambiental [1].

El contenido de fósforo asimilable del suelo es uno de los macronutrientes que la caña de azúcar necesita para su desarrollo. Ejerce un efecto decisivo en la brotación, desarrollo radical, elongación de los tallos y ahijamiento de la caña de azúcar [2]. Además actúa en los procesos de fotosíntesis, respiración, división celular, almacenamiento y transferencia de energía y forma parte de los ácidos nucleicos, fosfolípidos y coenzimas respiratorias [2].

Para producir altos niveles de biomasa, la caña de azúcar extrae del suelo entre 0,4 y 0,6 kg de  $P_2O_5/t \cdot \text{año}$  y solo una fracción de los residuos de cosecha permanece en la superficie [2]. Si este nutriente no se repone adecuadamente, con el transcurso del tiempo se incurre en la disminución de fertilidad del agrosistema azucarero. En este sentido, el primer paso es la identificación de comportamientos espaciales, asociados a necesidades para su restitución en el suelo, donde métodos clásicos y geoestadísticos toman relevancia y permiten desarrollar prácticas de manejos por sitios específicos [3], que contribuyan a la sostenibilidad. El análisis espacial de los datos permite identificar tendencias, así como complejas relaciones para tomar mejores decisiones [4]. Para el caso de estudio, permitió predecir valores del elemento estudiado en sitios no muestreados, así como errores asociados. Por lo que el objetivo del trabajo se centró, en explorar aspectos básicos para el análisis espacial del fósforo asimilable del suelo, como premisa para un manejo sostenible del agrosistema azucarero.

## II. MÉTODOS

El estudio del fósforo asimilable del suelo enfrenta grandes retos con respecto al análisis de su distribución espacial. Requiere de estrategias de muestreo en las unidades mínimas de manejos y la aplicación de métodos estadísticos para procesar la información obtenida, que abarcan desde análisis exploratorios, hasta la interpolación para predecir un comportamiento regional, como se observa en la figura 1.



**Fig. 1.** Diagrama conceptual para el análisis espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero

### Obtención de los datos

#### Muestreo de suelo y georreferenciación

El estudio se realizó en el año 2015 y se localizó entre las coordenadas  $22^{\circ} 25' 42''$  N a  $22^{\circ} 29' 39''$  N y  $80^{\circ} 57' 22''$  O a  $80^{\circ} 52' 43''$  O sobre un suelo *Ferralsol*. Cada muestra de suelo se formó a partir de 30 sub-muestras tomadas a la profundidad de 0 a 20 cm, en forma diagonal para cada unidad mínima de manejo (UMM, referida al campo de caña de azúcar). El muestreo de suelo se realizó

## ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO

posterior a la cosecha de cada UMM y, para las áreas con una o más cosechas, las sub-muestras se tomaron de forma alterna en las hileras de cultivo y entre estas. El muestreo se ajustó para áreas menores o iguales a 5 ha. Cuando las dimensiones de las UMM sobrepasaban las 5 ha, se incrementó el número de muestras tomadas, en correspondencia con la proporcionalidad establecida (figura 2). En estos casos se delimitaron sub-áreas en las UMM, mediante estacas guías que no constituyen límites permanentes. El centro de cada UMM o sub-área establecida fue georreferenciado, para un total de 671 muestras de suelo colectadas en 4086, 23 ha del agrosistema azucarero.

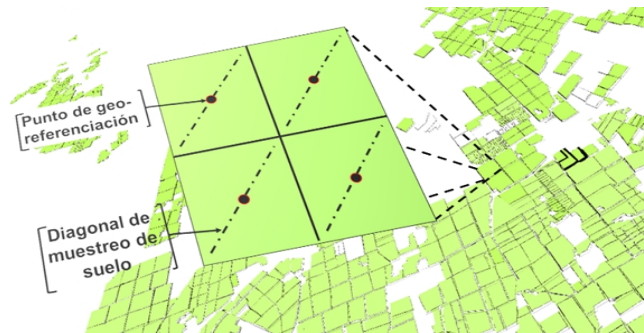


Fig. 2. Esquema general del muestreo de suelo

### Análisis químico para la determinación del fósforo asimilable del suelo

Los análisis químicos de las muestras de suelo se realizaron en el Laboratorio de Suelo, Agua y Tejido Vegetal de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) Antonio Mesa Hernández, ubicado en el municipio de Jovellanos, provincia Matanzas. El método empleado para la determinación del contenido de fósforo asimilable ( $\text{mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ) consiste en la extracción en ácido sulfúrico a 0.1 normal ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.1 N), utilizado en los agrosistemas con caña de azúcar [5]. La utilidad de los valores numéricos de propiedades del suelo radica en que estén relacionados con la cantidad de nutrientes necesarios para obtener rendimientos óptimos [6]. En este sentido, para el manejo de la fertilidad del agrosistema azucarero, se han definido dosis del nutriente fosfórico asociadas a categorías, que permiten distinguir los suelos de alta probabilidad de respuesta a la fertilización de los de poca probabilidad [7], a partir de su contenido de fósforo asimilable (tabla 1).

Tabla 1. Categorías de fósforo asimilable del suelo asociadas a diferentes dosis para caña de azúcar

Categorías*	P asimilable*
	$\text{mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$
<b>Muy alto</b>	$\geq 13.0$
<b>Alto</b>	$\geq 8.3 - < 13.0$
	$\geq 3.6 - < 8.3$
<b>Medio</b>	$\geq 3.0 - < 3.6$
	$\geq 2.4 - < 3.0$
	$\geq 1.8 - < 2.4$
	$\geq 1.2 - < 1.8$
<b>Bajo</b>	$< 1.2$
* Extracción con $\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.1 N	
** Tomado de Pérez <i>et al.</i> , (2015) [5]	

### Herramientas para el procesamiento de los datos

Todos los análisis estadísticos y geoestadísticos de los datos se realizaron con el *software* R, versión 3.6.1 [8] y se utilizaron varias librerías disponibles para el desarrollo de este trabajo.

### Análisis exploratorio

El análisis exploratorio de los datos constituye un paso imprescindible para la aplicación de la geoestadística en el análisis de propiedades del suelo. Permite un entendimiento básico de la variable estudiada.

### Identificación de valores extremos

La presencia de valores extremos en un grupo de datos dificulta la construcción de modelos válidos de *Kriging* [9]. En este estudio fueron excluidos los valores mayores de  $19 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100\text{g}^{-1}$ , que se alejan de la media y constituyen valores aislados, de manera que la interpolación del fósforo asimilable del suelo se realizó con 668 datos.

### Prueba de normalidad y transformación de los datos

En este trabajo, para valorar el ajuste de los datos de fósforo asimilable del suelo a una distribución normal, se realizó la prueba de *Lilliefors*, se analizaron los coeficientes de asimetría y kurtosis. Además se empleó un gráfico Q-Q y un histograma de frecuencias.

Para lograr simetría en la variable se realizó la transformación logarítmica de los datos de la ecuación 1, por ser la que mejor ajuste ofrece a una distribución normal.

$$P2O5 \text{ transf} = \log_{10}(P2O5 + X) \quad (1)$$

Donde:

X: escalar que se suma a cada valor (0,5 para este caso).

### 2.3. Análisis estructural.

#### 2.3.1. Correlación de los datos

El diagrama de dispersión de la variable permite analizar la correlación de los datos, que se visualiza de acuerdo con el nivel de agrupamiento (o dispersión) de la nube de puntos en la gráfica. Un mayor agrupamiento implica una mayor correlación, expresada en términos de semivarianza [9]. Este es un paso necesario de los análisis geoestadísticos [3; 10; 11].

#### 2.3.2. Estimación del semivariograma experimental

El semivariograma constituye la herramienta principal de la geoestadística [12] para la descripción de la variación espacial de un fenómeno. Permite cuantificar la escala y magnitud espacio-temporal de la variabilidad que se muestra en los mapas [13]. Se define por el método de Matheron [12] y se describe en la ecuación 2, donde al cambiar el valor h se obtiene un grupo de valores de semivarianza.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{Z(X_i) - Z(X_i + h)\}^2 \quad (2)$$

Donde:

$z(x_i)$  y  $z(x_i + h)$ : valores observados de z en los sitios  $x_i$  y  $x_i + h$

$m(h)$ : número de pares a una distancia h.

### Ajuste de modelos teóricos

El ajuste del semivariograma experimental a modelos teóricos permite extraer diferentes parámetros, que posteriormente son empleados en la interpolación espacial [14]. Estos parámetros constituyen el rango ( $A_0$ ), *nugget* ( $C_0$ ), *sill* ( $C_0+C$ ), *sill* parcial (C) y la proporción de la varianza explicada por el espacio (RSV) ( $C/C_0+C$ ) [14; 8]. Este último aspecto ( $C/C_0+C$ ) define el grado de correlación espacial.

Para la selección del modelo empleado en la interpolación del fósforo asimilable del suelo, se realizó la evaluación por validación cruzada. Los modelos valorados en este estudio (tabla 2) fueron el esférico, exponencial, gaussiano y lineal, que son los más utilizados [15].

## ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO

**Tabla 2.** Modelos teóricos evaluados para el ajuste del semivariograma

Modelo	Función de Semivariograma	No. de ecuación	Observaciones
<b>Esférico</b>	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left\{ \frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{r} \right)^3 \right\} \\ 0 \end{cases}$ <p style="text-align: center;">Para:  <math>0 &lt; h \leq r; h &gt; r; h = 0</math></p>	(3)	$\gamma(h)$ : semivarianza en el intervalo de distancia $h$ , $r$ : rango ( $A_0$ ). $C_0$ : <i>nugget</i> , $C$ : varianza a la que los componentes están espacialmente correlacionados
<b>Exponencial</b>	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right\} \\ 0 \end{cases}$ <p style="text-align: center;">Para: <math>0 &lt; h; h = 0</math></p>	(4)	Tiende a alcanzar el <i>sill</i> asintóticamente. El rango $a$ se define como la distancia a la cual el valor del variograma alcanza el 95% del <i>sill</i> .
<b>Gaussiano</b>	$\gamma(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right)$	(5)	
<b>Lineal</b>	$\gamma(h) = C_0 + bh$	(6)	$b$ : pendiente de la recta.

Confeccionado a partir de [12; 15]

Los modelos teóricos fueron ajustados bajo el criterio de minimizar la suma del cuadrado de los errores [16], como se describe en la ecuación 7.

$$\sum_{j=1}^p w_j (\gamma(h) - \gamma(h))^2 \tag{7}$$

Donde:

$\gamma(h)$ : valor de la variable según el modelo paramétrico

$w_j$ : peso para el ajuste de la tabla 3.

En la tabla 3 se observan los pesos utilizados para el ajuste de modelos teóricos al semivariograma.

**Tabla 3.** Pesos utilizados para el ajuste de modelos teóricos al semivariograma

Método de ajuste	Peso ( $W_j$ )	Observaciones
1	$N_j$	Estimación por mínimos cuadrados ponderados (WLS). $N_j$ : Número de pares a la distancia $h_j$ . $\gamma$ : Semivariograma
2	$N_j /  \gamma(h_j) ^2$	
7	$N_j / h_j^2$	
6	1	Estimación por mínimos cuadrados ordinarios (OLS).

### Anisotropía

Los modelos que se han presentado anteriormente son isotrópicos, es decir, consideran que la variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo no depende del ángulo en el espacio. El análisis de anisotropía permite comprobar que los parámetros obtenidos en el semivariograma no presenten cambios significativos en otras direcciones. En la práctica usualmente se estudian las cuatro direcciones ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ) [15] y se construye el mapa variográfico, para observar tendencia presente y decidir si existe necesidad de considerar la anisotropía en los modelos.

### Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero

El método de interpolación espacial empleado en este estudio fue *Kriging* Ordinario. Su selección se basó en el tipo de dato, objetivo perseguido con el análisis, complejidad de la técnica y sus usos en trabajos publicados en literaturas científicas [17]. En este método se desea predecir  $Z(x_0)$ , en el punto  $x_0$  donde no hubo medición (ecuación 8).

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{8}$$

Donde:

$\lambda_i$ : representan los pesos o ponderaciones de los valores originales.

**Validación del modelo**

Se realizó la validación cruzada a los modelos incluidos en este estudio, que permite evaluar la eficiencia de la predicción para propiedades del suelo y seleccionar el mejor modelo [3], según la evaluación de varios parámetros, que se observan la tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros utilizados para la evaluación de los modelos ajustados

Parámetros	Ecuación	No. de ecuación	Observaciones
Raíz de la media de los errores al cuadrado	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2}$	(9)	N: número de observaciones, $z(x_i)$ : Valor en $x_i$ $\hat{z}(x_i)$ : Valor predicho por el modelo.
Cuadrado medio del error de predicción	$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2$	(10)	
Cuadrado medio de las desviaciones	$MSDR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\{z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2}{\sigma^2(x_i)}$	(11)	
Coefficiente de correlación de Pearson (entre observaciones y la predicción)	$R = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{j1} - \bar{x}_1)(x_{j2} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{j1} - \bar{x}_1)^2 \sum_{j=1}^N (x_{j2} - \bar{x}_2)^2}}$	(12)	$x_1$ y $x_2$ : Valores de las variables correlacionadas $\bar{x}_k$ : Media de los valores de cada muestra [18]

En concordancia con [3; 19]

**III. RESULTADOS**

**Con el empleo de los métodos de investigación se obtuvieron resultados sobre:** Análisis exploratorio del fósforo asimilable del suelo, **Análisis estructural del fósforo asimilable del suelo**

**3.1 Análisis exploratorio del fósforo asimilable del suelo**

La caracterización estadística de la variable mostró un coeficiente de variación de 109,59 %, como se refleja en la tabla 5.

**Tabla 5.** Descripción estadística de la variable

Aspectos	No. de muestras	Media	Mediana	Desviación estándar	Coef de variación	Valor mín	Valor máx	1 <sup>er</sup> cuartil	3 <sup>er</sup> cuartil
<b>Fósforo asimilable del suelo</b>	671	2,15	1,60	2,35	109,59	0,08	22,35	0,86	2,64

**Normalidad de la variable**

## ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO

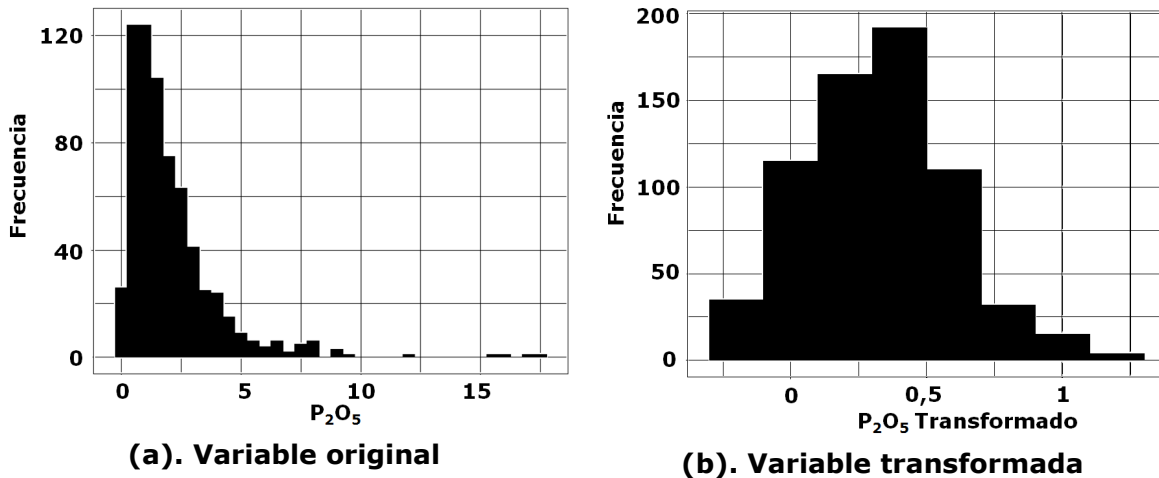
Al realizar la prueba de *Lilliefors*, se comprobó que los datos originales no se ajustaron a una distribución normal; mientras que la transformación logarítmica de los mismos si se ajustó. Los resultados se observan en la tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados de parámetros y prueba de normalidad de *Lilliefors*

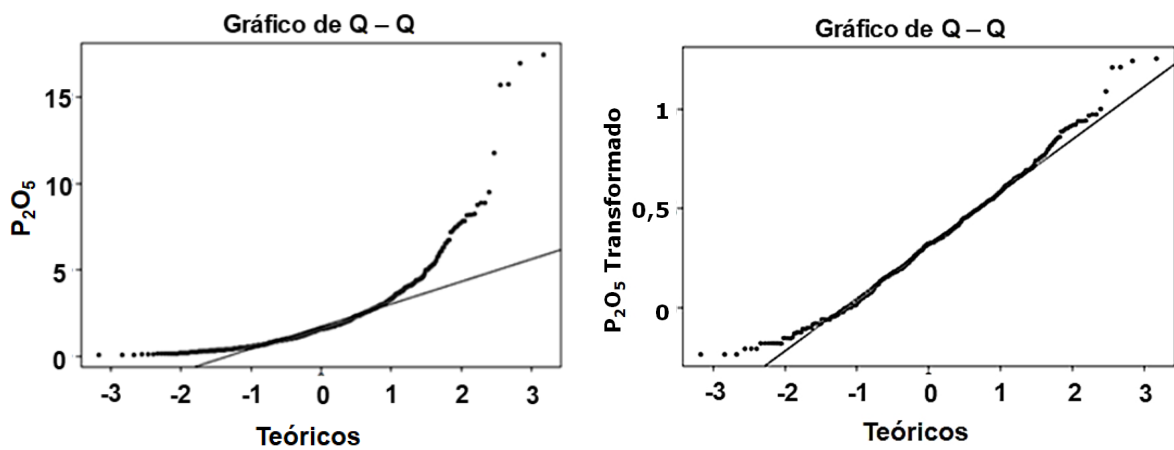
Fósforo asimilable del suelo	Coeficientes		Test	Sig*.
	Asimetría	Kurtosis	<i>Lilliefors</i>	
Variable original (mg.100g <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	2,8	10,6	0,16	2,2 e <sup>-16</sup>
Valores transformados [log <sub>10</sub> (p <sub>2</sub> O <sub>5</sub> + 0,5)] <sup>a</sup>	0,4	0,006	0,03	0,08

\*p-valor < 0,05

Los métodos gráficos para el análisis de la normalidad del fósforo asimilable del suelo ratificaron los resultados obtenidos en la prueba de *Lilliefors*. El histograma de frecuencias muestra un comportamiento asimétrico para la variable original (figura 3 a), que corresponde con su falta de ajuste a una distribución normal. Posterior a la transformación logarítmica realizada, este mejoró su asimetría (figura 3 b), al igual que los gráficos cuantil-cuantil (figura 4).



**Fig. 3.** Histogramas de frecuencia de los datos de fósforo asimilable del suelo



**Fig. 4.** Gráficos cuantil - cuantil de los datos de fósforo asimilable del suelo

### 3.2 Análisis estructural del fósforo asimilable del suelo

El análisis entre pares de valores de fósforo asimilable del suelo a diferentes distancias, permite determinar la de máxima correlación y provee los elementos para el ajuste del semivariograma, que posteriormente se utilizan en la predicción espacial de este elemento [20]. En esta investigación, se encontró que los mayores valores de correlación corresponden al intervalo de 60 a 80 metros de distancia, esto se refleja en la figura 5.

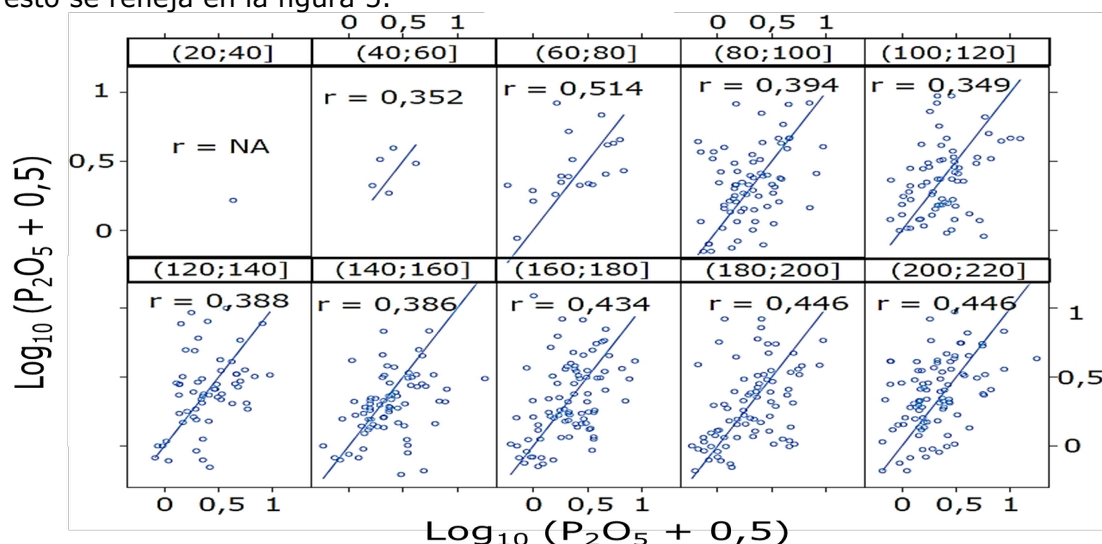


Fig. 5. Correlación entre pares de datos de fósforo asimilable del suelo

### Obtención de semivariogramas experimentales y ajuste de modelos

La evaluación de modelos por diferentes métodos realizada en esta investigación arrojó que los coeficientes de correlación entre la variable observada y los valores predichos no son elevados, esto se observa en la tabla 7.

Tabla 7. Modelos de semivariograma evaluados para el fósforo asimilable del suelo

Modelo teórico <sup>1</sup>	Método	SCE	RMSE	MSE	R	MSDR
Exponencial	WLS 7	3,72e <sup>-07</sup>	0,241	0,058	0,52*	1,21
Exponencial	OLS	1,88e <sup>-04</sup>	0,237	0,056	0,53*	1,18
Exponencial **	WLS 1	1,28e <sup>-01</sup>	0,235	0,055	0,54*	1,14
Exponencial	WLS 2	3,10e <sup>+01</sup>	0,236	0,056	0,53*	1,16
Esférico	WLS 7	3,96e <sup>-07</sup>	0,249	0,062	0,46*	1,31
Esférico	OLS	2,02e <sup>-04</sup>	0,245	0,060	0,48*	1,26
Esférico	WLS 1	1,30e <sup>-01</sup>	0,237	0,056	0,53*	1,16
Esférico	WLS 2	2,69e <sup>+01</sup>	0,237	0,056	0,53*	1,17
Gaussiano	WLS 7	4,10e <sup>-07</sup>	0,249	0,062	0,47*	1,30
Gaussiano	OLS	2,00e <sup>-04</sup>	0,245	0,060	0,48*	1,25
Gaussiano	WLS 1	1,31e <sup>-01</sup>	0,239	0,057	0,53*	1,19
Gaussiano	WLS 2	3,16e <sup>+01</sup>	0,242	0,059	0,51*	1,22
Lineal	OLS	1,97e <sup>-04</sup>	0,250	0,062	0,43*	1,31
Lineal	WLS 1	1,36e <sup>-01</sup>	0,249	0,062	0,43*	1,30
Lineal	WLS 2	2,87e <sup>+01</sup>	0,249	0,062	0,45*	1,29

\*\* Modelo seleccionado

\* Correlación significativa: valor de la probabilidad < 0,05

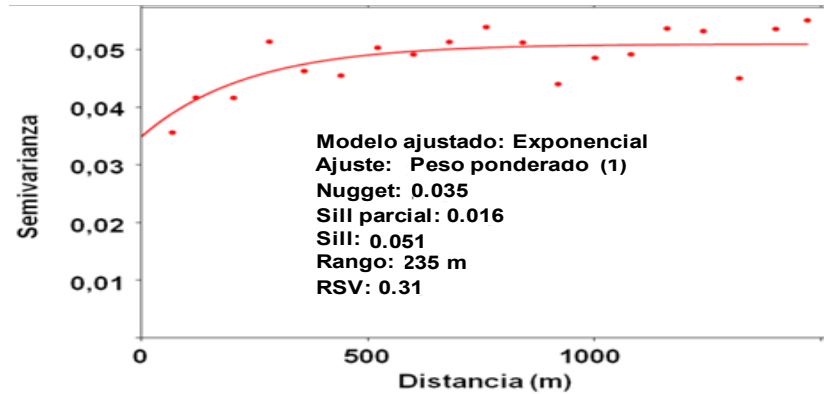
<sup>1</sup> para el caso del modelo lineal el ajuste por pesos ponderado (WLS 7) no se encontró convergencia y no aparece en la tabla.



## ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO

El modelo seleccionado en el ajuste al semivariograma experimental de la variable estudiada fue el exponencial, que presentó los menores errores determinados y el mayor coeficiente de correlación tras la validación cruzada.

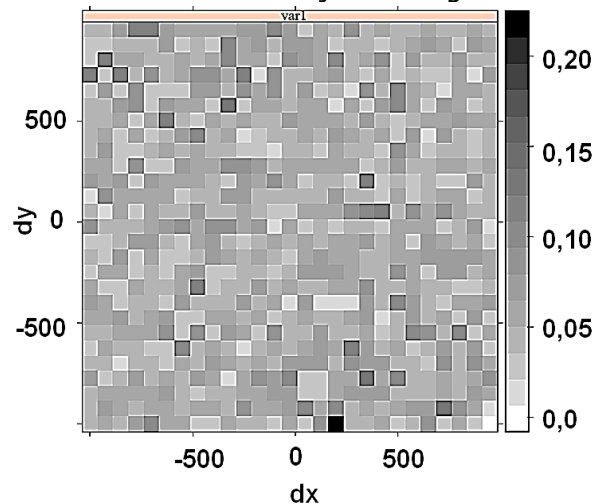
Este modelo arrojó un rango de 235 metros para el contenido de fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, con una Correlación Espacial (RSV) moderada de 0,31, esto se refleja en la figura 6.



**Fig. 6.** Semivariograma ajustado para el fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero evaluado

### Anisotropía

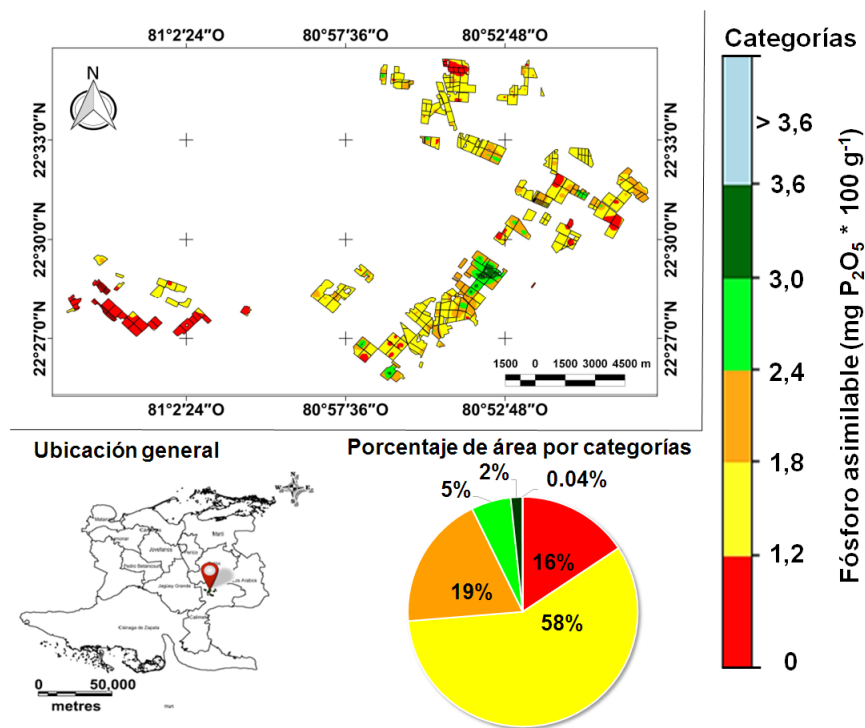
El análisis de anisotropía para los datos de fósforo asimilable del suelo, no muestra tendencias hacia ninguna dirección, lo que permite utilizar los modelos isotrópicos para la predicción espacial de este elemento en el agrosistema azucarero. Esto se refleja en la figura 7



**Fig. 7.** Mapa variográfico del fósforo asimilable del suelo en el área evaluada

### 3.3. Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero

El análisis espacial del fósforo asimilable del suelo permitió la definición de sitios específicos para cada categoría de este nutriente, asociada a necesidades específicas para el mantenimiento de la fertilidad de este agrosistema, que se observa en la figura 8.

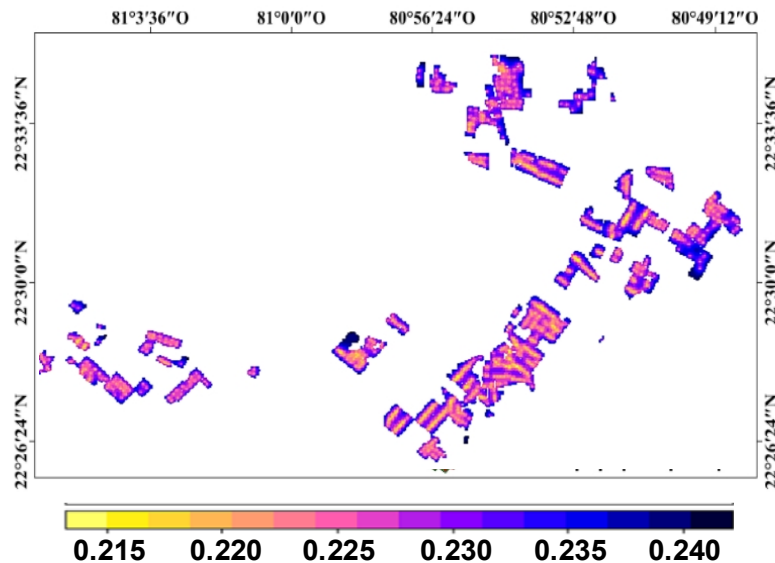


**Fig. 8.** Mapa del agrosistema con la predicción espacial de fósforo asimilable

De manera general, el 16 % del área se encuentra en categoría de bajo, 83.96 % en medio y 0.04 % en alto; para este elemento, según las categorías empleadas en el Servicio de Recomendación de Fertilizantes y Enmiendas [21].

### 3.3.1. Validación del modelo utilizado para la predicción del fósforo asimilable del suelo

El análisis del error asociado a la predicción espacial del fósforo asimilable del suelo, genera un nivel de certidumbre en todo el agrosistema azucarero estudiado. En la figura 9 se observa un incremento de la desviación estándar de la interpolación a medida que se aleja de las zonas de colecta de muestras de suelo.



**Fig. 9.** Desviación estándar de las predicciones para fósforo asimilable del suelo

# ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO

## IV. DISCUSIÓN

Se presentan aspectos sobre: validación de la interpolación, predicción espacial del fósforo asimilable del suelo, análisis estructural del fósforo asimilable del suelo y análisis exploratorio del fósforo asimilable del suelo.

### **Análisis exploratorio del fósforo asimilable del suelo**

La caracterización estadística de la variable muestra amplia dispersión con respecto a la media que se refleja en la tabla 5, lo que se asemeja a resultados obtenidos por [22]. Esta variabilidad se justifica con el hecho de que los datos de fósforo asimilable del suelo corresponden a diferentes unidades mínimas de manejos muestreadas en el agrosistema azucarero; cada una de ellas sometida al monocultivo de la caña de azúcar y a manejos de fertilización acorde a sus propiedades químicas. El manejo agrícola puede generar cantidades desiguales de nutrientes, incluso dentro de campos de un mismo cultivo [23] y, aunque los suelos presenten el mismo origen, difieren en sus propiedades físicas y químicas [11].

El comportamiento de los datos de fósforo asimilable del suelo, que inicialmente no se ajustaron a una distribución normal y posterior a su transformación logarítmica sí, se corresponde con los resultados obtenidos por varios autores para diferentes propiedades del suelo [24; 25]. Este aspecto tiene importantes implicaciones en el desarrollo de métodos de interpolación espacial [24].

### **Análisis estructural del fósforo asimilable del suelo**

La magnitud de los coeficientes de correlación obtenidos para los diferentes modelos estudiados (tabla 7) coincide con Guan *et al.*, (2017) [19], y se corresponde con los muestreos de suelo no probabilísticos [26]. La selección del modelo exponencial para el ajuste del semivariograma experimental concuerda con varios autores [24; 3].

En principio, el cálculo automático del semivariograma arrojó un valor de rango mayor a 2000 metros. Este resultado oculta variabilidades espaciales del nutriente evaluado a menor escala. Además obvia el hecho de que las propiedades del suelo de dos unidades mínimas de manejos contiguas pueden ser distintas, debido a que reciben diferentes manejos agrícolas. A partir de estos análisis, se construyó el semivariograma basado en las correlaciones de la figura 5, lo que permitió identificar la variabilidad espacial del nutriente evaluado incluso, dentro de los campos de caña de azúcar.

El rango obtenido para los datos de fósforo asimilable del suelo según el modelo exponencial es similar al que obtuvieron otros autores [22; 24]; con valores de 201,1 y 264 metros, respectivamente (este último con el modelo esférico). Sin embargo, estos resultados difieren al valor encontrado por Vasu *et al.*, (2017) [25], que fue 1160 metros para este elemento.

La heterogeneidad de los resultados se debe a la presencia de muchos factores que pueden incidir en diferentes patrones espaciales y por lo tanto, en las distancias a la cual los pares de muestras están correlacionadas [15; 22; 24]. Estos factores constituyen la naturaleza de los datos; es decir, la forma en que son colectados, el área evaluada en las investigaciones (escala del estudio), el uso del suelo (ecosistema natural o agrícola), tipos de suelo y cultivo presente, así como las condiciones climáticas del área.

Los manejos realizados en el monocultivo de la caña de azúcar; incurren en la variabilidad del contenido de nutrientes en el suelo. Labores agrícolas como la fertilización, se realizan en surcos dentro de los límites de las unidades mínimas de manejos. Este fenómeno constituye un factor externo, que se añade a las dinámicas naturales del elemento en el área y conllevan a que los datos muestren poca relación para la misma variable, más allá de los límites de los campos de caña de azúcar.

### **Predicción espacial del fósforo asimilable del suelo**

Aproximadamente 84 % del área evaluada presenta categoría medio para el fósforo asimilable del suelo. Sin embargo, este grupo está compuesto por subgrupos que requieren diferentes dosis del nutriente fosfórico, para su reposición en el agrosistema azucarero. Por lo tanto, la variabilidad de dosis requeridas en el área, es mayor y debe tenerse en cuenta para un manejo sostenible del suelo. La existencia de variabilidades dentro de los campos de caña de azúcar se corresponde con los resultados obtenidos en el semivariograma, donde el *nugget* se encuentra por encima del origen de coordenada (figura 6), que se interpreta como la posible existencia de variabilidades por debajo de la escala muestreada [15]. La variabilidad espacial encontrada no coincide con las estructuras impuestas por el hombre para el manejo de recursos en el agrosistema azucarero (figura 8), donde

se aplica dosis única del fertilizante en toda la unidad mínima de manejo [21]. Este procedimiento procura reponer los nutrientes extraídos del suelo y optimizar recursos en el agrosistema. Sin embargo, el análisis de la variabilidad espacial del fósforo asimilable demuestra que, para el manejo sostenible del suelo, se necesita además de dosis variables que se adapten a las necesidades por sitios específicos. Pues la aplicación de igual cuantía provoca un impacto en el agrosistema, con aplicaciones en exceso o déficit del fertilizante, que es superior a medida que aumenta el área de las unidades mínimas de manejos.

Según Rosemary *et al.*, (2017), se requiere este nivel de detalle en las informaciones para un adecuado manejo de nutrientes [27], cuyo estado en el suelo determina su provisión a las plantas [28].

### **Validación de la interpolación**

A pesar de la valiosa información que generan las interpolaciones para el aumentar el entendimiento del estado de los indicadores asociados a la fertilidad del suelo, la principal limitante radica en el alto número de muestras requeridas para desarrollar el análisis geoestadístico [29]. La validación de modelos se utiliza para identificar errores excesivos entre valores observados y predicciones realizadas en la interpolación espacial [15], a partir de diferentes parámetros.

La aplicación de estas técnicas y su inclusión en la toma de decisiones con manejos sostenibles en los agrosistemas, determina el grado de preservación del suelo. Su eficiencia depende del rigor científico con que se trabaje, las dimensiones del área evaluada, el error permisible aceptado, la disponibilidad de capital; así como de las regulaciones y conciencia humana.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se considera necesario diagnosticar los niveles del fósforo asimilable del suelo dentro de las unidades mínimas de manejo, e incluir un análisis de sus dimensiones para el muestreo, según la metodología seguida en este trabajo.

El análisis espacial permite lograr manejos adaptados a las características variables del agrosistema. Se puede contribuir a superar los límites de diversos estudios existentes sobre los servicios ecosistémicos del suelo, que según Su *et al.*, (2018) se enfocan solo en los propios servicios y obvian las complejas interrelaciones y procesos subyacentes [30]. Por tanto, para contribuir a la sostenibilidad del agrosistema azucarero se necesitan incluir las variabilidades espaciales de propiedades del suelo en la toma de decisiones e implementar manejos por sitios específicos, acorde a sus necesidades.

## **V. CONCLUSIONES**

1. El modelo que se ajustó al semivariograma experimental para los datos de fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, fue el exponencial, que presentó los menores errores determinados y el mayor coeficiente de correlación, con un rango de 235 metros.
2. El análisis espacial del fósforo asimilable del suelo, permitió la definición de sitios específicos para cada categoría de este elemento, asociadas a necesidades del fertilizante para su restitución en el agrosistema azucarero.
3. La variabilidad espacial del fósforo asimilable del suelo no coincide con las estructuras para el manejo de recursos en el agrosistema azucarero.
4. La aplicación de dosis única del fertilizante fosfórico en todo el campo de caña de azúcar, tiene un impacto en el agrosistema, con una aplicación en exceso y/o déficit.
5. Para el manejo sostenible del fósforo asimilable del suelo en el agrosistema azucarero, se requiere la aplicación de dosis variable de este nutriente, acorde a sitios específicos identificados. 🏠

## **VI. REFERENCIAS**

1. Kibet Leonard C., Blanco-Canqui Humberto, Jasa Paul. Long-term tillage impacts on soil organic matter components and related properties on a Typic Argiudoll. *Soil & Tillage Research*, 2016; (55): 78–84. ISSN 0167-1987. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.05.006>
2. Cuéllar, A.I; de León Ortiz, M; Gómez Ruiz, A; Piñón Gómez, D; Villegas Delgado, R; Santana Aguilar, I. Caña de azúcar: Paradigma de Sostenibilidad. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 2003. La Habana, Cuba: Editorial PUBLINICA. ISBN 959-7023-24-6.
3. Bhunia, G., Kumar, P., Chattopadhyay, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals of Agrarian Science*. 2018; (16): 436–443. ISSN 1512-1887. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>

## **ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO COMO BASE PARA CONTRIBUIR AL MANEJO SOSTENIBLE DEL AGROSISTEMA AZUCARERO**

4. Reddy, G. P. O. Spatial Data Management, Analysis, and Modeling in GIS: Principles and Applications. En: Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management, Geotechnologies and the Environment, 21. Reddy, G. P. O.; Singh S. K., (eds.). Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. Chapter 7. 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_7)
5. Pérez, H.; Santana, I.; Rodríguez, I. Manejo Sostenible de Tierras en la Producción de Caña de Azúcar. Ediciones UTMACH. Universidad Técnica de Machala. Km. 5 1/2 Vía Machala Pasaje. Ecuador, 2015. [Citado: 16 Enero 2020]. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/6649/1/16%20MANEJO%20SOSTENIBLE%20DE%20LA%20TIERRA%20EN%20LA%20PRODUCCION%20DE%20CA%20C3%91A%20DE%20AZUCAR%20VOL%20II.pdf>
6. Cottenie, A. Los análisis de suelos y de plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. Boletín de suelos de la FAO. 38/2. Roma. 1984, 116 p. ISBN:92-5-300956-X
7. Sánchez, P. Suelos del trópico: Características y manejo. Traducción Edilberto Camacho. IICA. San José, Costa Rica, 1981. ISBN: 92-9039-017-4
8. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
9. Kumar, N.; Sinha, N.K. Geostatistics: Principles and Applications in Spatial Mapping of Soil Properties. En: Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management, Geotechnologies and the Environment, 21. Reddy, G. P. O.; Singh S. K., (eds.). Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. Chapter 8. 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_8)
10. Wang, Z.; Shi, W. Robust variogram estimation combined with isometric log-ratio transformation for improved accuracy of soil particle-size fraction mapping. Geoderma. 2018; (324): 56–66. ISSN 0016-7061. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.007>
11. Piotrowska-Długosza, A., Breza-Borutab, B., y Długosza, J. Spatial and temporal variability of the soil microbiological properties in two soils with a different pedogenesis cropped to winter rape (Brassica napus L.). Geoderma.2019; (340):313–324. ISSN 0016-7061. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.020>
12. Oliver, Margaret A. and Webster, Richard. Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. Springer Briefs in Agriculture. Springer Cham Heidelberg New York. 2015. doi: [http://10.1007/978-3-319-15865-5\\_1](http://10.1007/978-3-319-15865-5_1)
13. Goovaerts, P. Flint Drinking Water Crisis: A First Attempt to Model Geostatistically the Space-Time Distribution of Water Lead Levels. En: Handbook of Mathematical Geosciences. B. S. Daya Sagar et al. (eds.). Springer International Publishing AG part of Springer Nature. Gewerbstrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. Chapter 14. 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_14)
14. Cai, L.; Wang, Q.; Wen, H.; Luo, J.; Wang, S. Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: Occurrences and spatial distribution. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019; (168):184–191. ISSN 0147-6513 doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.092>
15. Gallardo, A. Geoadística. Ecosistemas. 2006; 15(3): 48-58. [Citado:22 Septiembre 2015] ISSN 1697-2473. Disponible en: <http://www.google.com/cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&sqi=2&ved=0CDAQFjAGAhUKEwj89I7y1rIAhUJWx4KHTwEAMA&url=http%3A%2F%2Fwww.revistaecosistemas.net%2Findex.php%2Fecosistemas%2Farticle%2Fdownload%2F161%2F158&usq=AFQjCNEKYP8f - THdP7nqMzjtY7Ou6W07w&bvm=bv.103073922,d.dmo>
16. Bivand, R.S.; Pebesma, E.J.; Gómez-Rubio, V. Applied Spatial Data Analysis with R. Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, USA: Gentleman, R; Hornik, K; Parmigiani, G. 2008. doi: <http://10.1007/978-0-387-78171-6>
17. Castro, M., García, D. y Jiménez, A. Comparación de técnicas de interpolación espacial de propiedades del suelo en el piedemonte llanero colombiano. Revista Tecnura. 2017; 21(53), 2017:78-95. ISSN 2248-7638. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.11658>
18. Egozcue, J.J. y Pawlowsky-Glahn, V. Modelling Compositional Data. The Sample Space Approach. En: Handbook of Mathematical Geosciences. Daya B. S. et al. (eds.). Springer

- International Publishing AG part of Springer Nature. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland. Capítulo 4. 2018. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_4)
19. Guan, F., Xia, M., Tang, X., y Fan, S. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China. *Catena*. 2017; (150):161–172. ISSN 0341-8162. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.017>
20. Tola, E.; Al-Gaadi, K.A.; Madugundu, R.; Zeyada, A.M.; Kayad, A.G.; Biradar, C.M. Characterization of spatial variability of soil physicochemical properties and its impact on Rhodes grass productivity. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2017; (24):421–429. ISSN 1319-562X. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.04.013>
21. SERFE, (2014). Manual Servicio de Fertilización de la Caña de Azúcar. Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar. La Habana, Cuba. ISBN 978 959 300 029 1
22. Fu, W., Tunney, H., y Zhang, C. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil & Tillage Research*. 2010; (106):185–193. ISSN 0167-1987. doi: <http://doi:10.1016/j.still.2009.12.001>
23. Logsdon, S.D. y Cole, K.J. Soil nutrient variability and groundwater nitrate-N in agricultural fields. *Science of the Total Environment*. 2018; (627):39–45. ISSN 0048-9697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.182>
24. Bogunovic, I., Mesic, M., Zgorelec, Z., Jurisic, A., y Bilandzija, D. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. *Soil & Tillage Research*. 2014; (144):174–183. ISSN 0167-1987. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.07.020>
25. Vasu, D.; Singh, S.K.; Sahu, N.; Tiwary, P.; Chandran, P.; Duraisami, V.P.; Ramamurthy, V.; Lalithac, M.; Kalaiselvi, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. *Soil & Tillage Research*. 2017; (169): 25–34. ISSN 0167-1987. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.01.006>
26. Veronesi, F., Corstanje, R., Mayr, T. Landscape scale estimation of soil carbon stock using 3D modelling. *Sci. Total Environ*. 2014; (487): 578–586. ISSN 0048-9697. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.017>
27. Rosemary, F., Vitharana, U.W.A, Indraratne, S.P., Weerasooriya, R., y Mishra, U. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena*. 2017; (150): 53–61. ISSN 0341-8162. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.017>
28. Dominati, Estelle J. Natural capital and ecosystem services of soils. En: *Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends*. Dymond JR (ed.). Manaaki Whenua Press, Lincoln, New Zealand. pp. 132-142. 2013. [Citado: 12 Noviembre 2015]. Disponible en: [https://www.landcareresearch.co.nz/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/77039/1\\_11\\_Dominati.pdf](https://www.landcareresearch.co.nz/_data/assets/pdf_file/0008/77039/1_11_Dominati.pdf)
29. Henríquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., y Sancho, F. La geostatística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging. *Agronomía Costarricense*. 2005; 29(2):73-81. [Citado: 28/julio/2015]. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v29n02\\_073.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n02_073.pdf)
30. Su, C., Liu, H., y Wang, S. A process-based framework for soil ecosystem services study and management. *Science of the Total Environment*. 2018; 627:282–289. ISSN 0048-9697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.244>

**Los autores declaran que no hay conflicto de intereses**

**Contribución de cada autor:**

**Yasmany García-López:** Elaboró la idea de investigación, participó en la recopilación de los datos, realizó el procesamiento estadístico y geoestadístico, analizó los resultados y confeccionó el artículo.

**Miriam Bárbara Orozco-Bravo:** Participó en la organización y procesamiento de los datos, en el análisis de los resultados y en la redacción del artículo.