

Mapa Textural de Zonas Productoras de Caña de Azúcar del Departamento de Santa Cruz, Bolivia Textural Map of Sugarcane Producing areas of Santa Cruz Department, Bolivia

Esteban Choque-Conde^{1†}, Hans Franklin Mercado-Ríos¹ y Porfirio Choque-Conde²

¹ Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal, Centro Nacional de la Caña de Azúcar. Calle Bolívar 472. 00591 Ciudad de Montero, Santa Cruz, Bolivia; (E.Ch.C.), (H.F.M.R.).

[†] Autor para correspondencia: pdte_esteban@ciab-np.org

² Director Ejecutivo ONG Vastos Desafíos "VD". Calle Ayacucho 128. 00591 Ciudad de Llagagua, Potosí, Bolivia; (P.C.C.).

RESUMEN

La región del norte Integrado del departamento de Santa Cruz, Bolivia, se constituye una zona agroindustrial importante para la producción y transformación de la caña de azúcar en derivados de alcohol, azúcar y etanol; donde, la superficie destinada a la producción de este cultivo se encuentra en plena expansión geográfica. Por consiguiente, el objetivo del presente estudio fue determinar la clase textural de los suelos con fines de producción intensiva y de futura expansión, siendo los municipios de mayor interés Portachuelo, Montero, Warnes, Saavedra, Mineros, Fernández Alonso, Colpa Bélgica y San Pedro. La clasificación de la textura del suelo se basó en los lineamientos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la confección del mapa de textura se realizó mediante el modelo geoestadístico de Kriging ordinaria. En el área de estudio se recolectaron 459 muestras de suelo, mismas que permitieron la clasificación en nueve clases texturales, de las 12 establecidas por USDA, de las cuales, 3% perteneció a los tipo de suelos ligeros (arena, franco arenoso), 77% a suelos medios (franco arenoso, franco, franco limoso y limo) y 20% a suelos pesados (franco arcilloso arcillo, franco arcilloso, franco arcilloso limoso, arcillo arenoso, arcillo limoso y arcilloso), identificado según el soporte bibliográfico, los suelos de textura media son los más aptos para el cultivo de la caña de azúcar. En consecuencia, en el área geográfica estudiada predominan los suelos con dichas condiciones texturales (franco arenoso = 115, franco arenoso = 86 y franco limoso = 153) ocupando un área geográfica mayor que los municipios en cuestión.

Palabras clave: arcilla, arena, limo, modelo geoestadístico.

SUMMARY

The Integrated north region of Santa Cruz department, Bolivia is an important agro-industrial zone for the production and transformation of sugar cane into derivatives of alcohol, sugar and ethanol. The area for sugar cane cultivation is in full geographical expansion, thus, the objective of our study was to determine the texture classes of the soils planned for intensive production and future expansion. For this purposes, the counties of greatest interest are Portachuelo, Montero, Warnes, Saavedra, Mineros, Fernández Alonso, Colpa Bélgica and San Pedro. We used the soil texture classification proposed by the United States Department of Agriculture (USDA). The texture map was computed using the ordinary Kriging geostatistical model. In the study area, 459 soil samples were collected, which were classified into nine out of 12 textural classes established by USDA. Three percent of the textural classes were coarse textured soils (sand, sandy loam), 77% were medium soils (sandy loam, loam, silt loam and silt) and 20% were clayed soils (clay loam clay, clay loam,



Cita recomendada:

Choque-Conde, E., Mercado-Ríos, H. F., & Choque-Conde, P. (2023). Mapa Textural de Zonas Productoras de Caña de Azúcar del Departamento de Santa Cruz, Bolivia. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-13. e1701. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1701>

Recibido: 11 de abril de 2023.

Aceptado: 20 de junio de 2023.

Artículo. Volumen 41.

Diciembre de 2023.

Editor de Sección:

Dr. Roberto Gregorio Chiquito Contreras

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2023 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

silty clay loam, sandy clay, silt clay and clay). According to literature, medium-textured soils are the most suitable for the cultivation of sugarcane, which was the predominant soil texture in our study area (sandy loam = 115, sandy loam = 86 and silt loam = 153).

Index words: clay, sand, silt, geostatistical model.

INTRODUCCIÓN

El suelo está compuesto por una serie de partículas que varían en tamaño y proporción, dando lugar a texturas entre arenosas y arcillosas que atraviesan los suelos arcillosos. Las partículas del suelo (arena, limo y arcilla) se agrupan para formar agregados, dentro de los cuales, hay espacios vacíos que almacenan agua y gases. Así, el suelo puede considerarse como un reservorio del que las plantas toman el agua necesaria para los procesos de transpiración y para el transporte de nutrientes del suelo a los tejidos (Cassalett-Davila, Torres y Isaacs, 1995).

La textura es una de las propiedades físicas más importantes del suelo, debido a que impulsa diversos procesos físicos, químicos, biológicos e hidrológicos (Poggio y Gimona, 2017). En la actividad agrícola, la clasificación de la textura del suelo se utiliza para determinar la idoneidad de los cultivos y para aproximar la respuesta del suelo a las condiciones ambientales (sequía) y de manejo agronómico, (programación y manejo del riego, dinámica de los fertilizantes en el suelo) así como los requerimientos de calcio (García-Gaines y Frankenstein, 2015).

El cultivo de la caña de azúcar se adapta mejor en suelos francos o franco arcillosos (Vitti, de Cerqueira Luz y Altran, 2015), profundo, fértil, bien aireado y con buena estructura (granular en bloques) y alta capacidad de retención de agua. Barbosa *et al.* (2018) en su estudio de textura del suelo en raíces de caña de azúcar en Brasil, determinó que la mayor biomasa de raíces obtenida para el suelo arcilloso estuvo relacionada con rendimientos de caña de azúcar que fueron más del doble de los medidos en el suelo arenoso. Las condiciones ideales del suelo para el cultivo de la caña de azúcar son: suelo franco, profundo, bien drenado, con una densidad aparente de 1.1 g cm^{-3} a 1.2 g cm^{-3} (1.3 a 1.4 g cm^{-3} en suelos arenosos), con un adecuado equilibrio entre poros de diferentes tamaños, con porosidad total aproximadamente de 50%; un nivel freático por debajo de 1.5 m a 2.0 m de la superficie y una capacidad de retención de humedad aprovechable del 15% o más (15 cm por metro de profundidad del suelo).

Esta investigación busca identificar las condiciones ideales de textura de los suelos, para establecer y estratificar ambientes aptos para la producción de caña de azúcar en los diferentes municipios del departamento de Santa Cruz, Bolivia. El proceso consiste en el muestreo de suelos en toda el área geográfica de producción de caña de azúcar y los de futura expansión, su posterior análisis de textura bajo las directrices del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1938), basado en la distribución granulométrica (García-Gaines y Frankenstein, 2015), posterior confección del mapa textural, basado en el modelo geoestadístico de interpolación y Kriging ordinaria (Krige, 1951).

Esta información servirá de apoyo para la Agroindustria de la caña de azúcar (productores e ingenios azucareros del departamento de Santa Cruz), En Bolivia la producción de caña de azúcar durante la zafra 2020 alcanzó 10 065 millones de toneladas, en un área total de 180 065 mil ha y ocupa el lugar 20 como mayor productor del mundo, donde las propiedades pequeñas (<10 ha) representan 14% del área, las propiedades medianas (10 ha - 100 ha) representan 39% y las grandes (>100 ha) representan 47% del total de la tierra cultivada. Existen ocho ingenios en el país, con una capacidad instalada de molienda de 86 mil toneladas de caña de azúcar por día y una capacidad de destilación para 2019 de 250 millones de litros por año según informes del Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (2021). Estas cifras están aumentando progresivamente, exigiendo un aumento en los volúmenes de producción de materia prima (caña de azúcar), donde, la identificación de suelos potenciales para el cultivo de caña de azúcar representa una gran alternativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El estudio se realizó en la región del norte integrado del departamento de Santa Cruz, zona agroindustrial potencial para la producción e industrialización de la caña de azúcar, específicamente, las áreas geográficas de los municipios de Portachuelo, Saavedra, Montero, Warnes, Mineros, Fernández Alonso, Colpa Bélgica y parte de San Pedro (Cuadro 1 y Figura 1), ubicados entre las coordenadas geográficas de $16^{\circ} 43' 27''$ a $17^{\circ} 40' 57''$ S y $62^{\circ} 55' 46''$ a $63^{\circ} 36' 42''$ O.

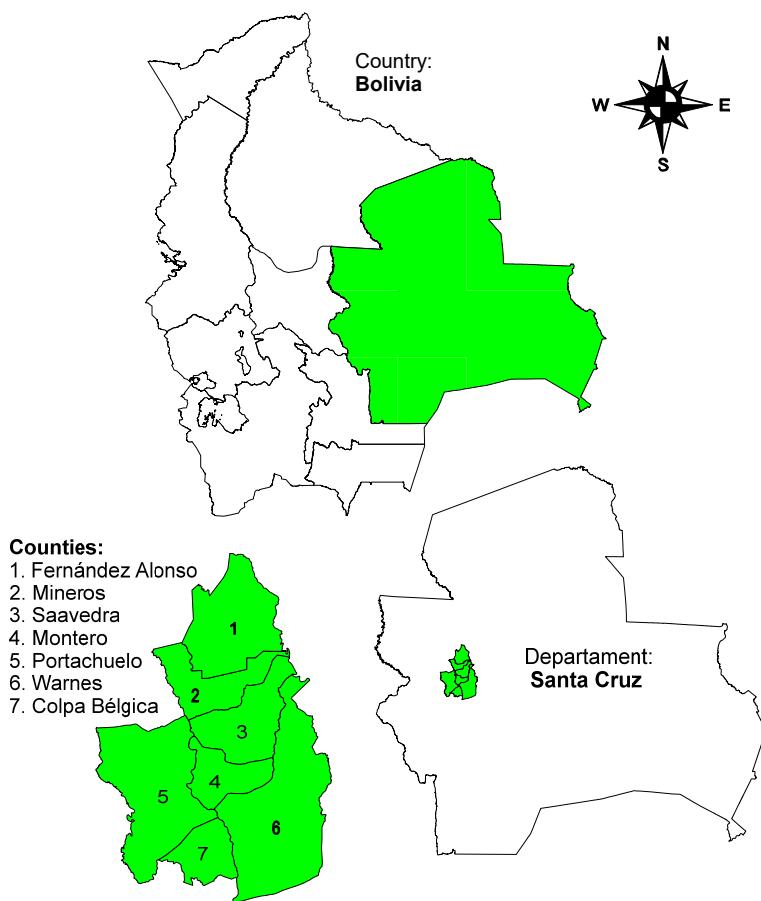


Figura 1. Municipios productores de caña de azúcar del departamento de Santa Cruz.
Figure 1. Sugarcane-producing counties in Santa Cruz department.

La temperatura media del aire en la región oscila en 24 °C y la precipitación anual de 800 mm, lo que posiciona a la zona con una clase climática de tipo Aw - zona tropical con invierno seco, según la clasificación climática de Köppen (1936), propuesto por Montes de Oca (2005).

Cuadro 1. Municipios productores de caña de azúcar del departamento de Santa Cruz.
Table 1. Sugarcane-producing counties in Santa Cruz department.

Provincia	Municipio	Superficie
		km ²
Obispo Santisteban	Montero	315.02
Obispo Santisteban	Saavedra	529.36
Obispo Santisteban	Fernández Alonso	760.14
Obispo Santisteban	Mineros	420.08
Obispo Santisteban	San Pedro	†3 081.19
Sara	Portachuelo	4 113.74
Sara	Colpa Bélgica	291.53
Warnes	Warnes	1 315.31

† Incluye apenas parte del área geográfica del municipio de San Pedro, aquella próxima a los municipios de Fernández, Alonso, Mineros y Portachuelo.
 † A portion of the geographical area of the municipality of San Pedro is included (the area near the municipalities of Fernández Alonso, Mineros and Portachuelo).

Muestreo de Suelos y Análisis Granulométrico

La técnica de muestreo fue aleatoria simple, ya que en los estudios geoestadísticos las observaciones se localizan dentro la región de estudio, por lo tanto, el componente aleatorio son las coordenadas geográficas a elegir casualmente (Yamamoto y Landim, 2013).

El muestreo de suelo se realizó de acuerdo con procedimientos metodológicos de Guaygua y Espinoza (2008), quienes recomiendan tomar las muestras aleatorias a profundidades de 20 a 30 cm del estrato arable, ya que a esas profundidades hay mayor actividad de las raíces. Para la representatividad de cada muestra de suelo se tomaron varias submuestras de igual tamaño para formar una muestra compuesta (10 submuestras a 15 submuestras) recolectadas a través de un recorrido en zigzag. El registro de la posición geográfica (x, y) fue apoyado por un Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El análisis granulométrico o textural de las muestras de suelo se realizó en el laboratorio de suelos de la Fundación CETABOL (Centro de Tecnología Agropecuaria en Bolivia). Los resultados describen las proporciones cuantitativas de cada fracción granulométrica que presenta un suelo (arcilla, limo y arena) según establece Fernández-Illescas, Porporato, Laio y Rodríguez (2001) y con base en el triángulo textural del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1938).

El procedimiento para llegar a un sistema unificado de clasificación de texturas se puede resumir refiriéndose a Figura 2, que es el triángulo de textura utilizado por el USDA (1938). Esta figura contiene: (i) 12 regiones de clases de textura definidas por polígonos con límites en negrita e identificadas por números en negrita en los centros y letras minúsculas en las esquinas que se denominan vértices; (ii) tres coordenadas que representan el porcentaje de arcilla (f_y), el porcentaje de limo (f_l) y el porcentaje de arena (f_d); (iii) una resolución de trabajo de cuadrícula igual a un intervalo de 10% para todas las coordenadas que producen 66 nudos, intersecciones de líneas de coordenadas, que están numeradas del 1 al 66. Las tres líneas de coordenadas son sólidas para arcilla, guiones y puntos para limo y guiones para la arena (Shirazi y Boersma, 1984).

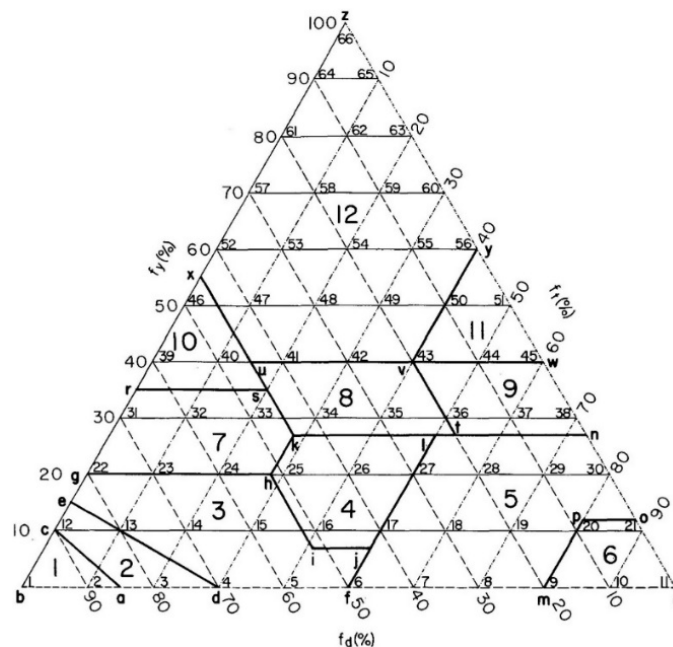


Figura 2. Triángulo textural del suelo (USDA, 1938): (1) arena; (2) arenoso franco; (3) franco arenoso; (4) franco; (5) franco limoso; (6) limoso; (7) franco arcilloso arenoso; (8) franco arcilloso; (9) franco arcilloso limoso; (10) arcillo arenoso; (11) arcilla limosa; y (12) arcilloso.

Figure 2. USDA (1938) soil texture triangle: (1) sand; (2) sandy loam; (3) sandy loam; (4) loam; (5) silty loam; (6) silty; (7) sandy clay loam; (8) clay loam; (9) silty clay loam; (10) sandy clay; (11) silty clay; and (12) clayey.

Es importante señalar que el método del triángulo textural del USDA (1938) no tiene en cuenta los fragmentos de roca ni los suelos orgánicos, ya que este sistema está diseñado para satisfacer necesidades específicas. En agricultura, este sirve para determinar la idoneidad de los cultivos y aproximar la respuesta del suelo a las condiciones ambientales y de manejo. En la ingeniería de recursos hídricos, se puede utilizar para determinar la velocidad de infiltración. Debido a su relativa simplicidad en comparación con otros sistemas de clasificación, sistema unificado de clasificación de Suelos (USCS), clasificación de suelos de la Asociación Estadounidense de Carreteras Estatales y Oficiales de Transporte (AASHTO), etc. El método del USDA (1938) es ampliamente utilizado en todo el mundo (García-Gaines y Frankenstein, 2015).

Confección del Mapa Textural

La confección espacial del mapa textural en dos dimensiones, se diseñó con base en la aplicación del modelo geoestadístico, el cual consiste en el análisis de los parámetros del modelo de variograma y validación cruzada. Posteriormente, los mapas fueron elaborados utilizando la técnica de Kriging ordinaria, con recurso del sistema GS + Geoestadística para ciencias ambientales.

El variograma analiza el grado de dependencia espacial de las localidades (puntos de muestreo) y define los parámetros necesarios para estimar valores para lugares sin datos disponibles, utilizando interpolación por Kriging, que permite la representación cuantitativa de la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio.

Suponiendo que $Z(x)$ representa el valor de la variable para el local x , donde x es el vector (x, y) y $Z(x + h)$ representa el valor de la misma variable para una distancia h en cualquier dirección, es decir, tanto $Z(x)$ y $Z(x + h)$ representan valores reales de Z en lugares separados por h (Webster y Oliver, 2007). Para un conjunto de datos $Z(x_i)$, $i = 1, 2, \dots$, se puede calcular mediante la relación:

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

Dónde: $\gamma(h)$ es el valor de varianza estimado para la distancia h ; $N(h)$ es el número de pares de puntos; $Z(x_i)$ el valor de la variable en el punto x ; $Z(x_i + h)$ el valor de la variable en el punto $(x + h)$.

A medida que h aumenta, la varianza $\gamma(h)$ también aumenta hasta un valor máximo en el que se estabiliza, correspondiente a la distancia (S_0) denominada Alcance. Este valor, en el que $\gamma(h)$ se estabiliza, se denomina Patamar ($C + C_0$) y es aproximadamente igual a la varianza de los datos, $\text{Var}[Z(x_i)]$. El (C_0) es el valor del efecto pepita (Figura 3), que revela la discontinuidad del variograma para distancias entre muestras, lo que puede atribuirse a errores de medición o al hecho de que los datos no se recopilaron en intervalos suficientemente pequeños (Oliver, 2010).

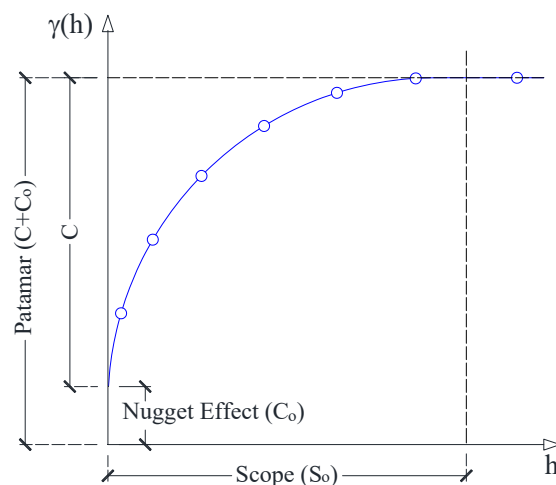


Figura 3. Modelo de variograma.
Figure 3. Variogram model.

La validación cruzada consiste en que cada uno de los n puntos de una muestra tiene un valor se estima mediante Kriging (o co-Kriging), para que los valores apareados se puedan representar gráficamente, y calcula la regresión lineal entre ellos (Guimarães, 2004). La regresión será entonces:

$$Z^*(x_0) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Z(x_i) \quad (2)$$

Dónde: β_0 es el coeficiente de intercepción; β_1 es el coeficiente angular de la línea.

Por lo tanto, si la estimación $Z^*(x_0)$ fuera idéntica al valor medido $Z(x_i)$, entonces β_0 sería nulo, β_1 y R^2 serían iguales a la unidad (uno), y la gráfica de $Z(x_i)$ versus $Z^*(x_0)$ sería una serie de puntos en la línea 1:1.1. Como los valores de β_0 aumentan de 0 (cero) a valores positivos, esto indica que el estimador $Z^*(x_0)$ sobreestima los valores pequeños de $Z(x_i)$ y subestima los valores grandes. Cuando β_0 disminuye de 0 (cero) a valores negativos, sucede lo contrario. El último caso no es común.

Kriging realiza la interpolación, que se refiere a la familia de algoritmos de regresión lineal de mínimos cuadrados que intentan predecir los valores de una variable en lugares donde los datos no están disponibles en función del patrón espacial de los datos disponibles. Kriging ordinaria es la única técnica que considera dos fuentes de información sobre el atributo, la variación y la distancia entre puntos (Webster y Oliver, 2007).

Kriging ordinaria (Ecuación 3) es la técnica más utilizada, donde la variable Z , en n puntos distintos, con coordenadas representadas por el vector x . Por lo tanto, se tiene un conjunto de valores $\{Z(x_i), i = 1, \dots, n\}$, donde x_i identifica una posición en dos dimensiones, representada por los pares de coordenadas (x_i, y_i) . Asumiendo que, su objetivo es estimar el valor de Z en el punto x_0 . El valor desconocido de $Z^*(x_0)$ se puede estimar a partir de una combinación lineal de n valores observados, agregado a un parámetro λ_0 (Oliver, 2010).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

Dónde: $Z^*(x_0)$ es el valor estimado para la ubicación x sin datos disponibles; $Z(x_i)$ valores con datos disponibles; y λ_i son los pesos asociados con el valor medido en la posición x_i . Para que Z^* sea una estimación no sesgada de Z , la suma de los pesos de la muestra debe ser igual a 1 ($\sum \lambda_i = 1$).

Otros criterios de evaluación de desempeño de validación cruzada, son los indicadores estadísticos de Willmott (1982) y Fox (1981) que evalúan el desempeño de los valores disponibles $Z(x_i)$ versus los valores estimados $Z^*(x_0)$, siendo el Error de sesgo medio relativo (MBE) y el Error cuadrático medio relativo (RMSE). Las definiciones de los indicadores vienen dadas por las Ecuaciones (4) y (5).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_0) - Z(x_i)] \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_0) - Z(x_i)]^2}{n}} \quad (5)$$

El índice MBE describe la tendencia media de los valores estimados a sobreestimar (valores positivos) o subestimar (valores negativos) los reales. El valor óptimo de RMSE es cero (0).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis granulométrico de 459 muestras de suelo, realizado en el laboratorio de suelos de la Fundación CETABOL, fueron estratificados de acuerdo con los lineamientos de clasificación textural del USDA (1938), además, organizados en tres grupos granulométricos de suelos (livianos, medianos y pesados) como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Grupo granulométrico de muestras de suelo.
Table 2. Granulometric group of soil samples.

N °	Clase de textura de acuerdo a USDA	Resultados de CETABOL		
		No.	Grupos	%
1	Arena	1	Livianos	3
2	Arena arcillosa	13		
3	Franco arenoso	115	Medio	77
4	Marga	86		
5	Franco limoso	153		
6	Limo	0		
7	Franco arcilloso arenoso	3	Pesado	20
8	Franco arcilloso	13		
9	Franco arcilloso limoso	52		
10	arcilla arenosa	0		
11	Arcilla limosa	23		
12	Arcilla	0		

De acuerdo con el Cuadro 2, de 12 clases texturales del USDA (1938), los resultados del análisis de 459 muestras de suelo formaron nueve clases texturales, de las cuales, solo 3% pertenecen al grupo de suelos ligeros, es decir, a las clases franco arenoso y textura arenosa; 77% pertenecen a suelos medios, y a las clases texturales franco limoso, franco arenoso y franco arcilloso respectivamente y 20% a suelos pesados, es decir, las texturas franco arcilloso, franco arcilloso, franco arcilloso y franco arcilloso respectivamente; observando que, en el área geográfica estudiada, no se encontraron suelos limosos, arcillosos arenosos y arcillosos. Si bien la caña de azúcar puede crecer en una amplia gama de texturas de suelos, generalmente los suelos franco arcillosos arenosos (20 a 35% de arcilla) tienden a ser los suelos más productivos (Meyer, 2013).

Se realizaron muestreos de suelo dentro de los límites municipales de Portachuelo, Saavedra, Montero, Warnes, Mineros, Fernández Alonso, Colpa Bélgica y parte de San Pedro, sector donde existen seis industrias azucareras (Ingenio Guabirá, Unagro, Aguai, La Esperanza, San Aurelio, La Bélgica). La posición geográfica de cada muestra de suelo que se observa en Figura 4, se distribuye de manera heterogénea, observándose muchos vacíos, principalmente, en los municipios de Colpa Bélgica, Portachuelo y Warnes, estas áreas son generalmente áreas urbanas, bosques nativos o en todos los casos de difícil acceso, consideradas como áreas de futura expansión.

El mapa de textura del área geográfica estudiada fue diseñado utilizando el modelo geoestadístico de Kriging ordinaria, el uso de este método de interpolación es apropiado, ya que brinda una solución al problema de estimación de superficie, teniendo en cuenta la correlación espacial en contraste con los métodos deterministas de Krige (1951).

Kriging es un proceso geoestadístico para estimar los valores de variables distribuidas en el espacio o tiempo, basado en valores adyacentes cuando se considera interdependiente con el análisis variográfico (Yamamoto y Landim, 2013). Luo, Taylor y Parker (2008) en sus estudios de comparación de métodos de interpolación espacial, determinaron que los métodos geoestadísticos de Kriging y co-Kriging eran los mejores para detallar las curvas de nivel y dieron una mejor consistencia espacial que esos métodos deterministas.

Se realizó la evaluación por interpolación de Kriging y co-Kriging ordinaria, con los indicadores geoestadísticos de: modelos y parámetros variográficos, validación cruzada e indicadores estadísticos.

Los mapas de arcilla, limo, arena y textura de la Figura 6 a seguir, fueron ajustados a diferentes modelos y parámetros variográficos, con el apoyo del sistema GS + Geoestadística para ciencias ambientales, los cuales se muestran en el Cuadro 3.

Los resultados del ajuste de los parámetros variográficos del Cuadro 3 indican que el coeficiente de determinación (R^2) de arcilla, arena, limo y textura son de alto nivel explicativo, cercano a uno (1). Asimismo, las proporciones $[C/(C+Co)]$ son superiores a 0.5 considerado espacialmente altamente dependiente, concluyendo que el número de muestras era suficiente para la preparación de los mapas bidimensionales de la Figura 6.

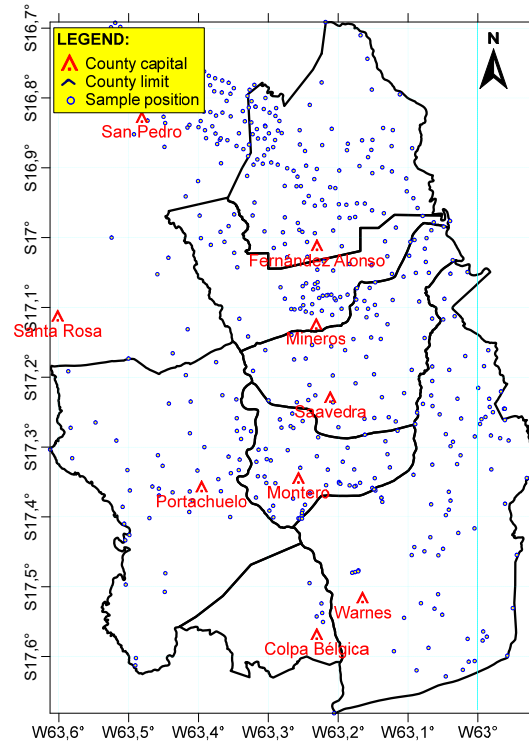


Figura 4. Ubicación en plano bidimensional (Sur y Oeste) de las muestras de suelo.
Figure 4. Location in two-dimensional plane (South and West) of soil samples.

De acuerdo con los indicadores de validación cruzada, entre los valores estimados $Z^*(x_o)$ y los valores reales o disponibles $Z(x_i)$, generaron indicadores de interpolación estadística como se muestra en la Figura 5.

La Figura 5, muestra los datos de validación cruzada utilizados en la elaboración de mapas porcentuales de arcilla, arena, limo y textura (Figura 6), los indicadores estadísticos de Coeficiente de determinación (R^2), Error de sesgo medio relativo (MBE) y el Error cuadrático medio relativo (RMSE). Según los valores de R^2 , los mapas porcentuales de limo y arena indican que las distancias (h) entre puntos ($Z(x_i) - Z^*(x_o)$) son suficientes para una interpolación de kriging ordinaria, las cuales explican en 53 y 54% respectivamente, mientras que, los mapas porcentuales de textura y arcilla explican apenas en 33 y 30% respectivamente. Los valores cercanos a cero (0) de acuerdo al indicador MBE explican que los valores estimados $Z(x_o)$ no sobreestiman ni subestiman a los valores reales $Z^*(x_i)$ (Willmott, 1982; Fox, 1981).

Cuadro 3. Variograma de modelos y parámetros ajustado con base en GS + Geoestadística para ciencias ambientales.
Table 3. Variogram of models and parameters adjusted based on GS + Geostatistics for environmental sciences.

Parámetros Variográficos	Arcilla	Arena	Limo	Textura
Modelo	Exponencial	Exponencial	Esférico	Exponencial
Co	8.00	300.00	192.00	3.75
C + Co	79.01	1 182.30	894.90	7.50
So (metro)	2 200.00	116 000.00	128 100.00	69 900.00
R^2	0.73	0.95	0.97	0.86
C/(C + Co)	0.90	0.75	0.79	0.50

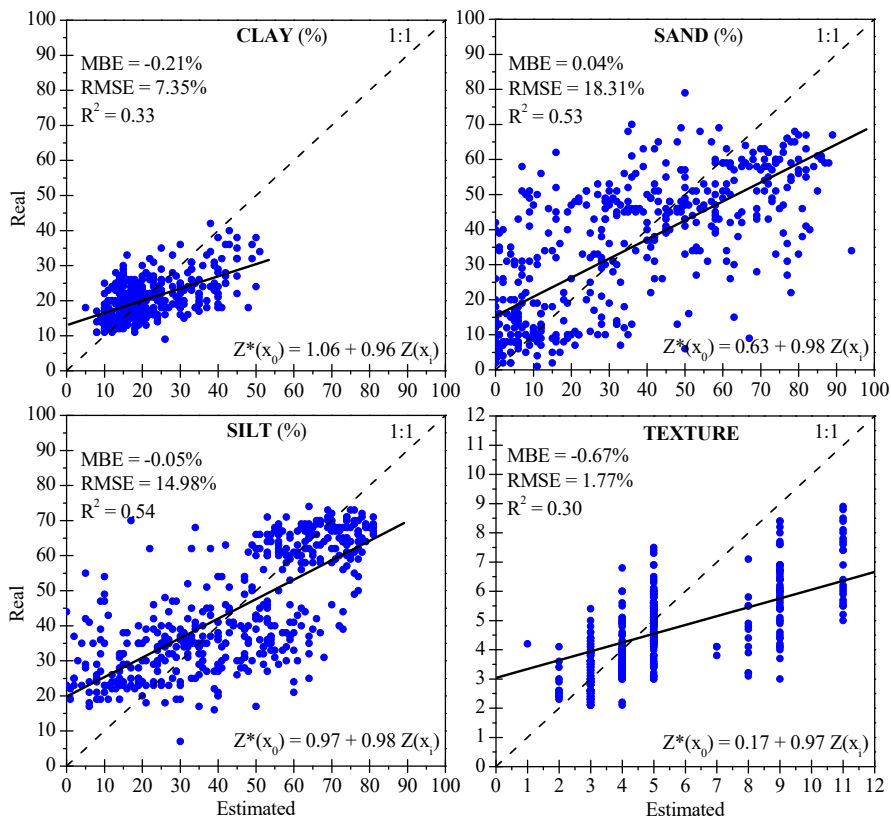


Figura 5. Validación cruzada basada en la evaluación del desempeño de los interpoladores.
Figure 5. Cross validation based on the performance evaluation of the interpolators.

Finalmente, el indicador RMSE muestra valores menores a 20% que según los parámetros de Jamieson, Porter y Wilson (1991) y Heinemann, Van Oort, Fernandes y Maia (2012) indican un ajuste regular de los interpoladores, en la línea 1:1. Los resultados de la interpolación se muestran en los mapas bidimensionales de la Figura 6.

El mapa de porcentaje de arcilla (clay), cuyas isolíneas, ubican los escasos niveles más altos de arcilla (50%) en una pequeña fracción territorial de los municipios de Warnes, San Pedro, Saavedra, Fernández Alonso y Mineros, mientras que, las isolíneas con un bajo nivel de arcilla se distribuyen por todo el territorio geográfico, es decir, ocupan una mayor extensión territorial (isolíneas entre 10 y 20%). El histograma en la Figura 7a apoya esta información, donde un mayor número de casos (274) se encuentran con niveles de arcilla entre 10 y 20%, 102 casos se encuentran en niveles entre 20 y 30%, 47 casos de 30 a 40%, 26 casos entre 40 a 50% y solo tres (3) casos entre 50 a 60%, considerando que el valor mínimo es 5.5% y el valor máximo de 51.8%, media de 20.72% y moda de 15 por ciento.

De manera analógica, en el mapa de porcentaje de arena (Sand) muestra un escenario opuesto al mapa de porcentaje de arcilla (Clay), esto significa que, en áreas donde hay mayor nivel de arcilla, hay menor porcentaje de arena y una condición inversa en áreas con menor porcentaje de arcilla. Las áreas con mayor contenido de arena presentan isolíneas de hasta 60, 70 y 80%, ubicadas en los municipios de Warnes, Portachuelo, Colpa Bélgica, Montero y Mineros, mientras que, los niveles de bajo porcentaje de arena muestran isolíneas de apenas 10%. El histograma en la Figura 7b muestra una distribución plana o platicúrtica, con máximo de 94.37%, mínimo de 0.10%, media de 34.13% y moda de 55.50%, donde 130 casos tienen niveles de arena entre 0% a 10%, seguidos de 52 casos entre 20 a 30% de arena, la tendencia muestra disminución en el número de caso, hasta que solo un caso alcanza el nivel de 90 a 100% de arena.

El mapa de porcentaje de limo (Silt) acompaña su ubicación al mapa de contenido de arcilla, con mayores niveles porcentuales de limo en suelos de los municipios del norte (Fernández Alonso y San Pedro) con 60 y 80%, mientras que, los bajos niveles porcentuales se encuentran en los suelos de los municipios del sur (Colpa Bélgica, Warnes, Portachuelo y Montero) con 10 y 20% de limo. El histograma de Figura 7c muestra que 81, 65 y 70 casos están en el nivel de 50 a 80% de limo, cuyo valor máximo es 81.70% y mínimo 0.14%, media de 45.16% y moda de 0.30 por ciento.

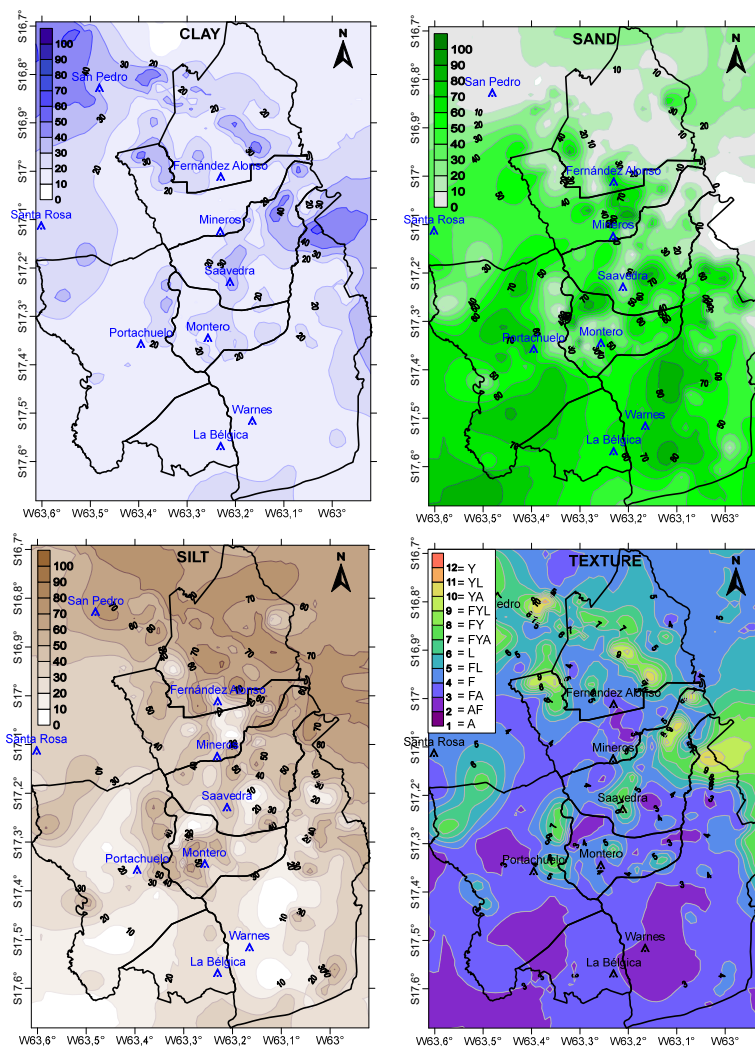


Figura 6. Mapas de arcilla, arena, limo y textura de áreas de caña de azúcar y futura expansión del departamento de Santa Cruz.
Figure 6. Clay, sand, silt and texture maps of sugarcane areas and future expansion of Santa Cruz department.

El mapa de textura del suelo (Figura 6) basado en las pautas del triángulo de textura USDA (1938), muestra en su extensión territorial de suelos un predominio de consistencia ligera y media (texturas franco limoso, franco arenoso, franco arenoso y franco), con isolíneas que marcan valores de 5, 3, 2 y 4 respectivamente, estas condiciones de suelo serían ideales para el cultivo de la caña de azúcar según indica Vitti *et al.* (2015) como francos o franco arcillosos. Asimismo, suelos pesados (texturas franco limo arcilloso, limo arcilloso, franco arcilloso, franco arcilloso arenoso) muestran en una escala menor, marcas de isolíneas con valores de 9, 11, 8 y 7 sucesivamente. Barbosa *et al.* (2018) determinó rendimientos de la caña de azúcar en suelo arcilloso de 153 Mg ha^{-1} más del doble que en suelo arenoso (58 Mg ha^{-1}), considerando que este tipo de suelos también son aptas para la producción de la caña de azúcar. Observando que el histograma de textura del suelo (Figura 7d) presenta suelos livianos y medios con texturas franco limoso (5) con un número de casos superior a 153, seguido de franco arenoso (3) con 117 casos y franco arenoso (4) con 86 casos, todos ubicados en la mayor superficie de los municipios de Warnes, Colpa Bética, Portachuelo y Montero.

De carácter complementario, las propiedades químicas del suelo que la caña de azúcar demanda son una amplia gama de elementos, principalmente, los enumerados en la tabla periódica. Sin embargo, solo requieren 16 elementos para un buen crecimiento. Los tres elementos estructurales carbono, hidrógeno y oxígeno, comprenden alrededor de 95% de la masa fresca de la planta y proviene principalmente del agua y el aire. El restante 5%, es el componente mineral, del cual al menos 13 elementos se consideran esenciales para el buen crecimiento y mantenimiento del ciclo reproductivo de la caña de azúcar (Meyer, 2013).

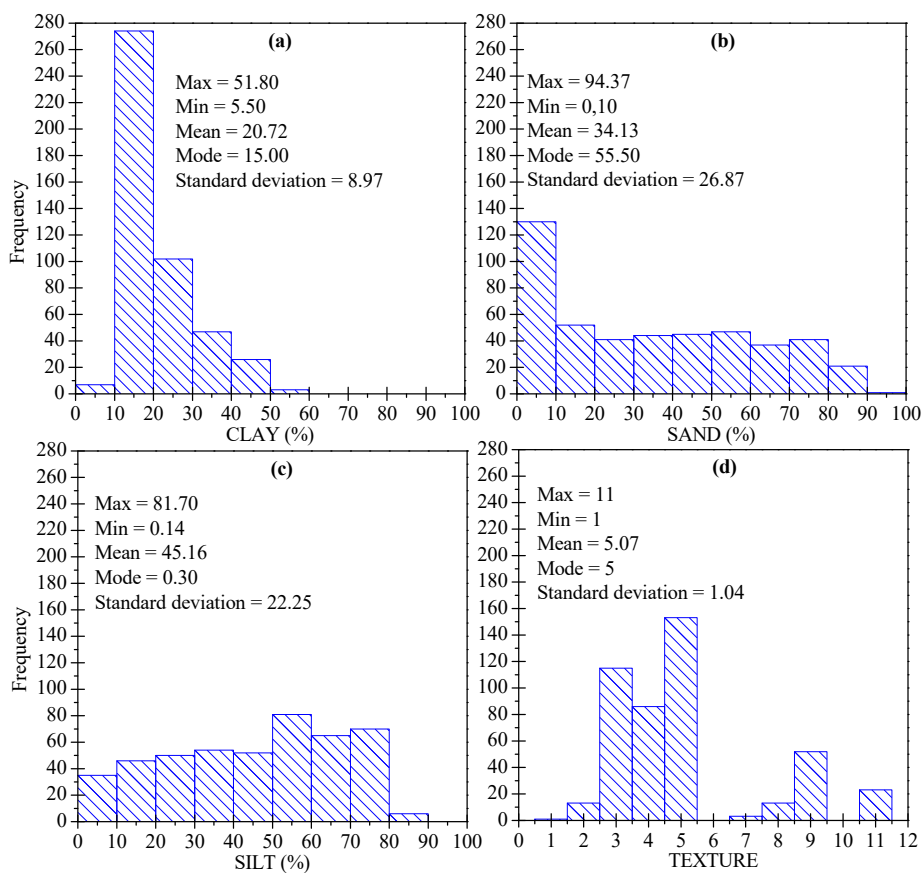


Figura 7. Histograma de frecuencias de (a) porcentaje de arcilla, (b) porcentaje de arena, (c) porcentaje de limo y (d) textura.
Figure 7. Histogram of frequencies of (a) percentage of clay, (b) percentage of sand, (c) percentage of silt and (d) texture.

CONCLUSIONES

De las 459 muestras de suelo colectadas, 3% pertenece a suelos ligeros (arena, franco arenoso), 77% a suelos medios (franco arenoso, franco, franco limoso y limo) y 20% a suelos pesados (franco areno arcilloso, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arcillo arenoso, arcillo limoso y arcilloso).

En el área geográfica estudiada, predominan los suelos con condiciones texturales franco arenoso (115), franco arenoso (86) y franco limoso (153) que, de acuerdo a otros estudios, los suelos de textura media son los más aptos para el cultivo de la caña de azúcar. Por consiguiente, esta es un área geográficamente mayor que los municipios en cuestión.

Para el cultivo de la caña de azúcar, se recomienda que los suelos pesados (arcillo limoso) consideren el drenaje y minimización de su compactación y los suelos ligeros (franco arenoso, franco arenoso) mejoren su estructura y textura con la incorporación de abonos verdes y fertilizantes orgánicos, para mejorar la humedad y retención de nutrientes en el suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles por el autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, redacción del manuscrito: E.Ch.C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Caña de Azúcar (CENACA) del Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) de Bolivia, por asumir los costos de análisis de 459 muestras de suelo en la fundación CETABOL. Asimismo, al equipo técnico (Alberto Gutiérrez, Jhonny Ojeda, Herlin Jiménez, Jorge Vázquez) y testistas (Fernando Ocampo, Richard Cruz y Julio Sejas) por apoyar en la recolección de muestras de suelo por el área geográfica de estudio.

LITERATURA CITADA

- Barbosa, L. C., de Souza, Z. M., Franco, H. C. J., Otto, R., Neto, J. R., Garside, A. L., & Carvalho, J. L. N. (2018). Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional*, 13, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>
- Cassalett-Davila, C., Torres-Aguas, J., & Isaacs-Echeverry, C. (1995). *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia*. Cali, Colombia: CENICAÑA.
- Fernandez-Illescas, C. P., Porporato, A., Laio, F., & Rodriguez-Iturbe, I. (2001). The ecohydrological role of soil texture in a water-limited ecosystem. *Water Resources Research*, 37(12), 2863-2872. <https://doi.org/10.1029/2000WR000121>
- Fox, D. G. (1981). Judging air quality model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62(5), 599-609. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1981\)062%3C0599:JAQMP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1981)062%3C0599:JAQMP%3E2.0.CO;2)
- García-Gaines, R. A., & Frankenstein, S. (2015). *USCS and the USDA Soil Classification System: Development of a Mapping Scheme*. Vicksburg, MS, USA: U.S. Army Engineer Research and Development Center- Cold Regions Research and Engineering Laboratory
- Guaygua, G. E., & Espinoza, D. R. (2008). *Muestreo de suelos e interpretación de resultados de laboratorio*. Santa Cruz, Bolivia: Fundación CETABOL.
- Guimarães, E. C. (2004). *Geoestatística básica aplicada*. Uberlândia, Brasil: Universidade Federal de Uberlândia.
- Heinemann, A. B., Van Oort, P. A., Fernandes, D. S., & Maia, A. D. H. N. (2012). Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. *Agrometeorology*, 71(4), 572-582. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012000400016>
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337-350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Köppen, W. (1936). Das geographische system der klimate. In W. Köppen, & R. Geiger (Eds.). *Handbuch der klimatologie* (44 pp.). Berlin, Germany: Gebruder Borntraeger. S.
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6), 119-139.
- Luo, W., Taylor, M. C., & Parker, S. R. (2008). A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 28(7), 947-959.
- Meyer, J. (2013). Sugarcane nutrition and fertilization. In J. H. Meyer, P. E. Turner, P. Rein, & K. Mathias (Eds.). *Good management practices for the cane industry* (pp.117-168). Bartens, Berlin, Germany: Bartens.
- Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (2021). *Análisis de Complejo Productivo de la Caña de Azúcar*. Bolivia. Consultado el 23 de enero, 2023 desde https://siip.produccion.gob.bo/noticias/files/777_analisis-complejo-cana-de-azucar.pdf
- Montes de Oca, I. (2005). *Enciclopedia Geográfica de Bolivia*. La Paz, Bolivia: Editorial Atenea. ISBN: 9990505675
- Oliver, M. A. (2010). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>
- Poggio, L., & Gimona, A. (2017). 3D mapping of soil texture in Scotland. *Geoderma regional*, 9, 5-16.
- Shirazi, M. A., & Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1), 142-147. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800010026x>

- USDA (United States Department of Agriculture). (1938). *Soils & Men: yearbook of Agriculture*. Washington, D.C., USA: USDA.
- Vitti, G. C., de Cerqueira Luz, P. H., & Altran, W. S. (2015). Nutrition and Fertilization. In F. Santos, A. Borém and C. Caldas (Eds.). *Sugarcane: Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol* (pp. 53-88). Elsevier Inc. All. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00004-9>
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. 2nd Edition: John Wiley and Sons Ltd. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470517277>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Yamamoto, J. K., & Lambim, P. M., B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo, Brasil: Oficina de textos. ISBN: 9788579750779