




Caracterización Textural y de pH del Área Potencial Productiva de Papaya (*Carica papaya* L.) de la Comunidad Kewayllani del Municipio de Toro Toro Norte Potosí

Textural and pH Characterization of the Potential Productive Area of Papaya (*Carica papaya* L.) of the Kewayllani Community, Municipality of Toro Toro Norte Potosí

Franklin Colquechambi Barrios¹ ; Esteban Choque-Conde²  y Yovanna Flores-Mamani³ 

¹Instituto Tecnológico Avelino Siñani de Mizque, - Carrera de Agropecuaria, Mizque, Cochabamba, Bolivia,

^{2,3}Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Agronómica, Llallagua, Potosí, Bolivia,

²Autor de correspondencia: dii@unsxx.bo

Resumen

El objetivo de la investigación fue caracterizar la textura y pH del suelo en áreas productivas del cultivo de papaya, para establecer bases sólidas de planificación agrícola y gestión eficiente del suelo. El método aplicado fue la recolección de 147 muestras de suelos en la comunidad Kewayllani y posteriormente fueron analizados las clases texturales del suelo y mediciones *in situ* de los niveles de pH. Además, el mapeamiento geoespacial de textura y pH del suelo fue modelado por de Kriging ordinaria y la validación cruzada. Los resultados obtenidos revelan que la clase textural predominante es "franco arenoso", representando el 43,54% del total de muestras. Esta característica sugiere que la mayoría de los suelos en la zona estudiada presentan una combinación adecuada de partículas de arena, limo y arcilla, lo que confiere propiedades favorables para el cultivo de papaya, como una buena capacidad de drenaje y retención de nutrientes. En relación al pH del suelo, la mayoría de las muestras presentan valores próximos a 7, lo que indica, condiciones neutras propicias para el desarrollo óptimo de la papaya.

Palabras-clave: Coeficiente de determinación, modelo geoestadístico, validación cruzada.

Abstract

The objective of the research is to provide detailed and accurate information on the textural and pH characteristics in a potentially productive area for papaya cultivation, in order to establish solid bases for agricultural planning and efficient soil management in papaya cultivation. For this purpose, 147 soil samples were collected in the Kewayllani community, subsequently, they were subjected to laboratory analysis at the CETABOL Foundation, following the guidelines of the United States Department of Agriculture (USDA), to determine the textural classes of the soil, also, *in situ* measurements of the pH levels using a portable and digital potentiometer, developed by the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). The texture and pH maps were made by applying the ordinary Kriging geostatistical model and cross-validation. The results obtained reveal that the predominant textural class is "sandy loam", representing 43,54% of the total samples. This characteristic suggests that most soils in the studied area have an adequate combination of sand, silt and clay particles, which confers favorable properties for papaya cultivation, such as good drainage capacity and nutrient retention. Regarding soil pH, most samples have values close to 7, indicating neutral conditions conducive to optimal papaya development.

Keywords: Coefficient of determination, geostatistical model, cross validation.

Introducción

La papaya (*Carica papaya* L.) es una fruta tropical originaria de América Central y México y cultivada en diversas partes del mundo como México, Brasil, India y Tailandia como principales productores. Es valorada por su sabor, aroma, textura y propiedades nutricionales, además, el valor comercial para la economía y el comercio mundial. En este sentido, caracterizar las áreas productivas, permite identificar el potencial productivo de cultivo de papaya es crucial para su desarrollo sostenible.

La comunidad Kewayllani del municipio de Toro Toro, de la región norte del departamento de Potosí, país Bolivia, es una de las zonas aptas para el cultivo de papaya, sin embargo, la falta de información de los productores sobre las características físicas y químicas de los suelos, principalmente, la textura y el pH, comprometen a lograr los óptimos rendimientos de este cultivo, consecuencia del cual, fue imprescindible realizar el presente estudio, los que permitirá encaminar procesos de planificación de uso y manejo de los suelos por los agricultores en las zonas de producción de papaya.

La textura del suelo es un parámetro relevante que influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, tal como afirman Smith y Jones (2015). La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de las partículas de arena, limo y arcilla que componen el suelo. Cada tipo de partícula tiene diferentes propiedades físicas y químicas que influyen en la retención de agua, aireación, infiltración, capacidad de retener nutrientes. Por lo tanto, la caracterización de la textura del suelo en la comunidad Kewayllani brindará información clave para el desarrollo de la producción de papaya en la región.

Asimismo, el pH del suelo es otro factor determinante en la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Según González *et al.* (2017), el pH del suelo influye en la solubilidad y movilidad de los nutrientes en el suelo. Un pH inadecuado puede limitar la absorción de nutrientes por las raíces de las plantas y, por lo tanto, afectar su crecimiento y desarrollo. Por consiguiente, la determinación del pH del suelo en la comunidad Kewayllani también resulta crucial para impulsar la producción de papaya en la región.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo de caracterizar la textura y pH del suelo en las áreas potencialmente productivos del cultivo de papaya de la comunidad Kewayllani del municipio de Toro Toro, la región del Norte Potosí, país Bolivia. Los resultados de la investigación serán optimizadas por los productores de papaya de la zona, quienes mediante su organización social, desarrollaran procesos de planificación estratégica de uso y manejo de suelos; lo que apunta a optimizar el uso de recursos hídricos en el riego del cultivo de papaya, como la determinación de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente, asimismo, la aplicación de métodos de riego más eficientes y la implementación de canales de drenajes, que contribuyan a mitigar posibles índices de salinización de los suelos, de esta forma desarrollar una agricultura sostenible con máximos niveles de producción de papaya en la región.

Materiales y Métodos

Ubicación del Área de Estudio

El presente estudio sobre la caracterización de la textura y el pH de suelos se realizó en la comunidad Kewayllani, ubicada en el municipio de Toro Toro, del Departamento de Potosí de Bolivia, (Figura 1). Zona identificada como potencial productivo para el cultivo de papaya debido a sus condiciones climáticas. Se encuentra localizada entre las coordenadas geográficas de latitud Sur de 18°07' y longitud Oeste de 65°46' y a una altitud de 2,200 ms. n. m.

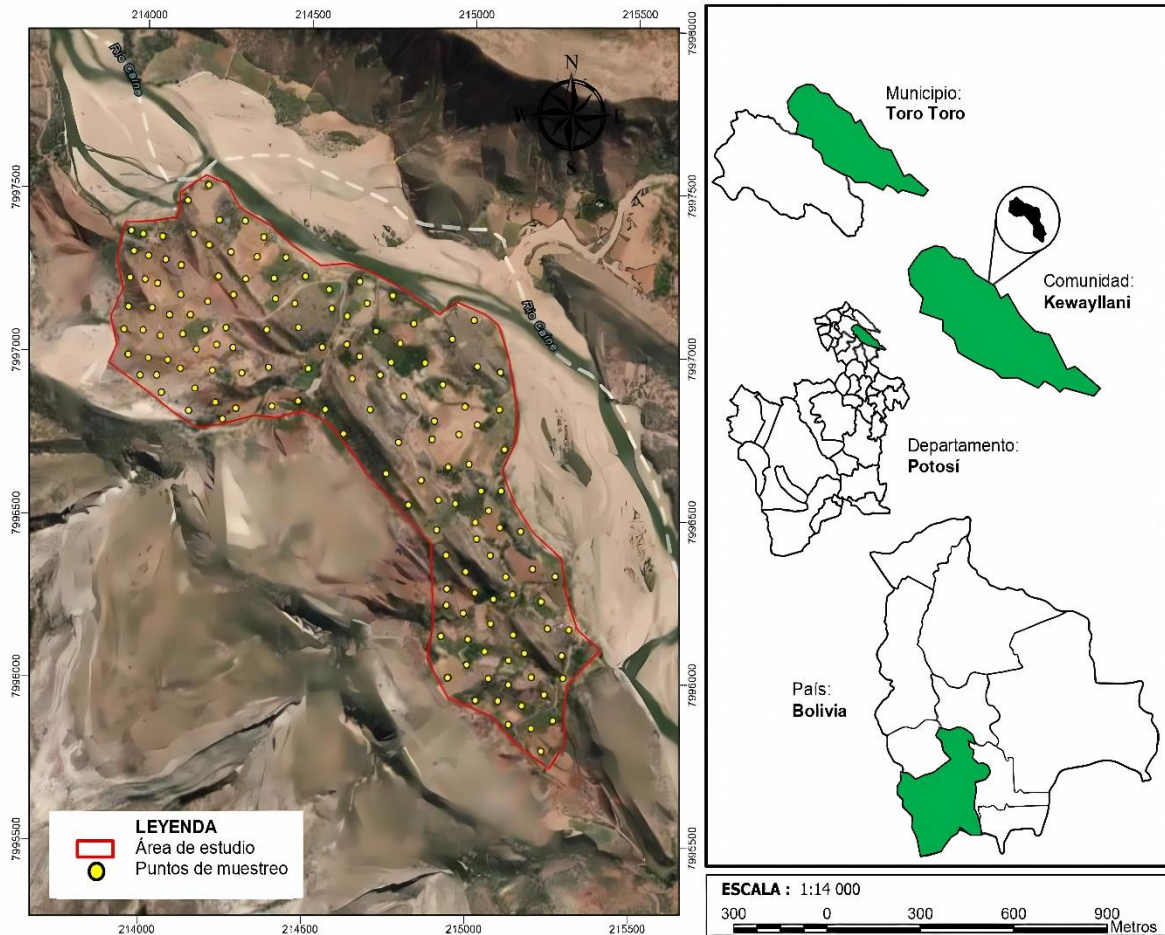


Figura 1. Localización del área de estudio (comunidad Kewayllani)

Muestreo de suelos

Para el muestreo de suelos, se consideró los criterios metodológicos de Guaygua y Espinoza (2018) como ser: la des-uniformidad del suelo dentro de un lote, clasificar el área del cual se tomarán las muestras ya sea a mano alzada o con ayuda de imágenes satelitales. Por lo que, se procedió a clasificar el área para extraer las muestras a través de imágenes satelitales para garantizar la eficiencia y la representatividad espacial e interpolación de las muestras recolectadas, es decir, el número de muestras a ser colectadas para su respectiva validación. Las muestras se recolectaron a una profundidad de 30 cm de la capa arable, dado que, en el cultivo de papaya, la mayor concentración de raíces absorbentes se encuentra en los primeros 30 cm de profundidad (Agrorural, 2018), esta información fue determinante para llevar a cabo un estudio confiable y significativo. Una vez planificado los aspectos logísticos, nos aseguramos de tener todas las herramientas necesarias, como muestreador del suelo, cintas métricas, bolsas de plástico, etiquetas, el dispositivo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y un pH-metro digital.

La recolección de muestras de suelos se realizó mediante la técnica zigzag, lo que implicó tomar muestras en puntos predefinidos. Se tomaron entre 10 a 15 muestras del suelo de una hectárea de superficie, tal como lo recomienda el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2015). Esta cantidad se considera adecuada para obtener una representación razonable para estudio de suelos, sin embargo, es importante tener en cuenta que esto puede variar dependiendo de la uniformidad del suelo.

Análisis de laboratorio

Una vez finalizada la recolección de las muestras, se procedió a enviar un total de 147 muestras al laboratorio de suelos de la Fundación del Centro Tecnológico Agropecuario en Bolivia (CETABOL) del departamento de Santa Cruz de la Sierra. El propósito de este envío fue obtener una información detallada acerca de la composición granulométrica de suelos que incluye el porcentaje de arena, arcilla y limo presentes en cada muestra.

Por otro lado, la determinación del pH de suelos se llevó a cabo *in situ* utilizando un pH-metro portátil y de fácil manejo, modelo KC-300B Soil Survey Instrument, el proceso implicó la inserción del electrodo directamente en cada muestra, una vez insertada se esperan como 10 segundos y el dispositivo muestra rápidamente el valor del pH del suelo en una pantalla digital, lo que permitió obtener mediciones instantáneas y precisas.

Análisis geoestadístico

Los mapas texturales y de pH de suelos se confeccionaron con apoyo del modelo geoestadístico, el cual, implica el análisis de los parámetros del variograma, Kriging ordinaria y la validación cruzada, de esta manera, se confeccionan mapas detalladas y confiables que representan la distribución espacial de las características texturales y de pH del suelo.

El variograma es una herramienta utilizada en el análisis geoestadístico para medir la necesidad espacial de una variable en función de la distancia entre los puntos de muestreo (Silva et al., 2011). El variograma fue determinada mediante la ecuación:

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

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

La validación cruzada generada mediante la regresión lineal simple, se utiliza para modelar la relación lineal entre una variable dependiente $Z^*(x_0)$ y una variable independiente $Z(x_i)$ para encontrar la mejor línea recta que se ajusta a los datos observados, minimizando la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores estimados (Oliver, 2010).

Al utilizar la ecuación (2), podemos realizar predicciones o estimaciones de los valores estimados como la variable dependiente $Z^*(x_0)$ en función de los valores medidos como la variable independiente $Z(x_i)$. La Ecuación de la regresión lineal se expresa de la siguiente manera:

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

Dónde: β_0 = coeficiente de intercepción; β_1 = coeficiente angular de la línea; $Z(x_i)$ = valores medidos; $Z^*(x_0)$ = valores estimados.

La técnica de interpolación con Kriging se basa en una familia de algoritmos de regresión lineal de mínimos cuadrados, que busca predecir los valores de una variable en ubicaciones donde los datos no están disponibles, utilizando el patrón espacial de los datos existentes. Se utiliza el concepto de variograma, que representa la variabilidad espacial de la variable en estudio, para estimar los pesos de influencia de los puntos vecinos en la interpolación (Silva et al., 2011).

La confección de mapas fue utilizando en modelo de Kriging ordinaria, es un método ampliamente utilizado en geoestadística para generar mapas interpolados y estimaciones espaciales precisas, teniendo en cuenta la conexión espacial de los datos disponibles, estimaciones proporcionales no sesgadas y optimiza la precisión al minimizar la varianza del error de estimación (Kumar et al., 2021).

De esta manera, se genera una predicción continua y suavizada de la variable de interés en toda el área de estudio, Kriging ordinaria es representada por la ecuación (3):

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

Dónde: $Z^*(x_0)$ = valores estimados para la ubicación x sin datos disponibles; $Z(x_i)$ = valores medidos con datos disponibles; λ_i = pesos asociados con el valor medido en la posición x_i ; $(\sum \lambda_i)$ = suma de los pesos de la muestra.

Validación Cruzada

Según Wang et al. (2020), la validación cruzada en el mapeo de suelos es una técnica utilizada para evaluar y validar modelos de predicción de suelos en áreas no muestreadas. Consiste en dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, donde se ajusta el modelo utilizando el conjunto de entrenamiento y se evalúa su precisión utilizando el conjunto de prueba.

Al realizar la validación cruzada en el mapeo de suelos, se pueden calcular métricas de precisión, como el Error de Sesgo Medio Relativo (MBE), por sus siglas en inglés Mean Bias Error, el Error Medio Cuadrado Relativo (RMSE) por sus siglas en inglés Root Mean Squared Error y el Coeficiente de Determinación (R^2), que proporcionan una medida de qué tan cercanas son las predicciones del modelo a los valores reales o medidos de los suelos (Yang et al., 2020). Por lo tanto, esto ayuda a evaluar la confiabilidad y el rendimiento del modelo de predicción, lo que a su vez permite tomar decisiones más informadas en relación con el manejo de suelos y la planificación del uso del suelo.

El MBE y el RMSE, son métricas utilizadas para evaluar el rendimiento de modelos de estimación en comparación con los valores medidos o reales. El MBE describe la tendencia media de los valores estimados a sobreestimar (valores positivos) o subestimar (valores negativos) los reales. El RMSE mide, en promedio, cuánto se alejan los datos reales o medidos de los estimados por el modelo de regresión según Fox (1981) y Willmott (1982). La ecuación (4) que representa el Error de Sesgo Medio Relativo es la siguiente:

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

Donde: MBE =Error de Sesgo Medio Relativo; n = número total de muestras; $Z^*(x_0)$ = valores estimados; $Z(x_i)$ = valores medidos o reales.

Un MBE cercano a cero indica que el modelo está sesgado de manera insignificante, mientras que valores positivos o negativos indican un sesgo positivo o negativo, respectivamente (Yang et al., 2020).

Por otro lado, RMSE, se utiliza para medir la precisión global del modelo de predicción en comparación con los valores medidos o reales. Se calcula como la raíz cuadrada de la media de los

errores cuadráticos entre los valores medidos y los valores estimados, es representado por la ecuación (5):

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

Donde: RMSE = Error Cuadrático Medio Relativo; n = número total de muestras; $Z^*(x_0)$ = valores estimados; $Z(x_i)$ = valores medidos.

El RMSE proporciona una medida de dispersión promedio entre los valores medidos y los valores estimados. Un RMSE más bajo indica una mayor precisión del modelo.

Por otro lado, el Coeficiente de Determinación (R^2), se utiliza para evaluar el ajuste del modelo, es decir, qué tan bien se ajustan los valores estimados a los valores medidos o reales. Según Yang et al, (2020), se calcula el R^2 dividiendo la variabilidad explicada por el modelo entre la variabilidad total en los datos, un valor de R^2 más cercano a 1 indica que el modelo es bueno para explicar la variabilidad en los datos, mientras que un valor cercano a 0 indica que el modelo no es eficaz para explicar la variabilidad. El coeficiente de determinación se expresa mediante la ecuación (6):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_0) - \bar{Z}(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)]^2} \quad (6)$$

Donde: $Z^*(x_0)$ = valores estimados; $Z(x_i)$ = valores medidos; $\bar{Z}(x_i)$ = media de los valores medidos.

Resultados y Discusión

Los resultados del análisis granulométrico, que incluye el porcentaje de arena, limo y arcilla, fueron obtenidos a partir de 147 muestras, estas fueron sometidas a análisis en el laboratorio de la Fundación CETABOL. Los resultados fueron estratificados siguiendo los lineamientos del triángulo textural establecidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2017), como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases texturales del área de estudio

N°	Clase Textural según USDA	Resultados de Fundación CETABOL	
		N° de muestras	Porcentaje (%)
1.	Arenoso	0	0
2.	Areno franco	0	0
3.	Franco arenoso	64	43,54
4.	Franco	37	25,17
5.	Franco limoso	0	0
6.	Limoso	0	0
7.	Franco arcilloso	30	20,41
8.	Franco arcillo arenoso	8	5,44
9.	Franco limoso arcilloso	0	0
10.	Arcillo arenoso	0	0
11.	Arcillo limoso	0	0
12.	Arcilloso	8	5,44
Total		147	100

De acuerdo con la Tabla 1, la clase textural predominante en el área de estudio, de un total de 147 muestras de suelos, según los resultados de fundación CETABOL, es "Franco arenoso" con 64 muestras, lo que representa el 43,54% del total. Otras clases texturales significativas son "Franco" con 37 muestras (25,17%) y "Franco arcilloso" con 30 muestras (20,41%). Las clases texturales restantes, como "Franco arcillo arenoso" y "Arcilloso", tienen una menor representación, con 8 muestras cada una, lo que equivale al 5,44% del total.

El suelo de textura franco arenoso se caracteriza por mantener una proporción equilibrada de arena, limo y arcilla, esta textura favorece una buena aireación del suelo, permitiendo que las raíces respiren adecuadamente. Estas condiciones son óptimas para el cultivo de papaya, según lo menciona INTAGRI (2017). Para un óptimo desarrollo, el cultivo de papaya demanda condiciones específicas del suelo, entre las cuales se incluyen características como suelos no compactados, una textura franco arenosa, una estructura granular y una buena permeabilidad. La textura franco arenosa, en particular, se asocia con propiedades de drenaje destacadas y una rápida absorción de calor debido a su estructura porosa.

En el caso del suelo de textura franco arcilloso, se encuentra una proporción equilibrada de arcilla, arena y limo, esta textura puede tener un impacto en el desarrollo de las raíces debido a su estructura agregada o en bloques, que puede dificultar la penetración de las raíces, además, la textura franco arcillosa tiene una capacidad moderada de aireación y drenaje. La arcilla en esta textura contribuye a una mayor retención de agua y nutrientes, lo que puede ser mejorada para las plantas en períodos de sequía, pero también puede generar problemas de encharcamiento si no hay un buen drenaje (FAO, 2017). Los resultados del pH del suelo se presentan detalladamente en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de pH del suelo

pH de suelos	N° de muestras	Porcentaje (%)	Clasificación
7,0	44	29,93	neutro
6,9	34	23,13	neutro
6,8	31	21,09	neutro
6,7	28	19,05	ligeramente ácido
6,6	2	1,36	ligeramente ácido
6,5	1	0,68	ligeramente ácido
6,4	7	4,76	ligeramente ácido
Total	147	100	

Según la Tabla 2, de 147 muestras evaluadas la mayoría de las muestras de suelos presentan un pH neutro, representado por los valores de pH de 7,0; 6,9 y 6,8, los cuales constituyen aproximadamente el 74,15% del total de la muestra. Esto indica que la mayor parte de las muestras tiende a tener un pH cercano a 7,0, lo que se considera neutro, por otro lado, los valores de pH más bajos 6,7; 6,6; 6,5 y 6,4 representan un porcentaje menor del total de la muestra y se clasifican como ligeramente ácido. Estos resultados sugieren que hay una proporción reducida de muestras de suelo con un pH ligeramente ácido.

Sobre los suelos neutros la FAO (2022), menciona que tienden a tener un equilibrio óptimo de nutrientes, lo que los convierte en un ambiente ideal para el crecimiento de una amplia variedad de plantas. Los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como el nitrógeno, el fósforo y el potasio, están disponibles en cantidades adecuadas. Al respecto Ghani et al. (2017), menciona que, los microorganismos desempeñan un papel crucial en la descomposición de la materia orgánica, la liberación de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo, es importante tener en cuenta que, aunque los suelos con pH neutros tienen ventajas para el crecimiento de muchas plantas, cada cultivo y especie vegetal tiene diferentes requisitos de pH, asimismo, es necesario evaluar las necesidades

específicas de las plantas y realizar ajustes si el pH se desvía significativamente del valor neutro (Soil App, 2021).

Por otro lado, en relación a los suelos con un pH ligeramente ácido, Wang et al. (2019) señala que, estos suelos poseen una concentración razonable de iones hidronio (H^+), los suelos ligeramente ácidos resultan ser los más adecuados para el cultivo de la papaya. Según Cesaratto et al. (2020), el cultivo de papaya es sumamente susceptible a las variaciones en el pH del suelo, ya que esto afecta la disponibilidad de nutrientes para la planta, este cultivo requiere suelos con un pH ligeramente ácido, específicamente en un rango de 6,0 a 6,5.

Los resultados de desempeño de validación cruzada que evaluó el rendimiento de los interpoladores en la confección de los mapas de porcentaje de limo, arcilla, arena, textura y pH se muestran en la Figura 2.

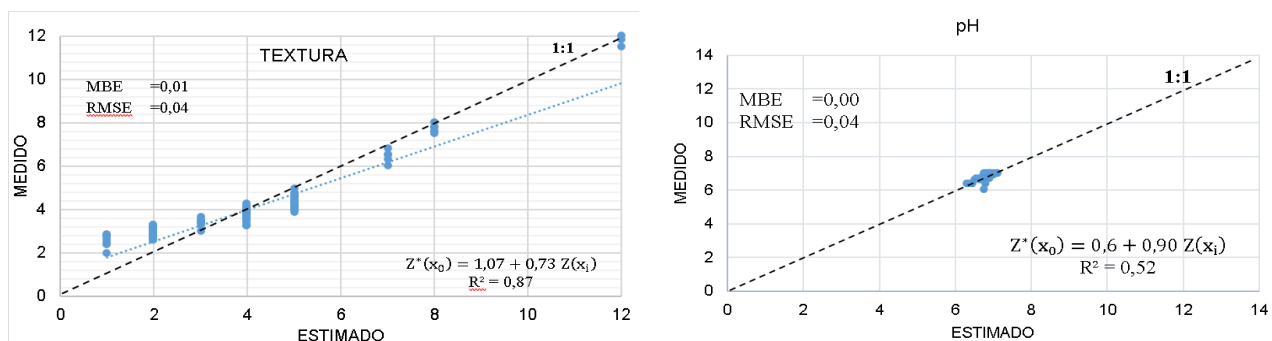


Figura 2. Validación cruzada del desempeño de interpoladores en mapa de textura y pH

Según se muestra en la Figura 2, en el desempeño de interpoladores en mapa de textura la ecuación de regresión, sugiere que existe una relación lineal entre las variables de datos reales o medidos $Z(x_i)$ y estimados $Z^*(x_0)$, en particular, indica que, por cada unidad adicional de $Z(x_i)$, el valor de $Z^*(x_0)$ aumenta en 0,73 y hay un término constante de 1,07, esto significa que se espera un incremento constante en $Z^*(x_0)$ con respecto a $Z(x_i)$, y el término constante es la estimación de $Z^*(x_0)$ cuando $Z(x_i)$ es igual a cero.

Asimismo, el MBE con un valor de 0,01, indica que, en promedio, las predicciones del modelo tienden a estar desviadas en 0,01 unidades en relación con los valores reales, en otras palabras, el modelo indica no tener un sesgo y tiende a predecir valores prácticamente similares a los valores reales en promedio, lo que sugiere que el modelo no sobreestima ni superestima los valores reales a los valores estimados en relación a la línea 1:1.

De la misma forma, el RMSE es de 0,04, esto indica que las predicciones del modelo tienen una dispersión promedio de apenas 0,4% en relación con los valores reales, a pesar de esta desviación, sugiere un rendimiento generalmente preciso, pero con cierta variabilidad en las predicciones.

Entre tanto, el R^2 es 0,87, esto implica que, aproximadamente en el 87 % de los valores reales de la muestra de suelo explica o determina en los valores estimados por interpolación mediante el modelo geoestadístico y el 13% pueden haber influido otros factores, en otras palabras, el modelo tiene un buen ajuste a los datos, ya que explica una gran proporción de la variabilidad presente en $Z^*(x_0)$.

Por otro lado, el desempeño de interpoladores en mapa de pH muestra que, la ecuación de regresión lineal, describe una relación lineal entre dos variables, donde $Z^*(x_0)$ es la variable dependiente y $Z(x_i)$ es la variable independiente, el coeficiente 0,90 que multiplica a $Z(x_i)$ indica que, por cada unidad adicional de $Z(x_i)$, se espera que $Z^*(x_0)$ aumente en aproximadamente 0,9 %,

Esto sugiere una relación lineal positiva entre las dos variables, donde un aumento en $Z(x_i)$ se asocia con un aumento en $Z^*(x_0)$.

Asimismo, el MBE indica que, en promedio, las predicciones del modelo son exactamente iguales a los valores reales, en otras palabras, no hay sesgo sistemático en las predicciones, el modelo no tiende a sobreestimar ni subestimar consistentemente los valores reales.

De la misma forma, el RMSE es relativamente bajo, lo que indica que las predicciones del modelo son precisas en relación con los valores reales, este hallazgo refuerza la confianza en la capacidad del modelo para realizar predicciones precisas, lo que respalda su utilidad y confiabilidad.

Entre tanto, R^2 indica que aproximadamente el 52% de la variabilidad en la variable dependiente $Z^*(x_0)$ puede ser explicada por el modelo de regresión lineal, esto sugiere que el modelo tiene la capacidad para explicar la variabilidad en $Z^*(x_0)$ en función de $Z(x_i)$. En otras palabras, la ecuación de regresión lineal tiene un ajuste alto a los datos y proporciona información útil sobre la relación entre las variables.

En este estudio, se ha confeccionado mapas utilizando el programa ArcGIS PRO, aprovechando datos recolectados y aplicando la técnica de Kriging ordinaria para la interpolación. Para asegurar la calidad de estos mapas, se han sometido a una validación rigurosa mediante indicadores estadísticos clave, como el MBE, el RMSE y el R^2 . Esto nos ha permitido crear representaciones georreferenciadas precisas de las variaciones en la textura y el pH del suelo en la zona de estudio.

Al proporcionar una visión espacial detallada de las características del suelo, los agricultores pueden tomar decisiones informadas sobre la ubicación óptima para el cultivo de papaya, la aplicación de fertilizantes y otros aspectos relacionados con la agricultura. Esto, a su vez, contribuye a mejorar la productividad agrícola y a garantizar un uso sostenible de los recursos naturales en la zona de estudio, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente, estos mapas se exponen a continuación:

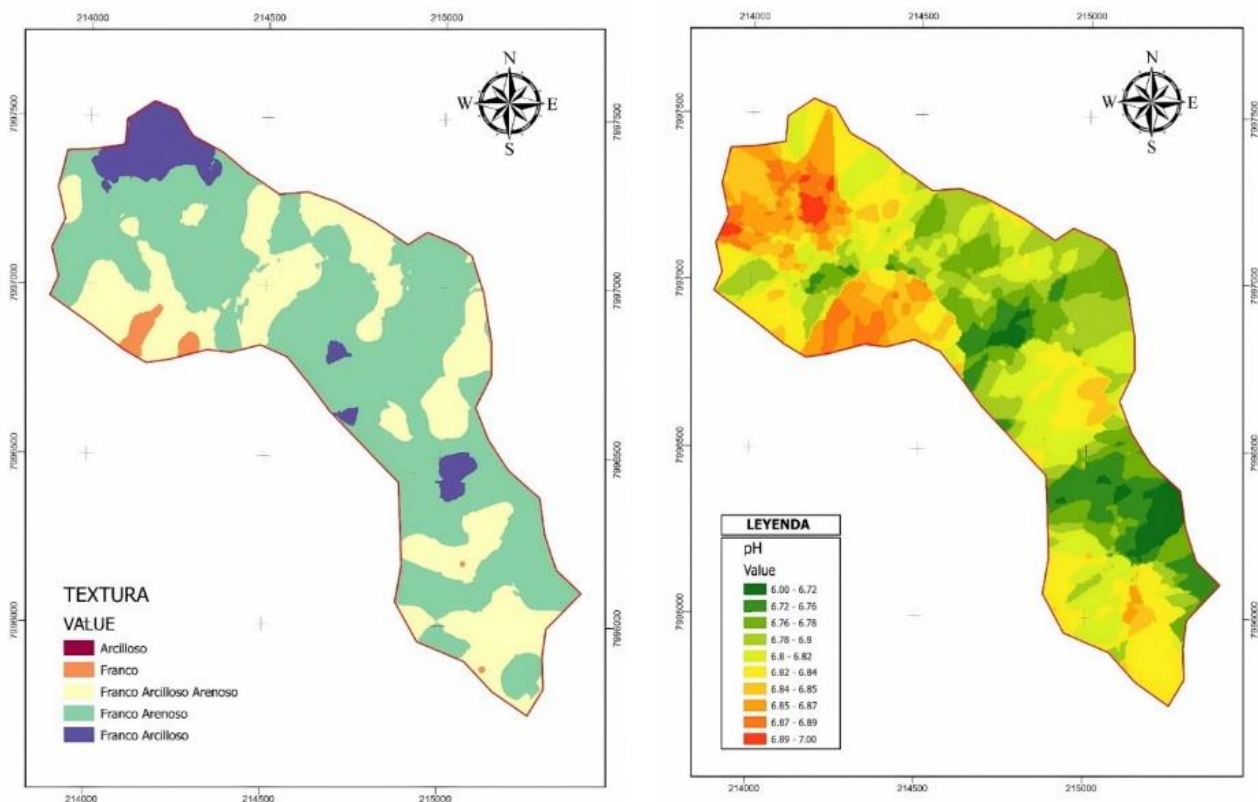


Figura 3. Mapa de pH del área de estudio

Según la Figura 3, en el área de estudio se han identificado diversas clases texturales que caracterizan el paisaje observado, abarcando suelos de textura arcillosa, franca, franco arcilloso arenoso, franco arenoso y franco arcilloso. Según el USDA (2017), las clases texturales se refieren a la proporción relativa de partículas de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Estas partículas son los componentes del suelo y determinan sus propiedades físicas. La textura del suelo es un factor importante que influye en la capacidad del suelo para retener agua, drenar adecuadamente, proporcionar nutrientes a las plantas y otras características relacionadas con el cultivo.

Según INTAGRI (2017), la textura del suelo adecuada para el cultivo de papaya es generalmente una mezcla de arena, limo y arcilla, lo que se conoce como un suelo franco. Un suelo franco proporciona una buena aireación, drenaje y retención de agua, creando un entorno propicio para el desarrollo de las raíces y el crecimiento de la planta de papaya. Por otro lado, el mapa de pH revela un rango de valores que oscilan entre 6,4 y 7,0, lo que indica la presencia de suelos con pH ligeramente ácido a neutro en el área estudiada. Esta variación en los valores de pH es de gran importancia para la caracterización de los suelos, ya que el pH del suelo influye directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y en la actividad biológica del suelo.

Según INTAGRI (2017), los suelos ligeramente ácidos son los más adecuados para el cultivo de papaya. Un pH ligeramente ácido, que se encuentra en el rango de 6,0 a 6,5, promueve una buena disponibilidad de nutrientes esenciales, incluidos el fósforo y el hierro. Además, un pH ligeramente ácido favorece la actividad microbiana beneficiosa en el suelo, mejorando el procesamiento de la materia orgánica y la liberación de nutrientes. Los suelos con pH ligeramente ácido a neutro generalmente se consideran adecuados para una amplia gama de cultivos, ya que facilitan una buena disponibilidad de nutrientes esenciales.

Conclusiones

El análisis de las 147 muestras de suelos evaluadas en el área de estudio revela una clase textural predominante, identificada como "franco arenoso", que representa el 43,54% del total de muestras. Esta predominancia indica que la mayoría de los suelos en la comunidad Kewayllani poseen una textura que combina partículas de tamaño medio (franco) con arena, proporcionando condiciones de drenaje óptimas y una adecuada retención de nutrientes esenciales para el cultivo de papaya. Asimismo, se destacan como clases texturales significativas "franco" con el 25,17% de las muestras y "franco arcilloso" con el 20,41%, mientras que las clases restantes, como "franco arcillo arenoso" y "arcilloso", representan una proporción menor del total de muestras.

En relación con el pH del suelo, se observa que la mayoría de las muestras presentan un pH neutro, manifestándose en valores cercanos a 7,0; 6,9 y 6,8, lo que constituye aproximadamente el 74,15% del total de la muestra. Este predominio sugiere que la mayor parte de los suelos en la comunidad Kewayllani tiende a tener un pH cercano a 7, un nivel considerado neutro y propicio para el cultivo de papaya. Por otro lado, los valores de pH más bajos, como 6,7; 6,6; 6,5 y 6,4, representan un porcentaje menor del total de la muestra y se clasifican como ligeramente ácidos.

La cartografía generada en esta investigación muestra una variación significativa en la textura del suelo y el pH en el área estudiada. La predominancia de suelos con textura franco arenosa sugiere condiciones favorables para el cultivo de papaya, ya que se equilibra adecuadamente el drenaje y la retención de nutrientes. Del mismo modo, la alta proporción de suelos con pH neutro es una característica positiva para el cultivo de papaya, ya que facilita la disponibilidad óptima de nutrientes esenciales, propiciando el crecimiento y desarrollo saludable de la planta.

Referencias bibliográficas

- Agrorural. (2018). *Muestreo de suelos. Programa de Desarrollo Productivo Agrario Rural del Perú*. Digital print service E.I.R.L.
- Cesaratto, S., Espósito, M. A., Caffaro-Filho, R. A. & Abbruscato, P. (2020). Fruit quality of papaya hybrids harvested at different stages of ripening. *Scientia Horticulturae*. 267. 109332. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109332>.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2017). *Guía para la descripción de suelos. tercera edición revisada*. Roma.
- FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). *Propiedades Químicas Del Suelo*. Roma.
- Fox, D. G. (1981). *Judging Air Quality Model Performance*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 62(5). 599–609. doi:10.1175/1520-0477(1981)062<0599
- Ghani, W. A. W. A., Muda, Z. C., Yusoff, M. K., Othman, M. R. & Zakaria, N. A. (2017). Optimum pH range for enhanced oil recovery using biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* USM-AR2. *Journal of Engineering Science and Technology*. 12(5). 1385-1396.
- González, J., Pérez, M., & García, L. (2017). Evaluación de la calidad del suelo. *Revista de Medio Ambiente*. 20(2). 34-42.
- Guaygua, G. E. & Espinoza, D. R. (2008). *Muestreo de suelos e interpretación de resultados de laboratorio*. Santa Cruz, Bolivia: Fundación CETABOL.
- INTA- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2015). *Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el cultivo de papaya*. Recuperado de: <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/1156>.
- INTAGRI - Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. (2017). *Cultivo de papaya: Guía técnica*. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/cultivo-de-papaya-guia-tecnica>.
- Kumar, S., Kumar, A., Kumar, S., & Singh, S. K. (2021). Application of Kriging technique in geostatistical analysis: a review. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 10(2). 444-449.
- Oliver, M. A. (2010). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>.
- Silva, A. F., Quartazani, W. Z., Zimback, C.R.L. Landim P. M. B. (2011). *Aplicação da geoestadística em Ciências Agrárias*. 21. Ed. Botucatu-SP. Brasil: FEPAF.
- Smith, J. & Jones, A. (2015). Caracterización de la textura del suelo. *Revista de Suelos*. 35(2). 40-48.
- Soil App. (2021). *Aplicación del suelo (1.1) [Aplicación móvil] desarrollado por la Universidad Mayor de San Andrés*.
- USDA – United States Department of Agriculture. (2017). *Soil texture. Textural triangle*. Recuperado de: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074869.
- Wang, C., Yu, H., Zhang, X., Fang, Y. & Chen, L. (2019). Environmental pollution and its effects on land use in China: a review. *Environmental monitoring and assessment*. 191(5). 295-310.
- Wang, Z., Li, W., Li, X., Zhou, J., & Gao Y. (2020). Validation of geostatistical models for predicting spatial variability of soil organic matter using topsoil data. *Soil and Tillage Research*. 196. 104461.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63. 1309–1313.
- Yang, J., Guo, Z., Liu, X., & He, Z. (2020). Validating geostatistical models for estimating soil organic carbon in a typical agricultural region. *Geoderma*. 360. 114069. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114069>.