



**Desarrollo de un modelo de estimación geoestadístico para densidad aparente, humedad gravimétrica
y volumétrica de suelos usados para pastoreo.**

Arellano López, María del Mar

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Agropecuaria

Ing. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro. PhD

03 de agosto del 2022



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Desarrollo de un modelo de estimación geoestadístico para la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica de suelos usados para pastoreo”** fue realizado por la señorita **Arellano López, María del Mar**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 29 de julio del 2022



Firmado electrónicamente por:
**PATRICIO
ALEJANDRO PEREZ
GUERRERO**

.....

**Ing. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro. PhD
C.I: 1802941011**



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Arellano López, María del Mar**, con cédula No. 1752733707, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**Desarrollo de un modelo de estimación geostadístico para la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica de suelos usados para pastoreo**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de julio del 2022

Arellano López, María del Mar

C.I: 1752733707



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de Publicación

Yo **Arellano López, María del mar**, con cédula de ciudadanía No. 1752733707 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Desarrollo de un modelo de estimación geoestadístico para la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica de suelos usados para pastoreo”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 29 de julio del 2022

Arellano López, María del Mar

C.I: 1752733707

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos

ARELLANO TESIS V5 BIBLIOTECA.docx

Scanned on: 2:10 July 29, 2022 UTC

TRABAJO DE ARELLANO LÓPEZ, MARÍA DEL MAR



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	219
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Omitted Words	1962



Firmado electrónicamente por:
PATRICIO
ALEJANDRO PEREZ
GUERRERO

Ing. Patricio Pérez Guerrero PhD.
CI: 1802941011

Dedicatoria

La presente tesis quiero dedicar a mi familia, mi esposo Cristhian y mi hijo Julián, por ser mi fuerza para seguir y no decaer.

A mis padres, Marisol y Gary, por ser mi inspiración de superación y brindarme su apoyo en la formación de mis estudios,

A mis hermanas Wendy, Gaby por creer en mí y ser su ejemplo como hermana mayor.

A mis Abuelitos Víctor López (+), Deisy Narváez, Matilde Ramos y Rodrigo Arellano por su infinito amor y consejos durante mi formación de vida.

A mis tías Maily, Magaly por sus palabras de apoyo y su amor incondicional.

María del Mar Arellano

Agradecimientos

Agradezco a Dios por nunca dejarme sola, y culminar con éxito lo que me propongo

A mis padres y hermanas por ser mi pilar de apoyo durante cada etapa universitaria

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en especial a los docentes de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I, quienes formaron mi conocimiento.

Al Ing. Izar Sinde. Ph. D; quién me ayudó en el procesamiento de datos geoestadísticos para el presente trabajo de Titulación.

A los investigadores de INIAP: Javier Maiguashca, José Luis Rivadeneira, Rafael Parra, Yamil Cartagena, quienes me guiaron en el desarrollo de mi tema de investigación.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Santa Catalina por la acogida de mi proyecto en sus instalaciones y financiamiento del mismo.

A mis amigos IASA's por su apoyo, ayuda, compañerismo y amistad en cada semestre.

A mis amigos del INIAP, quienes me ayudaron en la toma de muestras y procesamiento de datos.

A un gran amigo Fer, por estar en los buenos y malos momentos

María del Mar Arellano

Índice de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Responsabilidad de autoría.....	3
Autorización de Publicación.....	4
Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras.....	15
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I.....	20
Introducción.....	20
Antecedentes	20
Justificación.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos.....	22
Hipótesis	22
Capítulo II.....	23
Revisión de Literatura	23

Definición de Suelo Agrícola	23
Perfil y Horizontes del suelo.....	23
Propiedades Físicas del Suelo	24
Color.....	24
Conductividad Hidráulica	25
Compactación	25
Curva de retención de humedad.....	25
Densidad aparente.....	26
Humedad gravimétrica.....	27
Humedad volumétrica.....	27
Morfológicas del sistema pastoril	27
Geoestadística.....	28
Análisis exploratorio de datos (AED).....	28
Distribución de conjuntos de datos.....	28
Tendencias espaciales	28
Análisis estructural.....	28
Efecto Nugget o pepita:	29
Meseta parcial:.....	30
Sill o meseta:.....	30
Rango:	30
Predicción Espacial.....	31
Ponderación de distancia inversa	31
Kriging.....	32
Kriging ordinario.....	32

Kriging simple.....	32
Kriging de punto.....	32
Kriging de bloque	32
Validación del modelo.....	32
Capítulo III.....	34
Materiales y Métodos	34
Ubicación del lugar de investigación.....	34
Ubicación Política	34
Características edafoclimáticas y taxonómica.....	35
Materiales	36
Vegetal.....	36
Materiales de campo.	36
Equipos	36
Laboratorio	36
Campo	36
Oficina	36
Software.....	37
Métodos.....	37
Manejo específico del experimento.....	37
Delimitación de área de estudio	37
Fertilización.....	38
Pastoreo en franjas	38
Dispersión de heces	38
Evaluación propiedades físicas del suelo	38

Color.....	38
Conductividad Hidráulica	38
Compactación	39
Curva de retención de humedad del suelo.....	39
Densidad aparente	40
Humedad gravimétrica.....	40
Humedad volumétrica.....	41
Morfobiológicas del sistema pastoril	41
Rendimiento.....	41
Análisis Geoestadístico	41
Análisis y visualización del proceso predictivo	42
Cálculo del modelo de predicción	43
Cálculo Ponderación de distancia inversa	43
Cálculo Kriging.....	43
Capítulo IV	44
Resultados y Discusión.....	44
Caracterización del suelo	44
Color (Tabla Munsell).....	44
Conductividad Hidráulica	46
Curva de Retención de Humedad	49
Compactación	53
Rendimiento de Biomasa	54
Geoestadística.....	54
Análisis Exploratorio de datos.....	54

Distribución de conjunto de datos	54
Densidad Aparente	55
Profundidad 0-10 cm.....	55
Profundidad 10-20 cm.....	55
Profundidad 20-30 cm.....	56
Humedad gravimétrica.....	56
Profundidad 0-10 cm.....	56
Profundidad 10-20 cm.....	57
Profundidad 20-30 cm.....	57
Humedad volumétrica.....	58
Profundidad 0-10 cm.....	58
Profundidad 10-20 cm.....	58
Profundidad 20-30 cm.....	59
Análisis estructural.....	59
Densidad Aparente	59
Humedad gravimétrica.....	60
Humedad Volumétrica	61
Predicción espacial.....	61
Densidad Aparente	61
Humedad gravimétrica.....	65
Humedad volumétrica.....	68
Validación del modelo.....	71
Densidad aparente.....	71
Profundidad 0-10 cm.....	71

Profundidad 10-20 cm.....	71
Profundidad 20-30 cm.....	72
Humedad gravimétrica.....	72
Profundidad 0-10 cm.....	72
Profundidad 10-20 cm.....	73
Profundidad 20-30 cm.....	73
Humedad volumétrica.....	73
Profundidad 0-10 cm.....	73
Profundidad 10-20 cm.....	74
Profundidad 20-30 cm.....	74
Capítulo V	75
Conclusiones y Recomendaciones	75
Conclusiones	75
Recomendaciones	77
Bibliografía.....	78

Índice de tablas

Tabla 1 Modelos teóricos del semivariograma.....	30
Tabla 2 Características ecológicas, políticas, geográficas y ambientales de la Unidad de Producción Leche y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha).....	35
Tabla 3 Información edafoclimática y taxonómica del sitio experimental.....	35
Tabla 4 Determinación de color de cada calicata a 3 profundidades mediante la tabla Munsell.....	44
Tabla 5 Descripción de Clase de infiltración con valores de Conductividad hidráulica.....	46
Tabla 6 Descripción de Capacidad de retención con valores de Conductividad hidráulica.....	46
Tabla 7 Caracterización Conductividad Hidráulica.....	47
Tabla 8 Análisis de Curva de retención de humedad.....	50
Tabla 9 Análisis de Compactación en cada calicata.....	53

Índice de figuras

Figura 1 Perfil y horizontes del suelo.....	24
Figura 2 Curva característica Humedad del suelo.....	25
Figura 3 Componentes de un Variograma.....	29
Figura 4 Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación.....	34
Figura 5 Área de estudio con calicatas.....	37
Figura 6 Croquis ensayo en campo con malla rígida de 20 x 20 para determinar los puntos de muestreo para el análisis geoestadístico.....	42
Figura 7 Rango de Curva de Retención de Humedad.....	49
Figura 8 Curva de Retención de Humedad- primera profundidad.....	51
Figura 9 Curva de Retención de Humedad- segunda profundidad.....	52
Figura 10 Curva de Retención de Humedad- segunda profundidad.....	52
Figura 11 Histograma de frecuencias 0-10 cm.....	55
Figura 12 Histograma de frecuencias 10-20 cm.....	55
Figura 13 Histograma de frecuencias 20-30 cm.....	56
Figura 14 Histograma de frecuencias 0-10 cm.....	56
Figura 15 Histograma de frecuencias 10-20 cm.....	57
Figura 16 Histograma de frecuencias 20-30 cm.....	57
Figura 17 Histograma de frecuencias 0-10 cm.....	58
Figura 18 Histograma de frecuencias 10-20 cm.....	58
Figura 19 Histograma de frecuencias 20-30 cm.....	59
Figura 20 Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Densidad aparente.....	60
Figura 21 Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Humedad gravimétrica.....	60
Figura 22 Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Humedad volumétrica.....	61

Figura 23 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para densidad aparente.....	62
Figura 24 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para densidad aparente.....	63
Figura 25 IDW de Densidad aparente 0-10 cm.....	64
Figura 26 Kriging de Densidad aparente 0-10 cm.....	64
Figura 27 IDW de Densidad aparente 10-20 cm.....	64
Figura 28 Kriging de Densidad aparente 10-20 cm.....	64
Figura 29 IDW de Densidad aparente 20-30 cm.....	64
Figura 30 Kriging de Densidad aparente 20-30 cm.....	64
Figura 31 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para humedad gravimétrica.....	65
Figura 32 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para humedad gravimétrica.....	66
Figura 33 IDW de Humedad gravimétrica 0-10 cm.....	67
Figura 34 Kriging de Humedad gravimétrica 0-10 cm.....	67
Figura 35 IDW de Humedad gravimétrica 10-20 cm.....	67
Figura 36 Kriging de Humedad gravimétrica 10-20 cm.....	67
Figura 37 IDW de Humedad gravimétrica 20-30 cm.....	67
Figura 38 Kriging de Humedad gravimétrica 20-30 cm.....	67
Figura 39 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para humedad volumétrica.....	68
Figura 40 Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para humedad volumétrica.....	69

Figura 41 IDW de Humedad volumétrica 0-10 cm	70
Figura 42 Kriging de Humedad volumétrica 0-10 cm	70
Figura 43 IDW de Humedad volumétrica 10-20 cm	70
Figura 44 Kriging de Humedad volumétrica 10-20 cm	70
Figura 45 IDW de Humedad volumétrica 20-30 cm	70
Figura 46 Kriging de Humedad volumétrica 20-30 cm	70
Figura 47 Comparación RMSE de IDW y Kriging de Densidad aparente	72
Figura 48 Comparación RMSE de IDW y Kriging de Humedad gravimétrica	73
Figura 49 Comparación RMSE de IDW y Kriging de Humedad volumétrica	74

Resumen

En la actualidad, el desarrollo de investigaciones en el área Agropecuaria, van encaminados con sistemas automatizados de toma de información con el fin de optimizar recursos y tiempo de procesamiento de datos, como es el uso de los sistemas de información geográficos.

Por tal motivo, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo de estimación geoestadística de las propiedades físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) de suelos agrícolas de la parroquia de Cutuglahua. El estudio se realizó en los predios 26 y 27 del Programa Nacional de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-INIAP, ubicada en el Cantón Mejía-Ecuador.

Para la estimación geoestadística de las propiedades físicas, los puntos de muestreo se determinaron mediante la herramienta Fishnet de QGIS 3.14 a un mallado regular de 20 x 20 m, dando un total de 98 puntos; la zona de los bordes se caracterizada por minifundios, cuyos puntos de muestreo no sufrieron una distribución regular, se asientan en el camino de pavimento, o se encuentran en canales de agua acumulada, etc; por consiguiente, de acuerdo con (Oliver, 2010), fue necesario realizar un análisis estadístico espacial de promedio de puntos de vecino más cercano "Average nearest neighbor"; con dicho procedimiento se descartarán los puntos de muestreo del lote.

En cuanto al suelo se realizó una caracterización previa a la toma de muestras, se utilizó un barreno de núcleos para determinar densidad aparente, y un barreno de mano para humedad gravimétrica y volumétrica. Los interpoladores en estudio fueron analizados utilizando el Error cuadrático medio y análisis gráficos para determinar ponderación de Distancia Inversa (IDW) y Kriging.

Palabras clave: Geoestadística, Interpoladores, Densidad aparente, Humedad gravimétrica, Humedad volumétrica.

Abstract

At present, the development of research in the Agricultural area is being directed with automated systems of information collection in order to optimize resources and data processing time, such as the use of geographic information systems.

For this reason, the present study aims to develop a geostatistical estimation model of the physical properties (apparent density, gravimetric and volumetric humidity) of agricultural soils in the parish of Cutuglahua. The study was carried out at sites 26 and 27 of the National Livestock and Pasture Program of the Santa Catalina Experimental Station of the National Institute of Agricultural Research-INIAP, located in Mejía-Ecuador.

For the geostatistical estimation of physical properties, sampling points were determined using the Fishnet tool from QGIS 3.14 to a regular mesh of 20 x 20 m, giving a total of 98 points; the area of the edges is characterized by smallholder farms, where sampling points were not distributed on a regular basis, are located on the pavement road, or are in channels of accumulated water, etc; therefore, according to (Oliver, 2010), it was necessary to perform a statistical spatial analysis of mean points of nearest neighbor "Average nearest neighbor"; with such a procedure the sampling points of the lot will be discarded.

As for the soil, a pre-sampling characterization was performed, a core drill was used to determine apparent density, and a hand drill for gravimetric and volumetric humidity. For the analysis of the interpolators under study, mean quadratic error and graphical analysis were used to determine Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging.

Keywords: Geostatistics, Interpolators, Bulk density, Gravimetric humidity, Volumetric humidity.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

En el territorio Ecuatoriano, el sector agropecuario constituye uno de los principales motores rentables de la economía, el cual depende del suelo como recurso indispensable de producción (León, Bonifáz, & Gutiérrez, 2008), este medio, presenta sistemas con ambientes deficientes de nutrientes, malas prácticas de laboreo, compactación por el uso de maquinaria pesada, acidificación del suelo por la intensiva industrialización y la quema de combustibles fósiles, y deterioro de la estructura y microfauna por el uso incontrolado de plaguicidas y fertilizantes (Clavijo, 2015).

De acuerdo a la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria en Ecuador, la superficie a cargo de productores ecuatorianos en el 2019, fue de 12,3 millones de hectáreas, de las cuales 7,2 millones están sin uso agropecuario (ESPAC, 2019); lo restante, con mayor superficie de uso de suelo está ocupado por 6'040.896 Ha de montes y bosques; 1'985.494 de Ha de pastos cultivados, y 1'439.504 Ha con cultivos permanentes.

Los suelos de la región ecuatoriana, presentan gran diversidad, sin embargo, se enfatiza a aquellos de producción; es así que un suelo apto para condiciones agrícolas tendrá una densidad aparente entre: 1.14 - 1.39 g/cm³; 16.2% para humedad gravimétrica, variando entre estimaciones del 33 % en capacidad de campo y 13 % en punto de marchitez permanente (Chávez, Sandoval, Cohen, & Echavarría, 2018).

Debido a que las propiedades físicas del suelo no son estáticas ni uniformes en el espacio y en el tiempo, se requiere de un elevado número de muestras para su estudio; por lo general, este análisis de suelo se realiza mediante técnicas de laboratorio complejas, tardías y que requieren de una alta inversión económica (Plant, 2001).

En la actualidad, las técnicas de laboratorio y toma de datos en campo se han ido innovando con el uso de nuevas tecnologías como la geoestadística (Camacho, 2013), que permite generar modelos espaciales de distribución en forma de superficies continuas, tal como (IDW) Ponderación de distancia inversa y Kriging, que permiten predecir valores que tendrá una variable analizada en toda la superficie, con el uso de interpoladores se podrá analizar distribuciones y variaciones en el espacio de forma temporal dentro del área en estudio, permitiendo evaluar su comportamiento en un punto en específico (Estévez, 2020).

Justificación

Las actividades de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca aportan al PIB nacional el 9,63% con \$9.626.014 miles de dólares, es decir, el sector Agropecuario es el cuarto sector económico más importante para el Ecuador (CEDIA, 2020).

Por lo cual, es necesario realizar estudios de la capacidad del suelo para la producción agrícola y pecuaria (Ulloa, Abreu, & Paz, 2001), el análisis químico-físico del suelo facilita el conocimiento de la disponibilidad de nutrientes y su característica previo a la implantación de un determinado cultivo, es decir, el diagnóstico acerca del estado actual permitiendo el aprovechamiento de este recurso de manera sustentable.

La importancia de esta investigación radica en el uso de técnicas espaciales como alternativa para la determinación de características físicas en suelos agrícolas. El uso de la geoestadística en estudios de suelo, permite una optimización de procesos y recursos, debido a su versatilidad al usar información de interpolación espacial de variables, en base a capas de puntos con valores conocidos y obteniendo como resultado superficies continuas en formato ráster, permitiendo así, correlacionarlo con la mayoría de las composiciones de la cobertura terrestre (Oliver, 2010).

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo de estimación geoestadístico para la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica de suelos usados para pastoreo en la Estación Santa –Catalina INIAP.

Objetivos Específicos

Caracterizar los suelos de la zona de investigación, mediante la toma de muestras en campo y análisis de las propiedades físicas: color, conductividad hidráulica, curva de retención de humedad, compactación y rendimiento de biomasa.

Generar un modelo geoestadístico para la estimación de las propiedades físicas: densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica, utilizando Interpolador (IDW) y Kriging.

Validar el mejor modelo de estimación de las propiedades físicas de suelos

Hipótesis

H₀: Las propiedades físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) de suelos no se pueden estimar con modelamientos geoestadísticos.

H₁: Las propiedades físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) de suelos se pueden estimar con modelamientos geoestadísticos.

Capítulo II

Revisión de Literatura

Definición de Suelo Agrícola

El suelo (del latín solum = piso) es un cuerpo natural complejo, formado en roca sólida o en sedimentos no consolidados bajo la influencia de plantas, microorganismos y animales; constituye una fina capa exterior de la corteza terrestre explorada por las raíces de las plantas (García & Navarro, 2013).

Las características y propiedades de los suelos se desarrollan por la continua interacción de cinco factores principales: el clima, los organismos vivos, el relieve, el tiempo y la roca madre o material parental (Casanova, 2005).

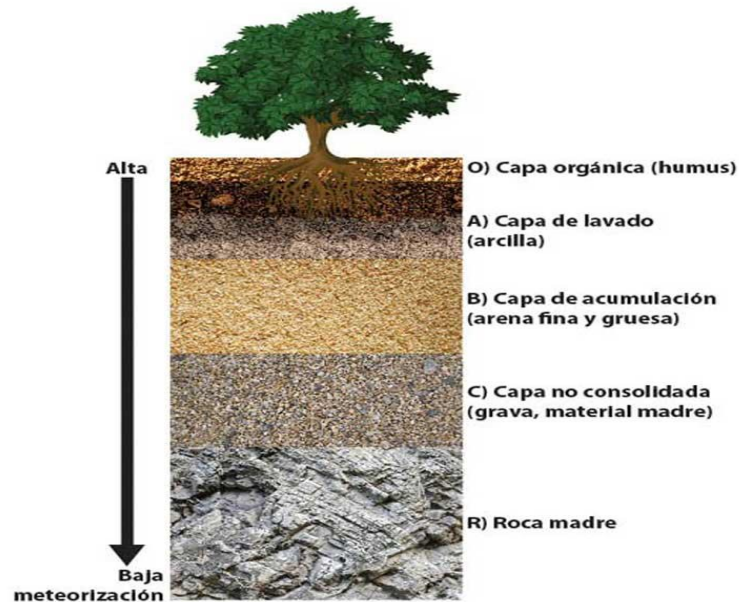
Perfil y Horizontes del suelo

Un suelo idóneo contiene: minerales (45%) derivados de la roca (arenas, limos y arcillas), aire (25%), agua (25%) y materia orgánica (5%) que resulta de la descomposición de restos vegetales, animales y microbianos (ERGO-SUM, 2018).

Se define como horizontes a la formación y progresión del suelo bajo el influjo de factores y procesos pedogenéticos que conducen a la desigualdad de capas o estratos continuos de textura, estructura, color y otras propiedades (Fadda, Fernández, & Cordbella, 2017). El conjunto de horizontes constituye lo que se denomina el perfil del suelo. Para representar a los horizontes principales del suelo, se utilizan letras mayúsculas: O, L, A, E, B, C, R y W.

Figura 1

Perfil y horizontes del suelo



Nota. El gráfico representa una serie de estratos horizontales que se desarrollan en el interior del suelo. Tomado de Biología de Suelos, por (Álvarez, 2015).

Propiedades Físicas del Suelo

Es necesario conocer los aspectos físicos del suelo, con el fin de comprender la importancia de mantener las mejores condiciones del mismo, ya que permiten determinar la rigidez, la fuerza de sostenimiento, capacidad de drenaje y retención de agua y nutrientes, y la capacidad de muchos usos sujetos al hombre (Rucks, García, Kaplán, León, & Hill, 2004).

Color

El color está influido por el contenido de materia orgánica, el material parental, el clima, el drenaje y la aireación; es un indicador de la capacidad productiva de los suelos. Para determinar el color de un suelo, se lo realiza bajo dos condiciones: seco y húmedo, a través de las tablas Munsell, las

mismas que presentan series de colores representados por tres elementos básicos, que son: el tono, el brillo y la intensidad (Cárdenas, 2020).

Conductividad Hidráulica

Se refiere a la cantidad de agua que se desplaza a través del suelo, en un momento determinado, lo que permite estimar la velocidad a la que pasa el fluido por un medio poroso (Sánchez, 2019).

Compactación

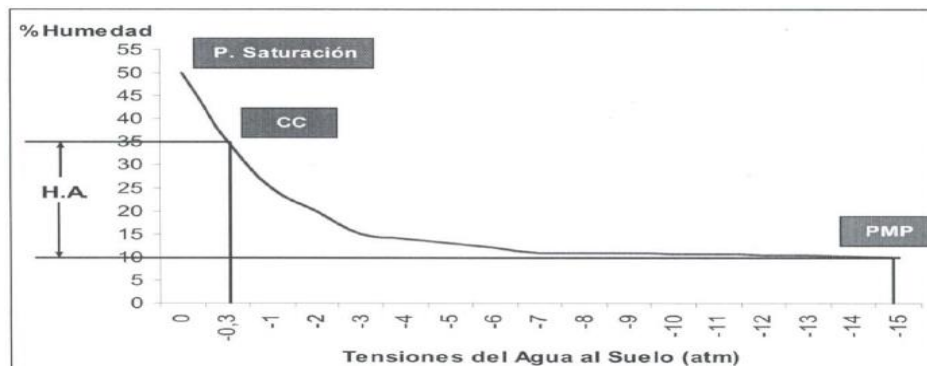
La compactación se define como el incremento en densidad y disminución de macro-porosidad en el suelo que impide la penetración de las raíces, el agua y el intercambio gaseoso; según la (FAO, 2016), un suelo compactado puede reducir el rendimiento agrícola hasta un 60%.

Curva de retención de humedad

Esta propiedad se puede utilizar para determinar indicadores de la humedad del suelo y para estimar parámetros de relación suelo-agua-planta tales como capacidad de campo un punto de marchitez permanente, clasificar y detectar cambios en la estructura del suelo (Martínez, 1995).

Figura 2

Curva característica Humedad del suelo



Nota. El gráfico representa la curva de retención de humedad del suelo. Tomado de Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico, por (Vargas, 2015).

Densidad aparente

Es la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso, lo que se diferencia de la densidad real, la cual excluye los espacios porosos. Esta propiedad permite determinar la facilidad de penetración de las raíces en el suelo, predecir el movimiento del agua, convertir los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica y, calcular la lámina de agua en el suelo (Flores & Alcalá, 2010).

La Densidad aparente de los suelos no cultivados varía generalmente entre 1.0 y 1.6; la variación es debida en su mayor parte a las diferencias en el volumen total de poros. Como regla general tendremos que a una textura más fina le corresponde un volumen de poros más grande, por la misma generalización, a estructura más fina, menor densidad aparente (López, 2005). Un mismo suelo puede tener distintas densidades aparentes según los cambios que en el mismo se produzcan en volumen de poros; así como los suelos arcillosos tienen densidades que varía entre 1.0 y 1.3; los francos, francos-arenosos y arenosos tienen de 1.2 a 1.6; un franco-limoso característico tendrá un valor de 1.32 y suelos orgánicos o suelos volcánicos tienen densidades menores a 1.0 g/cm³ (López, 2005).

La densidad aparente se utiliza para evaluar la calidad del suelo como indicador de la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de penetración para regular la circulación de agua y aire en el suelo, procesos de formación de plantas (emergencia, enraizamiento) y manejo del suelo. Por lo tanto, esta propiedad afecta el crecimiento de las plantas por el efecto de la resistencia y porosidad del suelo sobre las raíces; el incremento de la densidad aparente tiende a aumentar la resistencia mecánica y disminuir la porosidad del suelo, limitando con estos cambios el crecimiento de las raíces a valores críticos (Rubio, 2010).

Humedad gravimétrica

Es la relación entre la masa de la fracción líquida (agua o solución) y la masa de la fracción sólida; por ejemplo, un suelo con 20 % de humedad tiene 20 g de agua en 100 g de suelo seco (Duque & Escobar, 2016).

El contenido de humedad del suelo es muy variable y dinámica, se mueve constantemente de un lugar a otro en respuesta a las fuerzas de movimiento de agua creadas por la percolación, evaporación, irrigación, lluvia, temperatura y el uso de las plantas (FAGRO, 2017). Desde el punto de vista agrícola, es muy importante conocer el contenido de humedad del suelo, ya que esta característica se relaciona directa o indirectamente con todas las funciones que el suelo desempeña en beneficio de las plantas (López, 2005).

Humedad volumétrica

Es la relación entre el volumen de la fracción líquida (agua o solución) y el volumen de la muestra; por ejemplo, un suelo con una humedad volumétrica de 0,24 contiene 0,24 cm³ de agua en un cm³ de suelo (Duque & Escobar, 2016).

Se dice que el contenido volumétrico de humedad del suelo es, en promedio, alrededor del 25% del volumen del suelo, pero su rango de variación es desde menos de 5% hasta más de 45% (López, 2005).

Conocer el nivel de agua contenido en una capa de suelo es muy útil para calcular la tasa de riego que debe aplicarse al suelo para llevarlo a capacidad de campo (FAGRO, 2017).

Morfobiológicas del sistema pastoril

Los sistemas de producción ganadera, por lo general tienen como fuente de alimentación principal los pastos; que, en su mayoría, no son capaces de suplir las necesidades básicas de los animales, influyendo esto en el rendimiento de los mismos. Esto se debe por el mal manejo del forraje, desconocimiento del cuidado del mismo y en su gran mayoría un suelo no apto para el cultivo por

presentar incompatibilidad y así no brinda suficiente calidad nutricional y cantidad de producción para obtener mejores resultados (Rodríguez, 2009).

Geoestadística

La Geoestadística es la rama de la Estadística que se centra en predecir la distribución espacial de variables continuas asociadas a fenómenos cuantificables (Oliver, 2010). De acuerdo con (González & Vargas, 2009), todo análisis geoestadístico involucra la aplicación de cuatro etapas:

Análisis exploratorio de datos (AED)

Es la recolección de los datos muestrales sin tener en consideración su distribución geográfica, se calcula los estadísticos tales como medidas de dispersión, posición y forma y se procede a la interpretación de resultados (González & Vargas, 2009).

Dentro de esta etapa, se evalúa:

Distribución de conjuntos de datos

En donde se visualiza la distribución de frecuencia para el conjunto de datos con sus estadísticos descriptivos básicos hasta lograr una distribución normal; bajo el criterio de que la media y la mediana deberían ser similares, la asimetría o sesgo debería ser cercana a cero y la curtosis debería estar cerca de 3 (Redrován, 2018).

Tendencias espaciales

Se utiliza una proyección tridimensional de los datos, en donde los puntos originales son trazados en el plano xy, y son afectados por su altura respectiva (línea de altura z); si este polinomio resultase ser de primer orden (recta), no existiría una tendencia (Redrován, 2018).

Análisis estructural

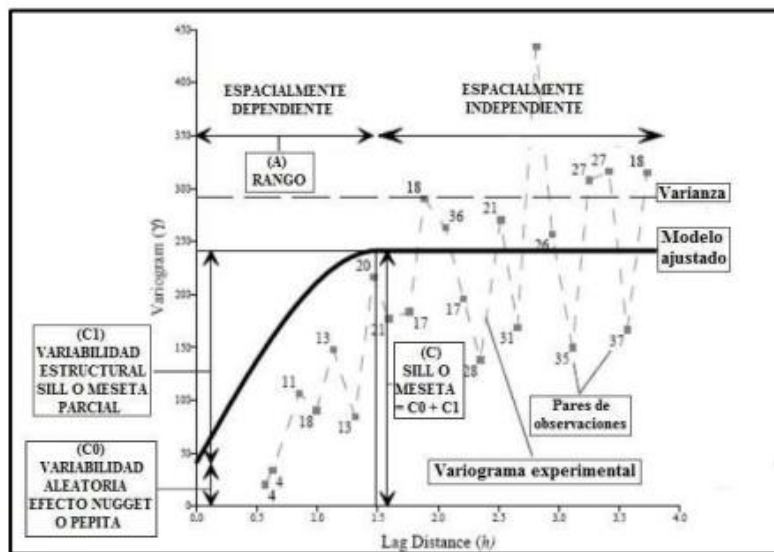
En esta etapa se procede a estudiar la continuidad de la variable mediante el variograma, el mismo que relaciona la dispersión de una variable con la distancia a un punto dado y permite poner en

evidencia las discontinuidades en la distribución espacial del fenómeno objeto de estudio (González & Vargas, 2009).

El semivariograma indica el cambio de una variable con relación a la distancia, este puede variar de forma continua o discontinua dependiendo de algunos parámetros como: meseta o sill, rango o alcance y efecto pepita o nugget.

Figura 3

Componentes de un Variograma



Nota. Representa una herramienta geoestadística. Tomado de Estadística aplicada una visión instrumental, por (González & Vargas, 2009).

De acuerdo a la ilustración 3, los componentes de un Variograma para el desarrollo de un análisis estructural son:

Efecto Nugget o pepita:

Se representa por C0, constituye una discontinuidad puntual en el origen del variograma cuya presencia se puede atribuir a errores de medición de la variable, o la existencia de microvariaciones en la zona de estudio (Jaramillo, 2012).

Meseta parcial:

Representado por C1, corresponde a la diferencia entre la meseta o sill y el Nugget (Jaramillo, 2012).

Sill o meseta:

Representado por C, corresponde a la suma entre el nugget y el sill parcial, es el límite superior del variograma en el que se estabiliza el modelo, un valor de semivarianza que es constante desde una distancia particular espacialmente independiente; cuando el sill no es estable a ninguna distancia, significa que no se puede resolver el problema de la variación espacial de las variables en la zona de muestreo (Jaramillo, 2012).

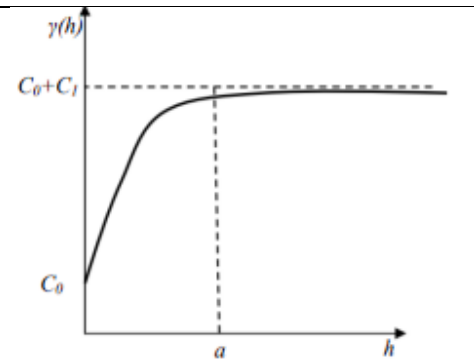
Rango:

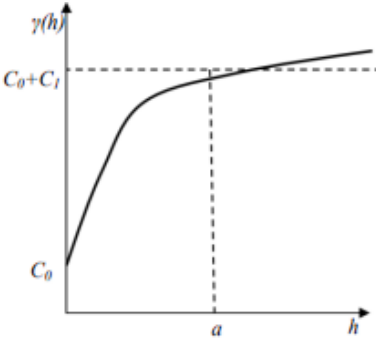
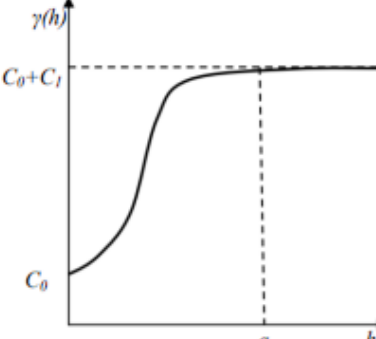
Se representa por A, indica donde se estabiliza el sill del semivariograma, por lo tanto, aquellas muestras tomadas a una distancia menor al rango, se encuentran relacionadas espacialmente, mientras aquellas que sean tomadas a una distancia mayor serán espacialmente independientes (Jaramillo, 2012).

Existen diferentes modelos básicos de semivariograma que pueden explicar diferentes comportamientos exhibidos por las variables bajo investigación. Entre los modelos más utilizados:

Tabla 1

Modelos teóricos del semivariograma

Modelo	Ecuación	Representación Gráfica
Esférico	$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & ; h \leq a \\ C_0 + C_1 & ; h > a \end{cases}$	

Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}}\right)$	
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}\right)$	

Nota. Recuperado de (Luna, 2012)

Predicción Espacial

En esta etapa, la estimación de las variables en estudio se realizó en localizaciones no muestrales o puntos no observados, tomando en cuenta la estructura de la correlación espacial ajustada, el semivariograma teórico, y la información obtenida de los puntos de muestreo, para lo cual, se utiliza los siguientes métodos predictores:

Ponderación de distancia inversa

Este método estima valores desconocidos al especificar distancias de búsqueda, puntos más cercanos, la configuración de la potencia y las barreras. El problema es asignar pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa.

Kriging

Es un método de inferencia espacial lineal no sesgado con una varianza mínima. Los datos que tengan menor distancia presentaran atributos más semejantes en comparación a puntos o bloques que se encuentren más separados (Oliver, 2010).

Los principales tipos de Kriging son:

Kriging ordinario

Este método es el más apropiado para situaciones medioambientales; debido a que asume que las medias locales no están necesariamente relacionadas la media poblacional (Debelis, 2017)

Kriging simple

Asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la media poblacional, la misma que es conocida (Debelis, 2017)

Kriging de punto

Estima los valores de los puntos en los nodos de las cuadrículas (Debelis, 2017)

Kriging de bloque

Este tipo de kriging no resulta ser un buen interpolador, pues no estima el valor de un punto (Debelis, 2017)

Validación del modelo

Para la validación de los métodos de interpolación es posible realizarlo de manera directa en ArcGis, en el cual se utiliza el método de validación cruzada de regresión lineal, el mismo que separa el conjunto de datos disponibles en dos subconjuntos, uno utilizado para el entrenamiento del modelo y otro para realizar el test de validación, con lo que se crea un modelo únicamente con los datos de entrenamiento, se generarán datos de salida que se comparan con el conjunto de datos reservados para realizar la validación (Redrován, 2018).

Un estimador óptimo en términos de error dentro de la metodología de regresión lineal, es el Error Medio Cuadrático (EMC) o RMSE (Root Mean Square Error) por sus siglas en inglés, el cual proporciona la información sobre el rendimiento a corto plazo, comparando la desviación real uno por uno entre los valores estimados y medidos:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

En donde:

P_i = Valores Predichos

O_i = Valores Observados

N = número de muestras (Redrován, 2018).

Capítulo III

Materiales y Métodos

Ubicación del lugar de investigación

Ubicación Política

La investigación se realizó en los lotes 26 y 27 del programa Nacional de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina, cuyas características ecológicas, políticas, geográficas y ambientales se presentan en la Tabla 1.

Estas parcelas fueron establecidas con anterioridad, se destinaron al Departamento de Ganadería con el fin de proporcionar fuente alimenticia al ganado, sin embargo, no disponen de una caracterización inicial.

Figura 4

Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación



Nota. Imagen de autoría. Tomada de Google Earth

Tabla 2

Características ecológicas, políticas, geográficas y ambientales de la Unidad de Producción de Leche y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha).

Ubicación	Descripción
Provincia	Pichincha
Cantón	Mejía
Parroquia	Cutuglagua
Altitud (m.s.n.m.).	3058
Latitud	0° 22' 13" S
Longitud	78° 33' 18" O

Nota. Recuperado y modificado de (IGM, 2018)
(INAMHI, 2019).

Características edafoclimáticas y taxonómica

En la Tabla 3 se detallan las características del sitio experimental.

Tabla 3

Información edafoclimática y taxonómica del sitio experimental.

Parámetros	Datos
Orden	Andisols.
Suborden	Udands.
Gran grupo	Hapludands.
Subgrupo	Vitric Hapludands.
Precipitación anual (mm).	1408
Temperatura media anual (°C).	11.9
Humedad relativa promedio (%).	78

Nota. Recuperado y modificado de (MIDENA, 2013)

Materiales

Vegetal

Los lotes en estudio, se encuentran plantados con el siguiente material vegetal: Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), rye grass perenne (*Lolium perenne*) y trébol blanco (*Trifolium repens*).

Materiales de campo.

- Estacas
- Hoz
- Cajas metálicas para toma de muestras
- Cinta métrica
- Cuadrante metálico de 0.25 m²
- Cámara fotográfica
- Piolas
- Vasos metálicos para estufa
- Libreta de campo
- Fundas plásticas
- Bandeja metálica

Equipos

Laboratorio

Los análisis físicos de suelo y pasto, se realizarán en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de la EESC, el cual dispone de:

- Estufa (LAB LINE)
- Balanza de precisión (Shimadzu, modelo LIBROR AEG – 220)

Campo

- Penetrómetro digital (FieldScout SC-900)
- Barreno de torniquete
- Barreno de núcleo

Oficina

- Computadora

- Impresora
- Hojas de papel bond

Software

- Geostatistical Analysis del software ArcGis

Métodos

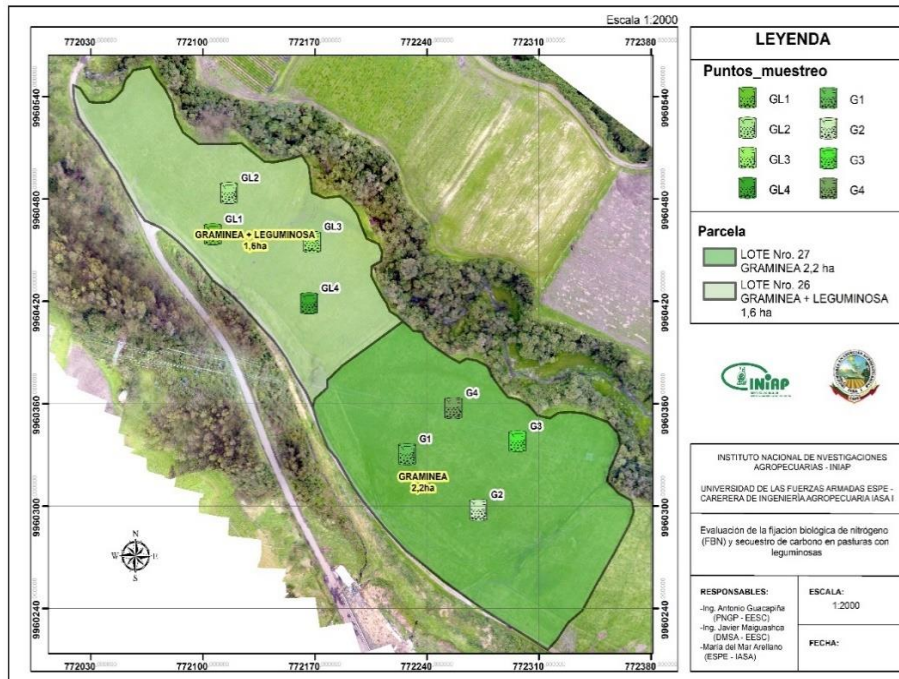
Manejo específico del experimento

Delimitación de área de estudio

Se delimitará 2 parcelas experimentales con las siguientes dimensiones; 30 m de ancho por 40 m de largo siendo cada parcela de 1200 m²; en cada parcela se colocarán 4 calicatas previamente georeferenciadas con un equipo navegador de 3-5 metros de precisión, con el fin de caracterizar el suelo mediante el muestreo de propiedades físicas; el muestreo se realizará a 3 profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm).

Figura 5

Área de estudio con calicatas



Nota. Gráfico de autoría

Fertilización

Se realizarán fertilizaciones de fondo, desarrollo y mantenimiento del experimento de acuerdo a la recomendación que establece el Programa de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP. Las dosis que se aplicarán serán: 80 kg ha⁻¹ de N, 76 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 12 kg ha⁻¹ de CaO, 7 kg ha⁻¹ de MgO y 11 kg. ha⁻¹ de S. Para la siembra se aplicará por hectárea 3 sacos de 18-46-0; para el desarrollo 2 sacos de urea a los 45 días después de la siembra y para el mantenimiento 2 sacos de 15-15-15 cada dos cortes; un saco de sulfato de calcio, un saco de sulfato de magnesio y un saco de bórax cada seis meses.

Pastoreo en franjas

Este método de pastoreo consistirá en delimitar sectores dentro del potrero para ser pastoreados durante un período definido de tiempo (hasta 5 días) dependiendo del manejo y de la categoría de animales (vacas lecheras). Las divisiones entre una franja y otra son móviles y serán realizadas utilizando una cerca eléctrica, herramienta de gran utilidad en el manejo del pastoreo.

Dispersión de heces

La dispersión de heces se realizará después de cada pastoreo, utilizando una rastra de llantas.

Evaluación propiedades físicas del suelo

Color

Se determinará el color de las 4 calicatas a 3 profundidades de cada lote del experimento, se caracterizará mediante las tablas de color Munsell que contiene todos los matices del rango visible del espectro electromagnético, el suelo usa sólo alrededor de una quinta parte del rango total de matices (Román, Gutiérrez, García, & Acevedo, 2012).

Conductividad Hidráulica

Se utilizará el permeámetro para determinar la conductividad hidráulica de las 4 calicatas a 3 profundidades, las 24 muestras se llevarán al laboratorio de análisis de suelos, plantas y aguas para ser

procesadas y saturadas de 24 a 48 horas, se estabilizará el flujo de agua en 2 horas y media, se tomará los datos de infiltración en el vaso recolector cada 10 minutos con 6 mediciones (Montenegro & Malagón, 1990). Para calcular la Conductividad hidráulica se utilizará la siguiente fórmula:

$$k = \frac{V * L}{A * t * \Delta H}$$

Dónde:

- k = Conductividad hidráulica.
- V = Volumen de agua que pasa a través del suelo (cc de las 3 lecturas).
- L = Longitud ocupada por el suelo en el permeámetro (restar espacio vacío).
- A = Área de la sección transversa o diámetro del anillo del permeámetro de recolección de infiltración.
- t = Tiempo de recolección del agua en el permeámetro.
- ΔH = Altura de la carga hidráulica.

Compactación

La compactación se evaluará con el penetrómetro de lectura directa FieldScout SC-900 Digital, en el cual los resultados se expresarán en PSI. El registro se realizará cada 2.54 cm hasta la profundidad de 45 cm; los datos de las mediciones se realizarán a tres profundidades de las 8 calicatas y serán almacenados en el equipo (Johnson & Bailey, 2002).

Curva de retención de humedad del suelo

Para la curva de retención de humedad se tomarán muestras a 3 profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) en cada una de las cuatro calicatas de cada lote, las cuales serán transportadas al Laboratorio de Análisis de suelos, plantas y aguas; se secarán al ambiente, se procesará de acuerdo a la metodología de las ollas de Richards. La (CRH) se determinará mediante el método de la placa y membrana de presión (García J., 2011).

Densidad aparente

Las muestras para determinar la densidad aparente serán de las 4 calicatas de cada tratamiento a 3 profundidades (cada 10 cm), se colocarán en cajas metálicas previamente numeradas para permitir su fácil identificación. Se utilizará para el muestreo barrenos de núcleos con cilindros de 68.19 cc de volumen de acuerdo al Método Uhland. Los resultados se expresarán en g.cc-1 (Blake & Hartge, 1986).

Para densidad aparente (Da), se realizará los cálculos mediante la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{M}{V}$$

Dónde:

Da = Densidad aparente.

M = Masa o peso del suelo seco.

V = Volumen de la muestra (68.19 cc) cilindro metálico.

Humedad gravimétrica

Para determinar la humedad gravimétrica se utilizará las muestras obtenidas para la densidad aparente. Las cajas metálicas se llevarán al Laboratorio de análisis de suelos, plantas para la determinación de su peso en fresco y seco, para lo cual se colocarán las muestras en la estufa a 105°C durante 24 horas. Los resultados se expresarán en % de masa (g agua. g-1 suelo) (UNC, 2017).

$$\%H_g = \frac{(PSH + Pc) - (PSS + Pc)}{(PSS + Pc) - Pc} * 100$$

Dónde:

PSH = Peso suelo Húmedo.

PSS = Peso suelo seco.

Pc = Peso de caja.

Hg = humedad del suelo (a veces se usan: θ , ω , c).

Humedad volumétrica

La humedad volumétrica se calculará con los datos obtenidos de la humedad gravimétrica y densidad aparente (UNC, 2017). Se procederá a estimar el porcentaje de Humedad volumétrica de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%H_v = D_a * H_g$$

Dónde:

Da = Densidad aparente.

Hg = Humedad gravimétrica.

Morfobiológicas del sistema pastoril

Rendimiento

Se evaluará el rendimiento del lote experimental, mediante el empleo de un cuadrante metálico de 0.25 m² (0.50 m x 0.50 m) para registrar el peso promedio de rendimiento y estimarlo en kg de materia verde (MV) ha⁻¹ en cada aprovechamiento, esto se realizará en cada calicata (Reinoso & Ramírez, 2010).

Para evaluar la materia seca se pesará una muestra de 500 g de pasto, la cual se colocará en una funda de papel sellada para evitar la pérdida de humedad. Se procederá a secar en una estufa con aire forzado a 100° C durante 12 horas. Para estimar la materia seca se utilizará la siguiente fórmula:

$$\%Materia\ seca = \frac{Peso\ seco}{Peso\ húmedo} \times 100$$

Análisis Geoestadístico

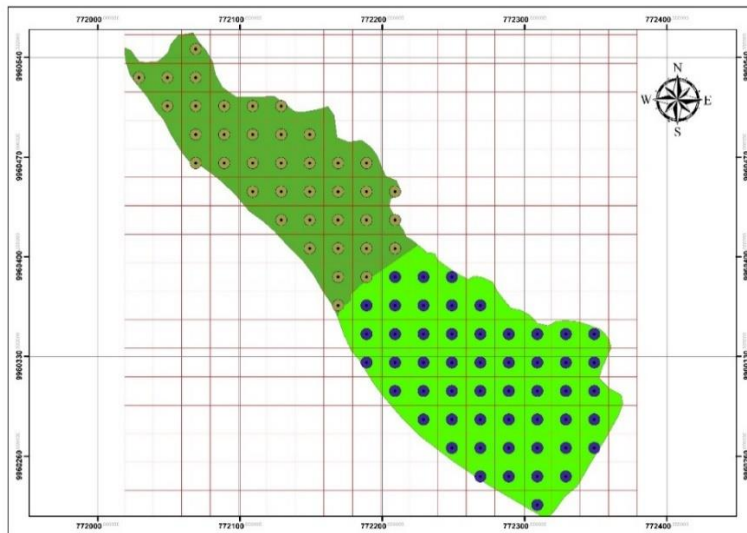
Para la estimación geoestadística de la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica, los puntos se distribuyeron a lo largo de la malla regular de 20 x 20 m a nivel de todo el lote de investigación.

La zona de los bordes del predio en investigación, presentó dificultades para la toma de muestras, por consiguiente, de acuerdo con (Oliver, 2010), fue necesario realizar un análisis estadístico espacial del promedio de los puntos del vecino más cercano “Average nearest neighbor”.

El análisis estadístico para el desarrollo del modelo geostatístico, se empleará la herramienta Fishnet de QGIS 3.14 la cual se aplicara en el mallado señalado anteriormente, para estimar los puntos de muestreo (Oliver, 2010), de acuerdo a nuestro sitio experimental se tomarán 98 puntos de muestreo a 3 profundidades.

Figura 6

Croquis ensayo en campo con malla rígida de 20 x 20 para determinar los puntos de muestreo para el análisis geostatístico



Nota. Gráfico de autoría

Análisis y visualización del proceso predictivo

El modelo de predicción de cada propiedad física (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) se obtendrá por medio de la Interpolador de distancia inversa (IDW) y Kriging en ArcGis, para lo cual se realizará las tres etapas para un correcto modelo de interpolación.

Cálculo del modelo de predicción

Se seleccionará el modelo con los parámetros estadísticos más adecuados para las propiedades físicas en estudio, se diferenciará la magnitud y el signo de los coeficientes de los modelos; si los coeficientes tienen un valor pequeño su contribución al modelo es escasa, y los coeficientes elevados aportan notablemente a la predicción (Camacho, 2013).

La diferencia entre los valores medidos y predichos da como resultado los residuales, estos representan la desviación entre los datos y el ajuste, e intenta explicar la variabilidad de los datos respuesta (Oliver, 2010).

Cálculo Ponderación de distancia inversa

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} * z_i$$

Dónde:

\hat{z}_j = valor estimado para el punto j

n = número de puntos usados en la interpolación

z_i = el valor en el punto i-ésimo

k_{ij} = peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j

Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada uno de los datos y la suma entre ellos es la unidad.

Cálculo Kriging

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i [Z(x_i) - m(x_i)]$$

Dónde:

w_i = pesos asignados a los datos $Z(x_i)$

$Z(x)$ y $Z(x_i)$ = valores esperados de las variables $m(x)$ y $m(x_i)$

n = número de datos

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Caracterización del suelo

En el presente trabajo de titulación, en primer lugar, se caracterizó el suelo en estudio mediante el procesamiento de muestras a tres profundidades (0-10; 10-20; 20-30) cm, para las variables: color, conductividad hidráulica, compactación y curva de retención de humedad. Además, se efectuó un análisis morfológico del sistema pastoril para la evaluación de la composición botánica y rendimiento de biomasa.

Color (Tabla Munsell)

Tabla 4

Determinación de color de cada calicata a 3 profundidades mediante la tabla Munsell

Tratamiento		Húmedo	Seco
#Calicata	Prf (cm)	Código	Código
1	0-10 cm	10YR - 2/1	7.5YR - 5/3
2	0-10 cm	5YR - 3/1	7.5YR - 5/2
3	0-10 cm	10YR - 3/2	10YR - 5/2
4	0-10 cm	10YR - 3/2	10YR - 5/2
5	0-10 cm	10YR - 3/2	10YR - 5/2
6	0-10 cm	7.5YR - 3/1	10YR - 4/1
7	0-10 cm	7.5YR - 3/1	7.5YR - 5/2
8	0-10 cm	7.5YR - 3/2	7.5YR - 5/3
Promedio		10 YR - 3/2	7.5 YR - 5/2
1	20-30 cm	10YR - 2/2	7.5YR - 5/2
2	10-20 cm	10YR - 4/2	10YR - 4/2
3	10-20 cm	5YR - 3/1	10YR - 5/2
4	10-20 cm	10YR - 4/2	10YR - 5/2
5	10-20 cm	7.5YR - 3/2	10YR - 5/3
6	10-20 cm	10YR - 3/2	7.5YR - 3/2
7	10-20 cm	10YR - 3/1	7.5YR - 5/2
8	10-20 cm	10YR - 3/3	7.5YR - 5/2
Promedio		10 YR - 3/2	10 YR - 5/2
1	20-30 cm	10YR - 3/1	7.5YR - 5/2
2	20-30 cm	5YR - 3/1	10YR - 5/2

Tratamiento		Húmedo	Seco
#Calicata	Prf (cm)	Código	Código
3	20-30 cm	5YR - 3/1	7.5YR - 5/2
4	20-30 cm	7.5YR - 3/2	10YR - 5/2
5	20-30 cm	10YR - 3/3	7.5YR - 5/4
6	20-30 cm	7.5YR - 3/1	7.5YR - 5/2
7	20-30 cm	10YR - 3/2	10YR - 4/2
8	20-30 cm	10YR - 3/2	10YR - 5/3
Promedio		10 YR - 3/1	7.5 YR - 5/2

Nota. La tabla representa datos procesados en laboratorio de suelos de caracterización de suelos según su colorimetría. Tabla de autoría

En el sitio experimental, a una profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm, el color en el suelo húmedo presentó un código promedio de 10 YR - 3/2, y en seco 7.5 YR - 5/2, según lo descrito por la tabla Munsell se caracteriza como un suelo color pardo oscuro, de textura franco-arcillosa, característico del orden Andisols; que de acuerdo a lo explicado por (Jiménez, Mezquida, & Rubio, 2008) en una caracterización de color de 0-20 cm en suelos de uso ganadero, se encuentran dentro de los rangos de matiz YR, describiendo como suelos franco, franco-arcilloso; confirmando así, la textura perteneciente a un Andisol.

A una profundidad de 20-30 cm, el color en suelo húmedo presentó un código promedio de 10 YR - 3/1, y en seco 7.5 YR - 5/2, según la caracterización de Munsell el color es gris muy oscuro; siendo el resultado de la acumulación de materia orgánica; que según lo descrito por (Pozo, 2016) el matiz que predomina se encuentra en YR, lo que indica que son colores oscuros, y de acuerdo a la pronunciación de Munsell, los colores negros u oscuros revelan un alto contenido de materia orgánica, lo cual podemos afirmar que es característico de los suelos Andisoles.

Conductividad Hidráulica

Los datos fueron catalogados en clase de infiltración y capacidad de retención de acuerdo a la tabla expuesta en el Laboratorio de Suelos de la institución INIAP, la misma que describe los valores:

Tabla 5

Descripción de Clase de infiltración con valores de Conductividad hidráulica

CLASE DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA cm/hora								
Lenta		cm/hora	Moderada		cm/hora	Rápida		cm/hora
1	Muy lenta	< de 0.12	3	Moderadamente lenta	0.51– 2.0	6	Rápida	12.8 – 25.4
2	Lenta	0.13 – 0.50	4	Moderada	2.1 – 6.3	7	Muy rápida	25.5 >
			5	Moderadamente rápida	6.4 – 12.7			

Nota. Tabla guía para la caracterización de Conductividad Hidráulica. Tabla extraída del Laboratorio de Suelos-INIAP

Tabla 6

Descripción de Capacidad de retención con valores de Conductividad hidráulica

Velocidad	Descripción	Capacidad retención
25.4	Muy rápido	Baja
25,4 - 12,4	Rápida	Poco Satisfactoria
12,4 - 6,3	Moderadamente Rápida	Satisfactoria
6,3 - 2,0	Moderada	Muy adecuada
2,0 - 0,5	Moderadamente Lenta	Adecuada

Nota. Tabla guía para la caracterización de Conductividad Hidráulica.

Tabla extraída del Laboratorio de Suelos-INIAP

La clase de infiltración y la capacidad de retención de agua se analizó con respecto a cada calicata, la misma que se identifica con la letra (C); a tres profundidades (P1=10 cm, P2= 20 cm y P3=30 cm).

Tabla 7*Caracterización Conductividad Hidráulica*

No.	Identificación	Conductividad Hidráulica (k)		
Lab.		cm/h	Clase de infiltración	Capacidad de Retención
1	C1P1	24.6	Rápida	Poco satisfactoria
2	C2P1	15.8	Rápida	Poco satisfactoria
3	C3P1	17.8	Rápida	Poco satisfactoria
4	C4P1	24.5	Rápida	Poco satisfactoria
5	C5P1	27.5	Muy rápida	Baja
6	C6P1	26.4	Muy rápida	Baja
7	C7P1	39.1	Muy rápida	Baja
8	C8P1	31.2	Muy rápida	Baja
Promedio		25.8625	Muy rápida	Baja
9	C1P2	15.1	Rápida	Poco satisfactoria
10	C2P2	10.9	Moderadamente rápida	Satisfactoria
11	C3P2	17.8	Rápida	Poco satisfactoria
12	C4P2	14.4	Rápida	Poco satisfactoria
13	C5P2	26.7	Muy rápida	Baja
14	C6P2	17.6	Rápida	Poco satisfactoria
15	C7P2	27.5	Muy rápida	Baja
16	C8P2	25.4	Rápida	Poco satisfactoria
Promedio		19.425	Rápida	Poco satisfactoria

No.	Identificación	Conductividad Hidráulica (k)	Clase de infiltración	Capacidad de Retención
Lab.		cm/h		
17	C1P3	10.9	Moderadamente rápida	Satisfactoria
18	C2P3	13.4	Rápida	Poco satisfactoria
19	C3P3	13.6	Rápida	Poco satisfactoria
20	C4P3	12.1	Moderadamente rápida	Satisfactoria
21	C5P3	13.6	Rápida	Poco satisfactoria
22	C6P3	23.4	Rápida	Poco satisfactoria
23	C7P3	32.6	Muy rápida	Baja
24	C8P3	21.6	Rápida	Poco satisfactoria
Promedio		17.65	Rápida	Poco satisfactoria

Nota. La tabla representa datos procesados en laboratorio de suelos de Conductividad hidráulica. Tabla de autoría

El valor en promedio a una profundidad de 0-10 cm fue 25.86 cm/h lo que corresponde a una clase de infiltración muy rápida con retención de agua baja, que de acuerdo con el estudio de (Cuesta, 2019); menciona que la capa superficial infiltra más rápido que la escorrentía de las capas subyacentes Subterránea; por tal motivo, en las profundidades 10-20 y 20-30 cm, la clase de infiltración es rápida con retención de agua poco satisfactoria, que de acuerdo al estudio realizado por (Campo, Merchancano, & López, 2020), indica que un suelo de clase Andisol tiene valores de alta porosidad total (56 % a 70 %), altos contenidos de humedad, con alta infiltración (29 % a 33 %) y moderada escorrentía (46 %); que de acuerdo a las características mencionadas, describe al suelo en estudio.

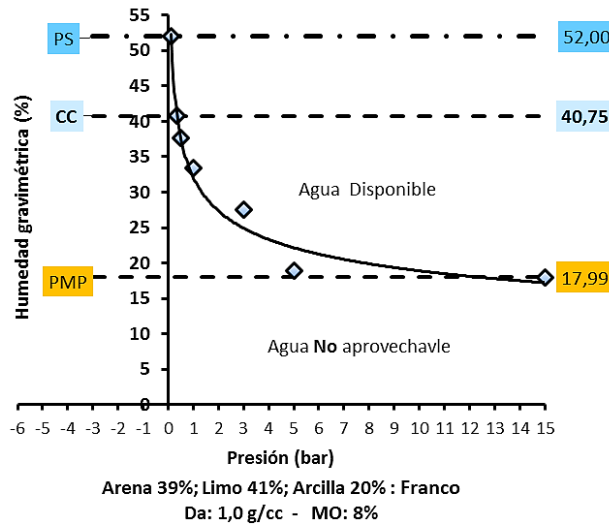
Curva de Retención de Humedad

El agua disponible entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo representa la humedad aprovechable, mientras que el agua no disponible para las plantas es la que se encuentra por debajo del punto de marchitez permanente.

De acuerdo a los gráficos establecidos en el Departamento de Suelos de INIAP, se encuentran acorde a los rangos establecidos:

Figura 7

Rango de Curva de Retención de Humedad



Nota. Gráfico guía para la caracterización de Curva de Retención de Humedad. Gráfico extraído del Laboratorio de Suelos-INIAP

El siguiente gráfico detalla la curva de retención de humedad analizada en cada calicata a 3 profundidades, para interpretar los resultados, se toma en cuenta tres puntos de referencia: Punto de saturación, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez, así como también la representación de la humedad aprovechable y el agua no disponible.

La Capacidad de campo se mide a una presión de 0.33 bares, representando una humedad gravimétrica de 74.30%; el punto de saturación se mide a una presión de 0.50 bares, representando el 47.3% de humedad gravimétrica; y el Punto de marchitez permanente se mide a una presión de 15 bares que representa el 30.70% de humedad gravimétrica.

Tabla 8

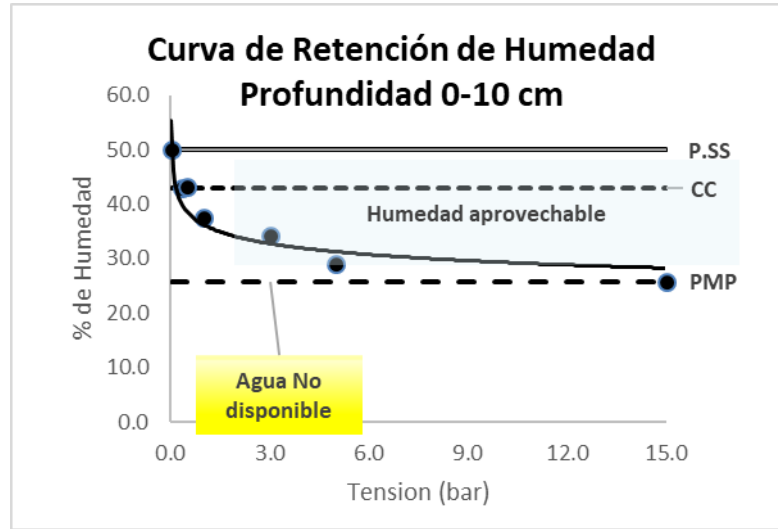
Análisis de Curva de retención de humedad

	C.C					P.M. P
	0.33	0.5	1	3	5	15
C1P1	38.7	35.8	31.3	29.0	24.0	21.5
C2P1	39.0	36.6	31.2	29.2	25.0	23.4
C3P1	43.3	38.1	36.4	27.4	24.5	22.6
C4P1	40.1	37.5	31.8	30.4	23.2	26.2
C5P1	46.9	45.3	40.9	38.7	28.5	23.0
C6P1	43.5	43.2	42.7	41.5	37.7	32.8
C7P1	47.0	55.2	44.3	40.0	38.0	32.0
C8P1	45.0	53.2	42.0	38.0	32.0	25.0
Promedio	42.9	43.1	37.6	34.3	29.1	25.8
C1P2	37.4	33.9	30.0	23.3	22.5	21.7
C2P2	39.4	35.5	32.9	22.9	22.3	21.6
C3P2	41.0	38.2	34.4	25.0	22.0	20.1
C4P2	38.0	36.2	31.5	15.9	21.3	22.5
C5P2	37.8	35.7	34.0	28.0	25.6	23.0
C6P2	49.9	48.2	37.2	35.4	32.6	30.6
C7P2	46.4	44.1	34.4	29.2	26.1	25.7
C8P2	45.0	43.8	34.5	30.4	25.3	30.1
Promedio	41.8	39.4	33.6	26.3	24.7	24.4
C1P3	40.0	35.4	34.4	30.1	26.2	22.5
C2P3	41.5	36.8	33.4	27.7	25.4	20.2
C3P3	45.6	40.3	48.0	37.9	27.1	22.6
C4P3	37.4	35.6	30.3	29.2	26.8	23.3
C5P3	33.9	37.2	31.5	29.4	25.9	24.2
C6P3	47.0	45.2	37.8	30.3	26.5	27.0
C7P3	47.5	40.9	35.8	32.7	29.3	27.4
C8P3	48.0	46.2	37.0	32.1	27.3	30.6
Promedio	42.6	39.7	36.0	31.2	26.8	24.7

A continuación, se presenta el gráfico de distribución de la Curva de Retención de Humedad, los mismos que se encuentran de acuerdo a cada profundidad de estudio:

Figura 8

Curva de Retención de Humedad- primera profundidad



De acuerdo al gráfico proporcionado del Laboratorio de suelos- INIAP en el que establece los rangos de Capacidad de campo (74.30%) y Punto de marchitez permanente (30.70%), se puede observar que la humedad aprovechable en la profundidad de 0-10 cm, se encuentra entre los porcentajes establecidos, con un promedio de 34.3% de humedad; que de acuerdo a (Salcedo, Galvis, & Hernández, 2007) en suelos de uso agrícola, con contenido de materia orgánica en la capa superficial, tuvieron valores similares de HA que oscilan entre 34 - 38%.

Figura 9

Curva de Retención de Humedad- segunda profundidad

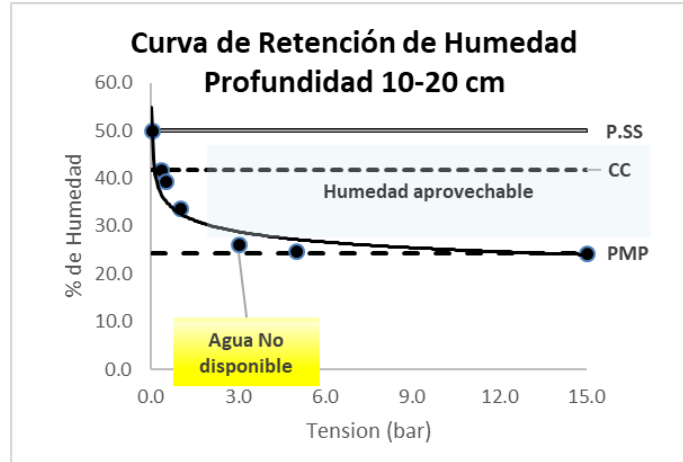
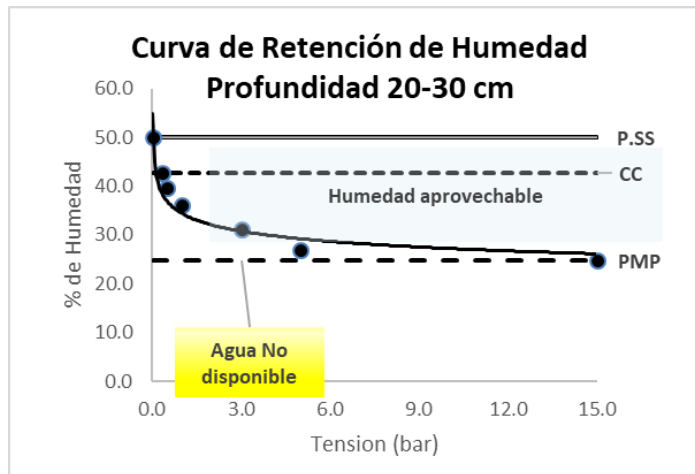


Figura 10

Curva de Retención de Humedad- segunda profundidad



De igual manera, el resultado en promedio de los gráficos de 10-20 y 20-30 cm de profundidad, se encuentran entre los porcentajes establecidos, con 33.6 y 31.2 % de humedad respectivamente; que al comparar los analizados por (Martínez, 1995), describe que la alta variabilidad encontrada a mayor profundidad, estaría asociada al efecto de la disponibilidad hídrica, en los sitios donde el agua es más

Limitante, seguramente a expensas de la disponibilidad de agua y potencial de rendimiento del cultivo siguiente.

Compactación

Se utilizó el penetrómetro para determinar la compactación del suelo, el mismo que toma datos cada 1 in; en conclusión, se obtuvo 18 datos por cada muestreo con respecto a cada calicata.

Tabla 9

Análisis de Compactación en cada calicata

Profundidad Penetrómetro (in)	Calicata 1	Calicata 2	Calicata 3	Calicata 4	Calicata 5	Calicata 6	Calicata 7	Calicata 8	Promedio	Profundidad
	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio		
	3 Rep	3 Rep	3 Rep	3 Rep	3 Rep	3 Rep	3 Rep	3 Rep		
1	17	19	14	35	13	14	10	10	17	0-10 cm
2	33	40	32	55	21	28	22	23	32	
3	50	47	40	72	45	36	28	37	44	
4	62	57	50	85	60	50	33	42	55	
5	78	72	68	88	75	65	49	62	70	10-20 cm
6	91	76	96	90	88	62	63	61	78	
7	106	83	103	92	93	79	74	81	89	
8	121	87	113	105	103	93	85	82	98	
9	123	94	106	105	113	99	93	98	104	20-30 cm
10	122	102	125	105	123	116	100	110	113	
11	130	111	130	113	128	129	103	115	120	
12	136	112	132	124	141	139	115	124	128	
13	137	127	141	117	143	138	127	131	133	
14	142	131	137	124	143	141	137	138	137	
15	149	134	139	130	149	139	137	144	140	
16	153	136	132	124	153	138	141	145	140	
17	151	135	138	149	157	141	143	145	145	
18	148	138	147	159	164	148	143	147	149	

Nota. La tabla representa datos procesados en laboratorio de suelos de compactación. Tabla de autoría

Con respecto a los resultados, y relacionando los datos de humedad en el procesamiento de muestras anteriores, en los que se obtiene un buen drenaje, se determina que a una profundidad de 0-10 cm no existe mayor grado de compactación, sin embargo a una profundidad de 10-20 y 20-30 cm existe valores similares, pero no se muestra niveles de compactación muy altos, presentando rangos que oscilan entre: 70 a 130 lbf/pulg², caracterizando como compactación baja según lo descrito por (Soto, 2014), en el que manifiesta que se define como un grado de compactación mínima para suelos gruesos de 95 lbf/pulg² y para suelos finos de 90 lbf/pulg².

Rendimiento de Biomasa

En cada unidad experimental se tomó 3 submuestras mediante la técnica del cuadrante (0.25 m²); una vez realizado el promedio, se manifiesta el mayor rendimiento de materia fresca y seca de la presente investigación de 43 t. ha⁻¹ y 9.5 t. ha⁻¹ respectivamente; que de acuerdo a lo mencionado en el libro (Instituto Nacional de Innovación y transferencia en Tecnología Agropecuaria, 2006), una hectárea bien manejada puede producir 40 000 kg de forraje verde por corte (cada 60 días); siendo similares los valores a los tomados en la parcela experimental.

Geoestadística

De los 98 puntos de evaluación, para realizar un modelo de interpolación se debe seguir las tres etapas (Análisis exploratorio de datos, Análisis estructural y Predicción espacial) correspondientes para un correcto modelado. Todo el modelamiento se realizó en el programa de ArcGis.

Análisis Exploratorio de datos

Distribución de conjunto de datos

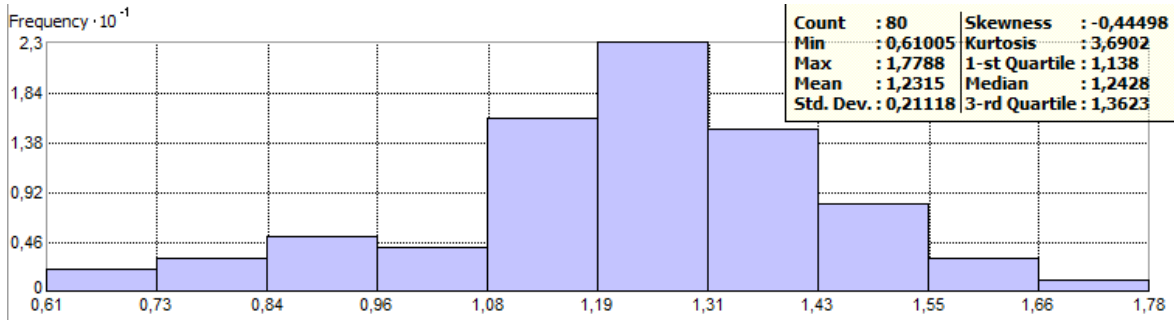
Se realizó una prueba de normalidad, cuyo objetivo fue analizar la distribución de los datos observados, en los cuales en cada histograma de frecuencia nos indica los valores estadísticos como: media, mediana, coeficiente de Skewness y Kurtosis.

Densidad Aparente

Profundidad 0-10 cm

Figura 11

Histograma de frecuencias 0-10 cm

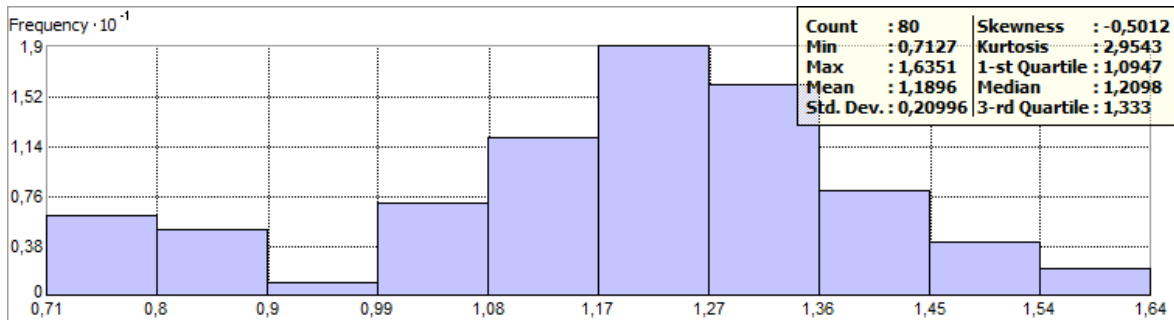


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 1,23 g/cm³, leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Profundidad 10-20 cm

Figura 12

Histograma de frecuencias 10-20 cm

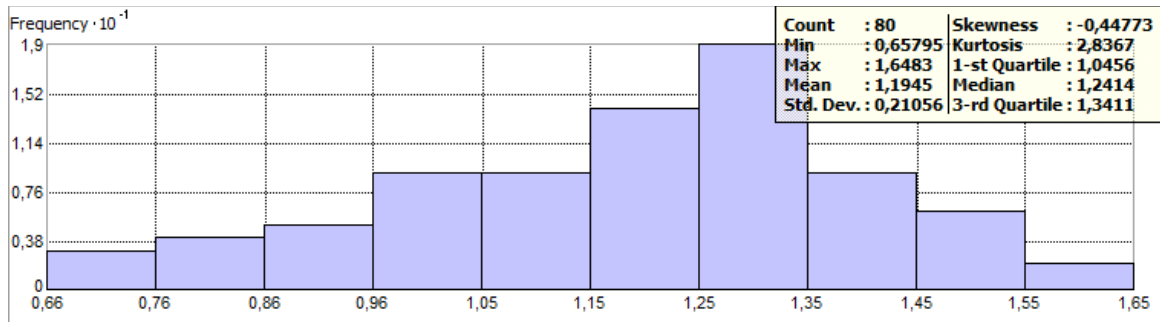


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 1,18 g/cm³, leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Profundidad 20-30 cm

Figura 13

Histograma de frecuencias 20-30 cm



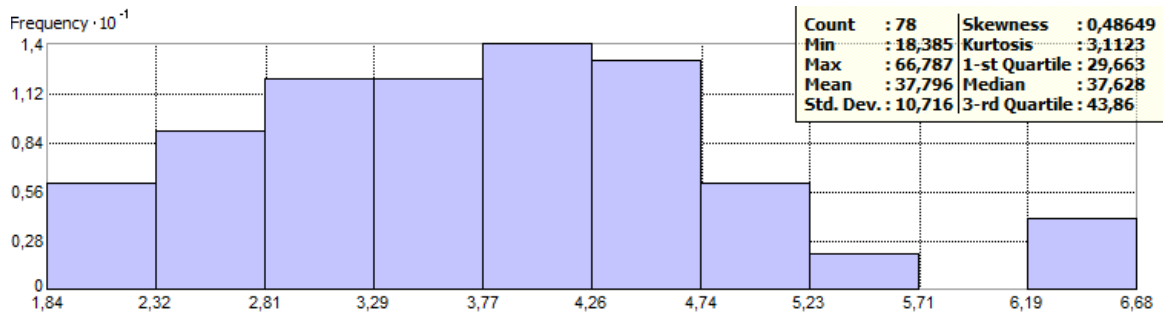
De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 1,19 g/cm³, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Humedad gravimétrica

Profundidad 0-10 cm

Figura 14

Histograma de frecuencias 0-10 cm

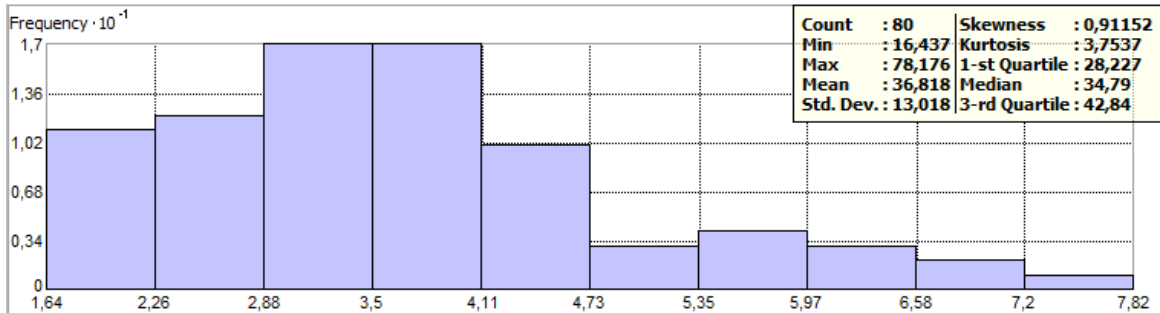


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 37.79 % de humedad, Mesocúrtica y coeficiente de Skewness positivo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la derecha.

Profundidad 10-20 cm

Figura 15

Histograma de frecuencias 10-20 cm

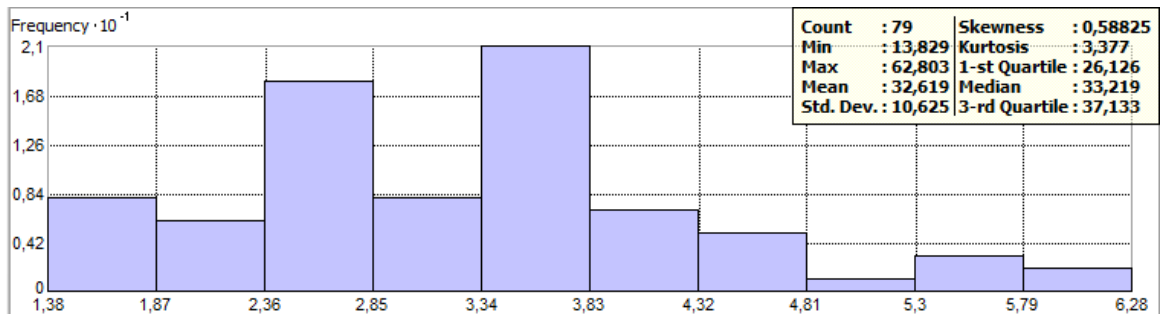


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 36.82 % de humedad, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness positivo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la derecha.

Profundidad 20-30 cm

Figura 16

Histograma de frecuencias 20-30 cm



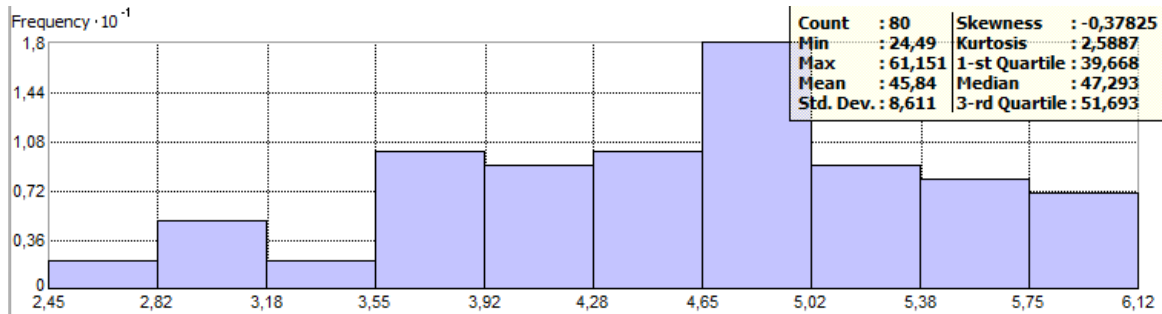
De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 32.62 % de humedad, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness positivo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la derecha.

Humedad volumétrica

Profundidad 0-10 cm

Figura 17

Histograma de frecuencias 0-10 cm

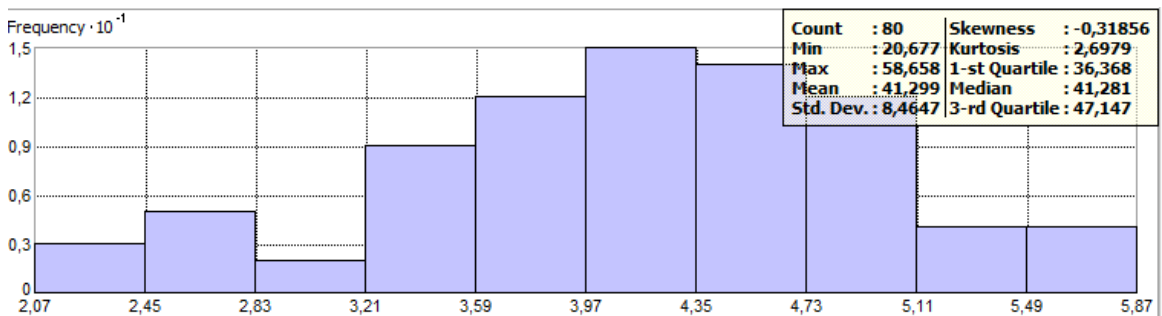


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 45.84 % de humedad, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Profundidad 10-20 cm

Figura 18

Histograma de frecuencias 10-20 cm

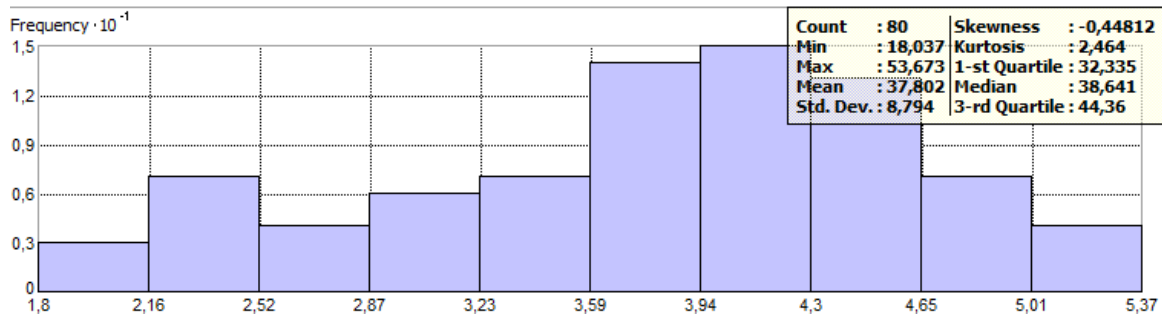


De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 41.30 % de humedad, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Profundidad 20-30 cm

Figura 19

Histograma de frecuencias 20-30 cm



De acuerdo al gráfico, se presenta una distribución normal cuya media es 37.80 % de humedad, Leptocúrtica y coeficiente de Skewness negativo, lo que significa que el grado de simetría que presenta la distribución es hacia la izquierda.

Análisis estructural

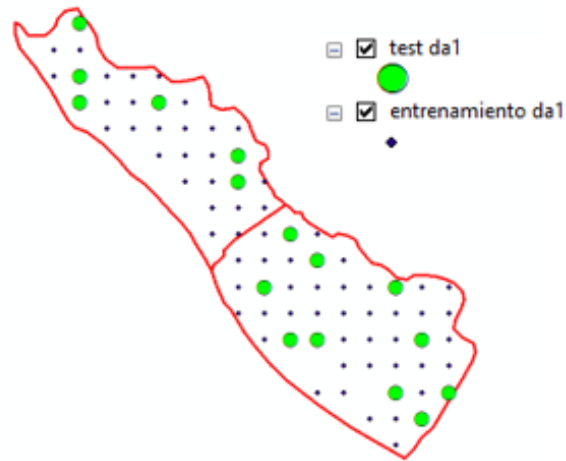
En esta etapa, se procedió a dividir nuestro conjunto de datos (98 puntos) en dos muestras, la primera se denominó “muestra de entrenamiento”, con la cual realizaremos nuestro modelo de interpolación; y la otra muestra denominada “test” por medio de la cual validaremos los resultados del modelo de interpolación.

Densidad Aparente

Para cada profundidad se siguió la misma metodología; mediante la herramienta Subset Features, se tomó un 20 % de muestreo para “test” y el 80 % para “muestra de entrenamiento”; este porcentaje fue determinado según lo descrito por (Oliver, 2010).

Figura 20

Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Densidad aparente

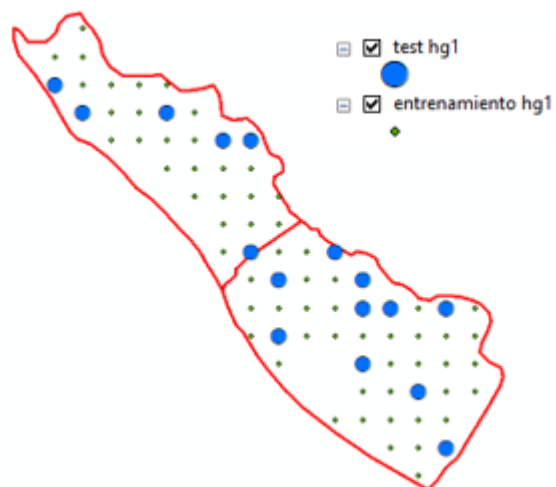


Humedad gravimétrica

Para cada profundidad se siguió la misma metodología; mediante la herramienta Subset Features, se tomó un 20 % de muestreo para “test” y el 80 % para “muestra de entrenamiento”; este porcentaje fue determinado según lo descrito por (Oliver, 2010).

Figura 21

Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Humedad gravimétrica

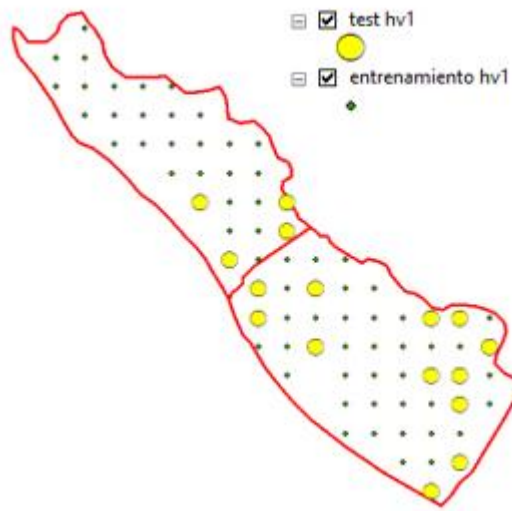


Humedad Volumétrica

Para cada profundidad se siguió la misma metodología; mediante la herramienta Subset Features, se tomó un 20 % de muestreo para “test” y el 80 % para “muestra de entrenamiento”; este porcentaje fue determinado según lo descrito por (Oliver, 2010).

Figura 22

Gráfico de datos Test y Entrenamiento para Humedad volumétrica



Predicción espacial

En esta etapa se generó el modelo de interpolación (kriging e IDW) a través de la muestra de entrenamiento que se ha generado por medio del muestreo aleatorio de datos.

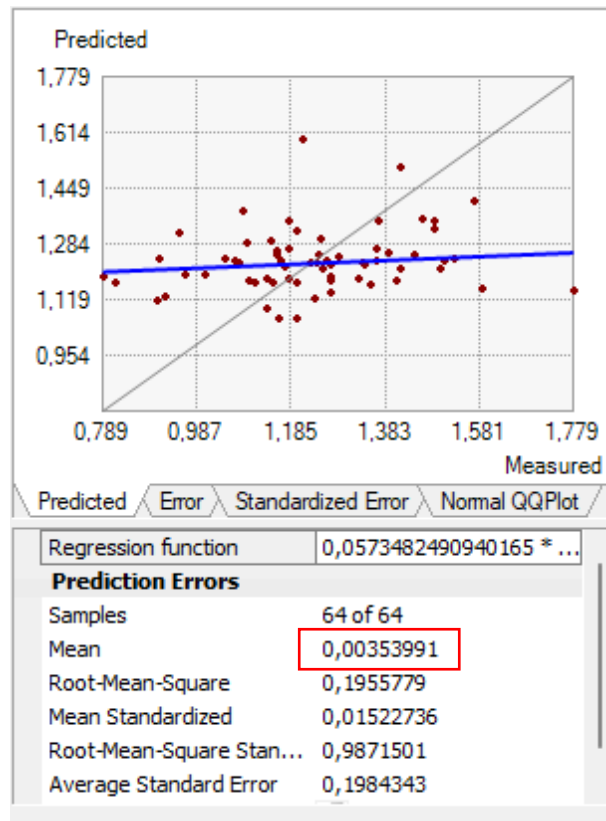
Mediante la Herramienta de Geoestatistical Wizard, elegimos Geoestatistical Methods para Kriging ordinario y Deterministic Methods para Ponderación de distancia Inversa (IDW).

Densidad Aparente

Antes de confirmar el desarrollo del modelamiento geoestadístico, se debe analizar que el error medio tiene que acercarse a cero, para así tener un modelo con datos de mayor confianza.

Figura 23

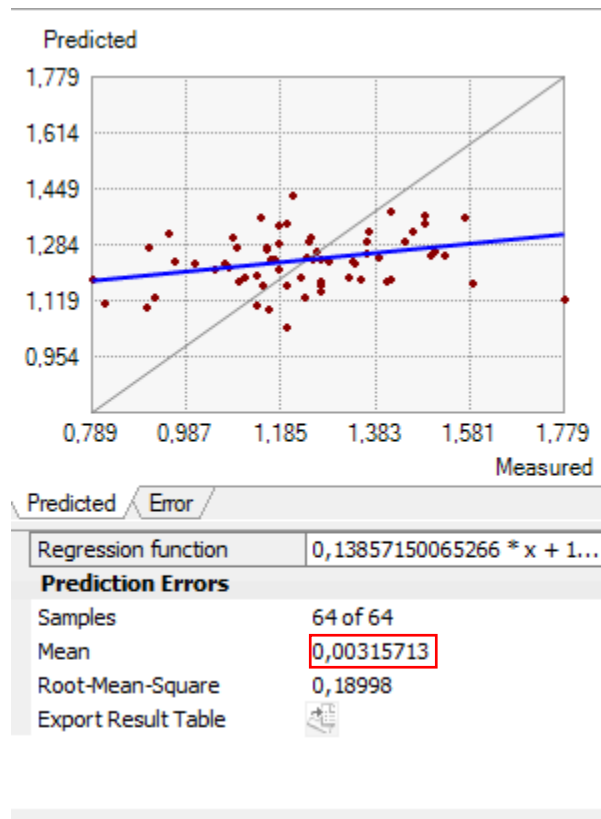
Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para densidad aparente



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico Kriging para densidad aparente, es de 0.0035, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

Figura 24

Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para densidad aparente



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico IDW para densidad aparente, es de 0.0031, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

El rango de matiz de color para densidad aparente va desde el verde (zona con menor densidad); naranja (zona con densidad media) y blanco, morado (zona con mayor densidad).

Los sitios donde se encuentra menor densidad aparente, se deben a zonas porosas, con buen drenaje y buena penetración de raíces; mientras que en zonas con mayor densidad que predomina en los bordes externos del predio, se debe a la compactación, debido a que se encuentra acumulación de piedras. Al realizar los modelamientos para Densidad aparente para cada profundidad en estudio se obtuvo:

Figura 25

IDW de Densidad aparente 0-10 cm

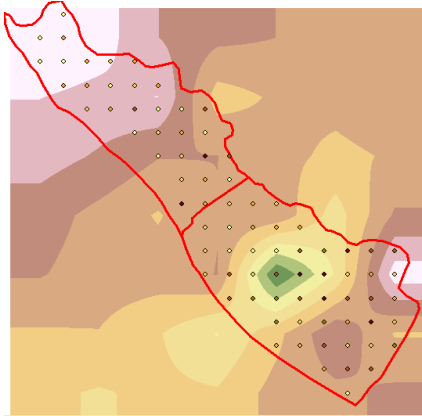


Figura 26

Kriging de Densidad aparente 0-10 cm

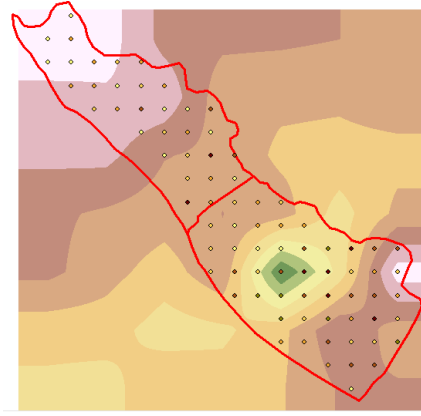


Figura 27

IDW de Densidad aparente 10-20 cm

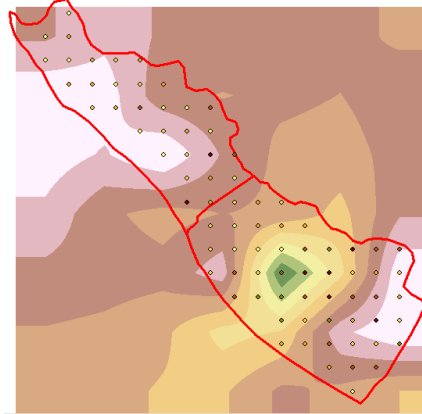


Figura 28

Kriging de Densidad aparente 10-20 cm

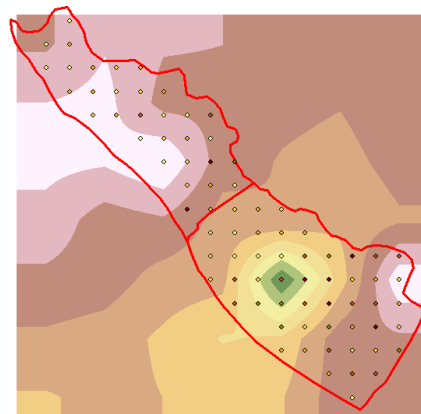


Figura 29

IDW de Densidad aparente 20-30 cm

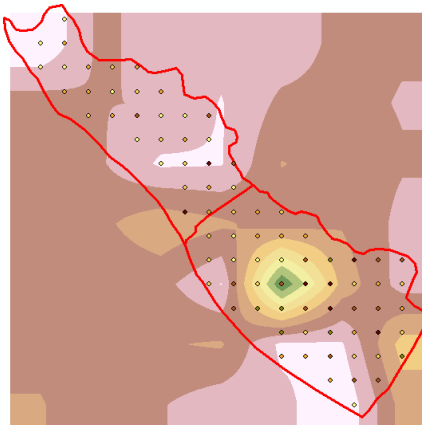
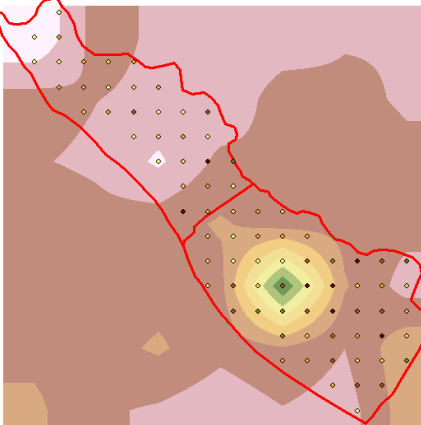


Figura 30

Kriging de Densidad aparente 20-30 cm

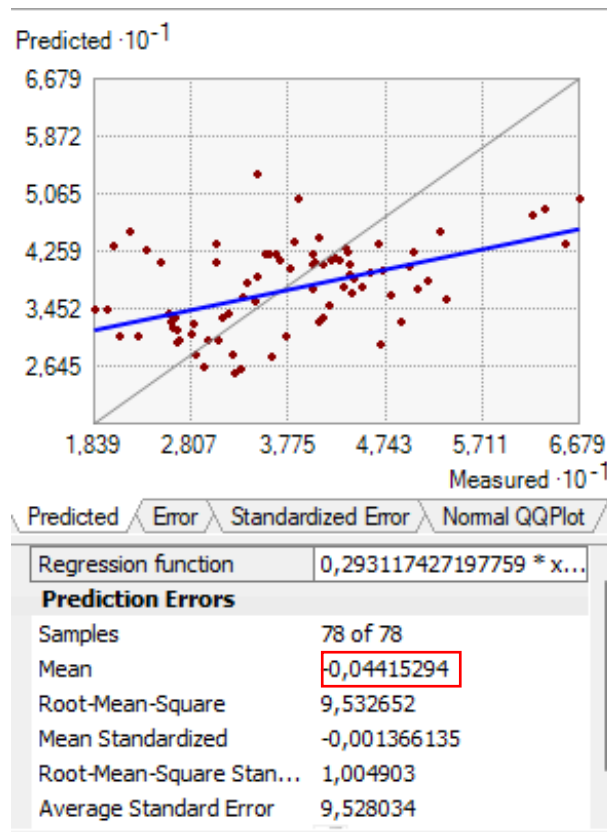


Humedad gravimétrica

Antes de confirmar el desarrollo del modelamiento geoestadístico, se debe analizar que el error medio tiene que acercarse a cero, para así tener un modelo con datos de mayor confianza.

Figura 31

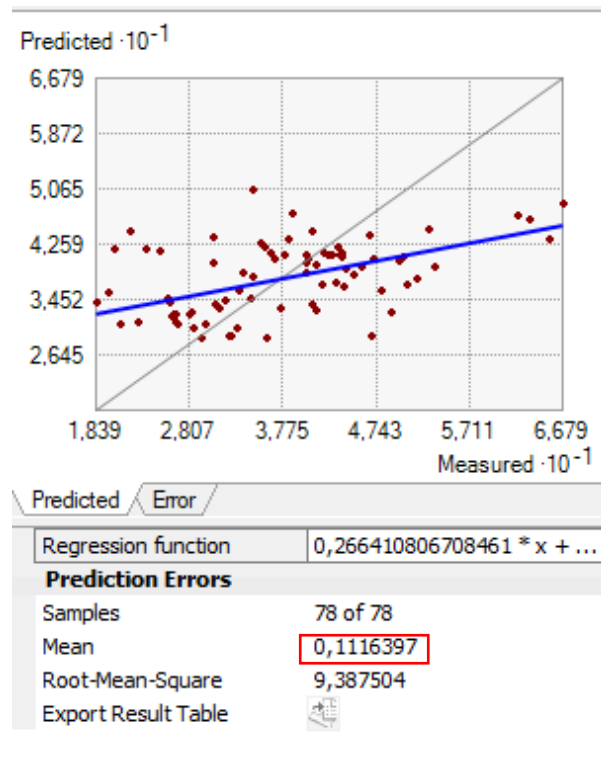
Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para humedad gravimétrica



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico Kriging para humedad gravimétrica, es de -0.044, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

Figura 32

Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para humedad gravimétrica



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico IDW para humedad gravimétrica, es de 0.11, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

El rango de matiz para Humedad gravimétrica va desde celeste claro (zona con menor humedad) y azul (zona con mayor humedad).

Los sitios donde se encuentra menor humedad gravimétrica, se deben a zonas compactadas; mientras que las zonas con mayor humedad son aquellas que se encuentran en la mitad de la zona experimental, debido a que en ese sitio existe un canal que divide a las dos parcelas, provocando la acumulación de agua. Al realizar los modelamientos para Humedad gravimétrica para cada profundidad en estudio se obtuvo:

Figura 33

IDW de Humedad gravimétrica 0-10 cm

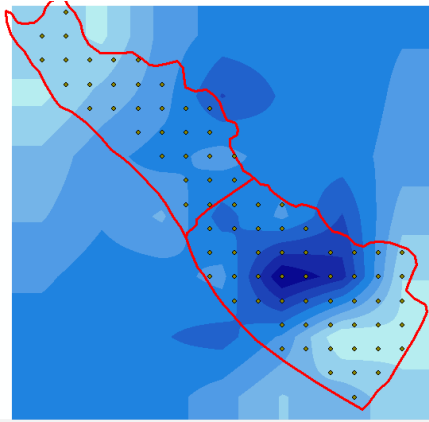


Figura 34

Kriging de Humedad gravimétrica 0-10 cm

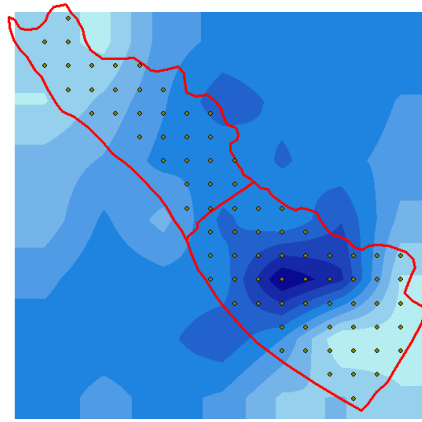


Figura 35

IDW de Humedad gravimétrica 10-20 cm

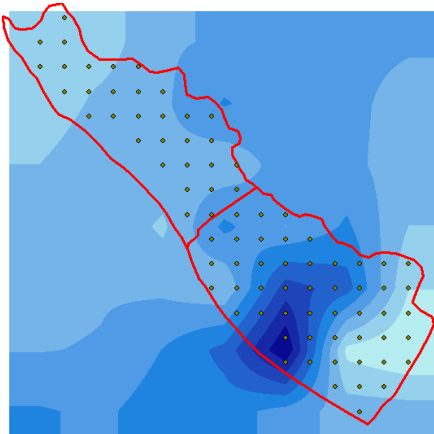


Figura 36

Kriging de Humedad gravimétrica 10-20 cm

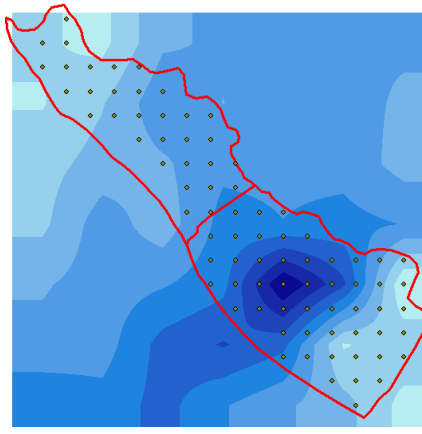


Figura 37

IDW de Humedad gravimétrica 20-30 cm

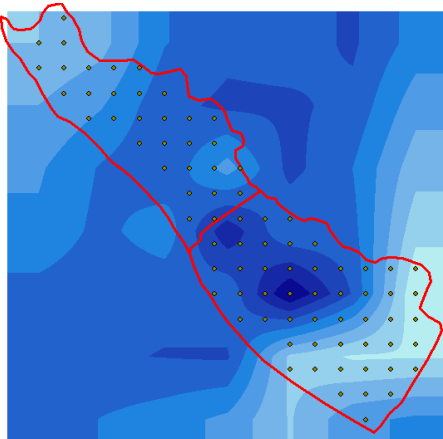
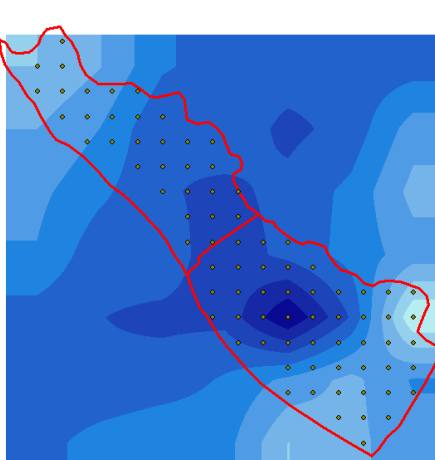


Figura 38

Kriging de Humedad gravimétrica 20-30 cm

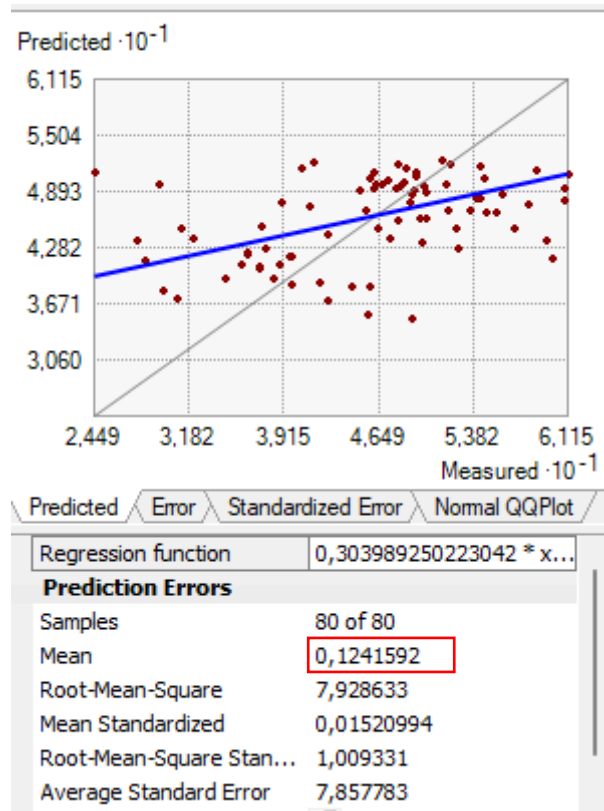


Humedad volumétrica

Antes de confirmar el desarrollo del modelamiento geoestadístico, se debe analizar que el error medio tiene que acercarse a cero, para así tener un modelo con datos de mayor confianza.

Figura 39

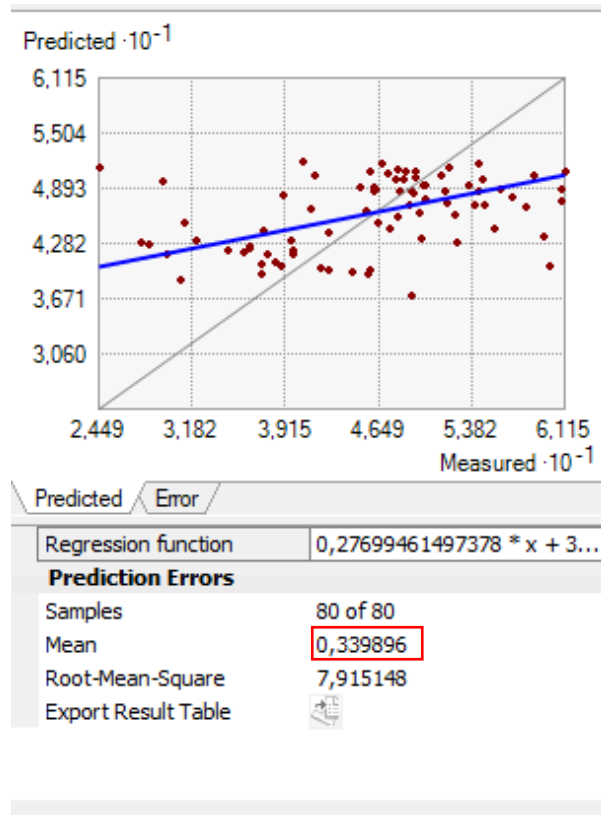
Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico kriging para humedad volumétrica



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico Kriging para humedad volumétrica, es de 0.124, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

Figura 40

Análisis de la media para desarrollo de un modelo geoestadístico IDW para humedad volumétrica



Como se puede observar, la media en el desarrollo del modelamiento geoestadístico IDW para humedad volumétrica, es de 0.33, por lo tanto, se aprueba para continuar con el modelo de interpolación.

El rango de matiz para Humedad volumétrica va desde lila claro (zona con menor humedad) y morado (zona con mayor humedad).

Los índices de humedad volumétrica son similares a los de gravimétrica; presentando las mismas razones a los valores bajos y altos del sitio en estudio. Al realizar los modelamientos para Humedad volumétrica para cada profundidad en estudio se obtuvo:

Figura 41

IDW de Humedad volumétrica 0-10 cm

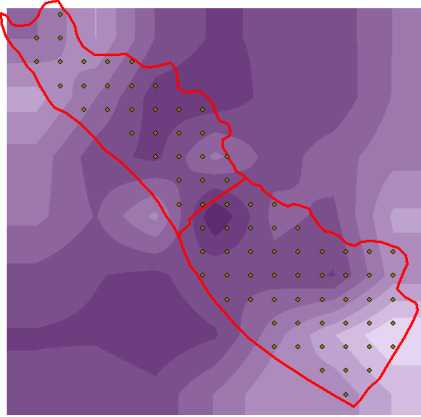


Figura 42

Kriging de Humedad volumétrica 0-10 cm

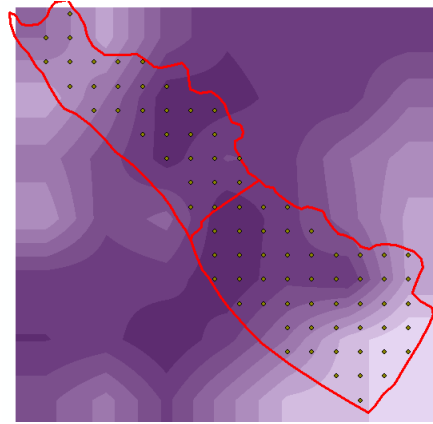


Figura 43

IDW de Humedad volumétrica 10-20 cm

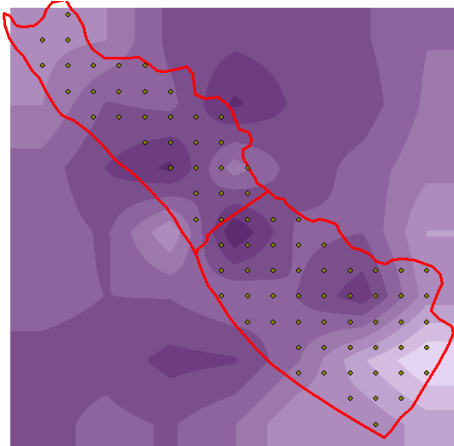


Figura 44

Kriging de Humedad volumétrica 10-20 cm

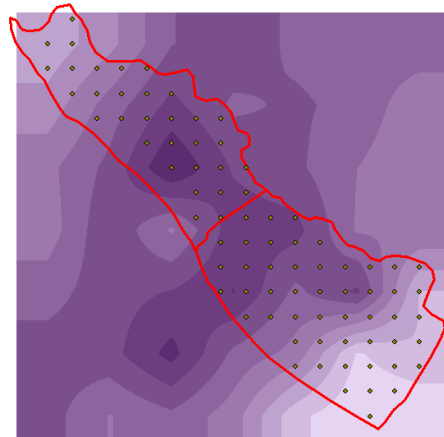


Figura 45

IDW de Humedad volumétrica 20-30 cm

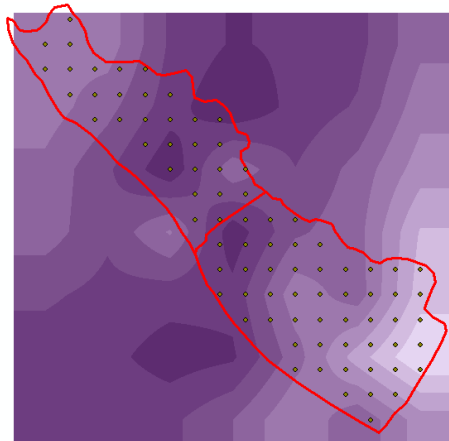
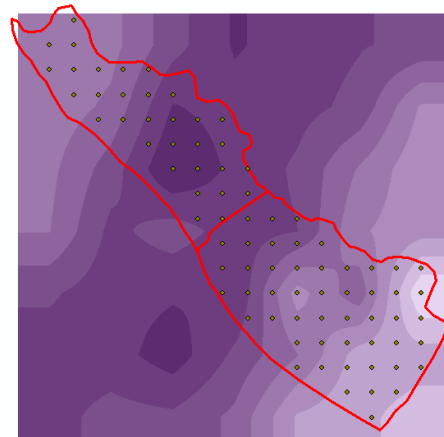


Figura 46

Kriging de Humedad volumétrica 20-30 cm



Validación del modelo

Para validar el modelo, se utilizó la herramienta validation/ prediction; en la cual, mediante la tabla de atributos, nos indica el error de los valores predichos y los observados, se aplicó la fórmula de RMSE (Root Mean Square Error); se determinó el promedio de los valores de muestra para las tres variables y en cada profundidad, y así se obtuvo un valor referencial del modelo.

Figura 47

Caracterización de suelos, según textura

Grupo Textual (Bouyoucos)	g/cm ³				% humedad	
	D _a	D _r	Sat	CC	PMP	CIC meq 100 g ⁻¹ suelo
Franco arenoso	1.35 - 1.44	2.53 - 2.63	27.62 - 33.65	11.49 - 14.72	5.03 - 65.6	4.84 - 7.37
Franco	1.34 - 1.50	2.56 - 2.66	33.27 - 40.89	17.75 - 22.26	7.59 - 10.13	6.98 - 10.82
Franco arcilloso						
Limoso	1.35 - 1.49	2.45 - 2.65	53.09 - 58.88	32.55 - 36.49	13.66 - 16.69	17.20 - 23.15
Franco limoso	1.24 - 1.54	2.49 - 2.58	45.48 - 57.16	27.77 - 34.67	8.97 - 17.68	10.66 - 20.88
Franco arcilloso	1.35 - 1.49	1.74 - 2.78	41.89 - 49.32	22.08 - 27.96	11.69 - 14.88	7.60 - 9.68
Franco arcillo arenoso	1.34 - 1.49	2.58 - 2.66	34.33 - 41.18	17.84 - 21.46	9.05 - 11.84	6.45 - 8.53
Arcillo limoso	1.24 - 1.46	2.49 - 2.59	60.42 - 70.82	36.29 - 42.91	18.61 - 23.85	22.04 - 28.46
Arcilla	1.18 - 1.34	2.54 - 2.64	58.48 - 61.98	29.64 - 39.14	18.72 - 23.68	9.86 - 13.22

El presente gráfico, nos permite caracterizar el suelo en estudio, mediante los valores en promedio en cada profundidad y variable; mediante la validación, se obtiene un estimado del valor de acuerdo a cada modelamiento geoestadístico.

Densidad aparente

Profundidad 0-10 cm

El valor promedio fue de: 1.23 g/ cm³

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 0.2445

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 0.2394

Profundidad 10-20 cm

El valor promedio fue de: 1.17 g/ cm³

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 0.1545

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 0.1247

Profundidad 20-30 cm

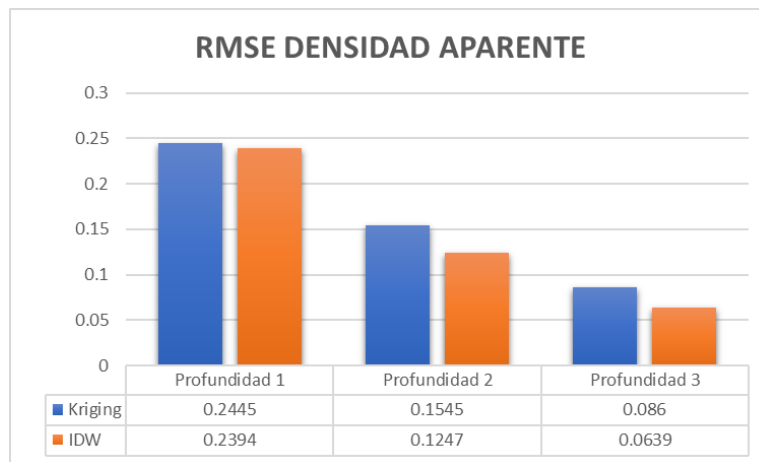
El valor promedio fue de: 1.19 g/ cm^3

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 0.0860

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 0.0639

Figura 48

Comparación RMSE de IDW y Kriging de Densidad aparente



Se comparó los resultados de RMSE de los dos métodos de interpolación al ser validados, obteniendo por Interpolador de Distancia Inversa por el más óptimo, debido a que presenta valores de error más bajos: en la profundidad 1 (0-10 cm) la diferencia es de 0.0051; profundidad 2 (10-20 cm) la diferencia es de 0.0298; y en la profundidad 3 (20-30 cm) la diferencia es de 0.0221.

Humedad gravimétrica

Profundidad 0-10 cm

El valor promedio fue de: 37.79 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 7.1772

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 5.9478

Profundidad 10-20 cm

El valor promedio fue de: 36.81 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 8.1108

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 6.3117

Profundidad 20-30 cm

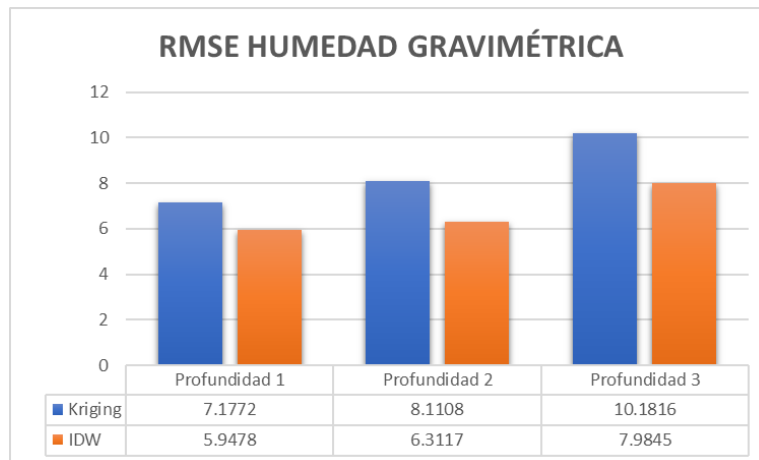
El valor promedio fue de: 32.61 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de $\pm 10,1816$

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 7.9845

Figura 49

Comparación RMSE de IDW y Kriging de Humedad gravimétrica



Se comparó los resultados de RMSE de los dos métodos de interpolación al ser validados, obteniendo por Interpolador de Distancia Inversa por el más óptimo, debido a que presenta valores de error más bajos: en la profundidad 1 (0-10 cm) la diferencia es de 1.2294; profundidad 2 (10-20 cm) la diferencia es de 1.7991; y en la profundidad 3 (20-30 cm) la diferencia es de 2.1971.

Humedad volumétrica

Profundidad 0-10 cm

El valor promedio fue de: 45.84 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 7.8731

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 5.4792

Profundidad 10-20 cm

El valor promedio fue de: 41.29 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 8.8090

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 5.4905

Profundidad 20-30 cm

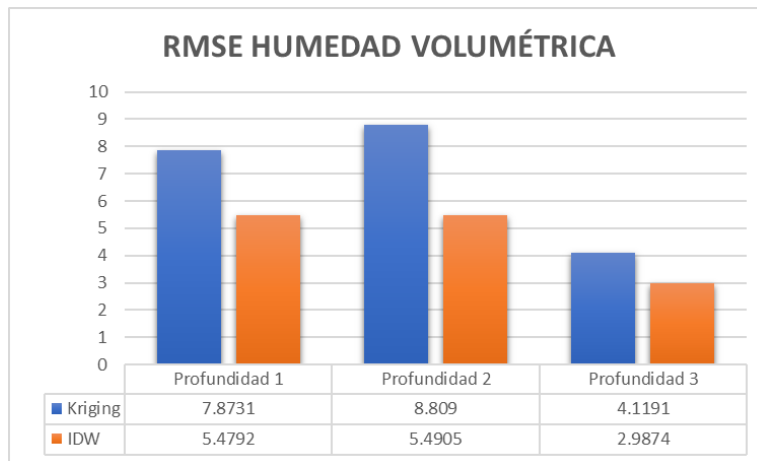
El valor promedio fue de: 37.80 %

Al aplicar la fórmula de RMSE, el resultado para el geoestadístico Kriging fue de ± 4.1191

El resultado para el geoestadístico IDW fue ± 2.9874

Figura 50

Comparación RMSE de IDW y Kriging de Humedad volumétrica



Se comparó los resultados de RMSE de los dos métodos de interpolación al ser validados, obteniendo por Interpolador de Distancia Inversa por el más óptimo, debido a que presenta valores de error más bajos: en la profundidad 1 (0-10 cm) la diferencia es de 2.3939; profundidad 2 (10-20 cm) la diferencia es de 3.3185; y en la profundidad 3 (20-30 cm) la diferencia es de 1.1317.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se caracterizó los suelos de la zona de investigación mediante la toma de muestras en campo y análisis de las propiedades físicas, obteniendo como resultado:
 - ✓ Color: A una profundidad de 0-10 cm y 10-20 cm, se caracteriza como un suelo color pardo oscuro, de textura franco-arcillosa; y a una profundidad de 20-30 cm se caracteriza un suelo de color gris muy oscuro.
 - ✓ Conductividad Hidráulica: El valor en promedio a una profundidad de 0-10 cm fue 25.86 cm/h lo que corresponde a una clase de infiltración muy rápida con retención de agua baja; y a las profundidades 10-20 y 20-30 cm, la clase de infiltración es rápida con retención de agua poco satisfactoria.
 - ✓ Curva de Retención de Humedad: la humedad aprovechable en la profundidad de 0-10 cm, se encuentra entre los porcentajes establecidos, con un promedio de 34.3% de humedad; y a una profundidad de 10-20 y 20-30 cm, se encuentran entre los porcentajes establecidos, con 33.6 y 31.2 % de humedad respectivamente.
 - ✓ Compactación: A una profundidad de 0-10 cm no existe mayor grado de compactación, sin embargo, a una profundidad de 10-20 y 20-30 cm existe valores similares, pero no se muestra niveles de compactación muy altos, presentando rangos que oscilan entre: 70 a 130 lbf/pulg²
 - ✓ Rendimiento de biomasa: Se manifiesta el mayor rendimiento de materia fresca y seca de la presente investigación de 43 t. ha⁻¹ y 9.5 t. ha⁻¹ respectivamente.

- Se realizó los modelos de Interpolación geoestadística Kriging y Ponderación de Distancia Inversa mediante ArcGis, los mismos que fueron analizados por las tres etapas de interpolación para su correcto modelamiento.
- Se validó los modelos mediante el análisis del Error Medio Cuadrático (RMSE) de los dos interpoladores en estudio (IDW y Kriging); se concluye que el mejor modelamiento geoestadístico para el presente estudio para las tres profundidades es el Interpolador de distancia inversa, debido a que presenta valores de error más bajos que Kriging.

Recomendaciones

- Evaluar los Interpoladores Geoestadísticos en diferentes tipos de suelo y con menor número de toma de muestras, para determinar diferencias.
- Realizar la caracterización del suelo de estudio en la misma época en la que se realiza el muestreo para el modelo de predicción, ya que algunos datos difieren con los resultados.
- Incluir otras variables de estudio, con el fin optimizar recursos y probar los métodos de predicción, determinando el más eficiente.

Bibliografía

- Álvarez, D. (2015). Biología de suelos. Obtenido de Información sobre la Biología de los Suelos:
<http://bloglogiadesuelos.blogspot.com/2015/02/macroorganismos-del-suelo>.
- Blake, G., & Hartge, H. (1986). Methods of soil Analysis, Part I. En Physical and mineralogical. Methods: Agronomy Monograph. ASA and SSSA no.9, 363-375.
- Camacho, J. (2013). Uso de la reflectancia difusa - NIR en la determinación de características físicas y químicas de un Oxisol. Tesis de Posgrados. Carimagua-Meta. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, 25-36.
- Campo, M., Merchancano, J. D., & López, J. F. (septiembre de 2020). Physical soil fertility in the sowing system in wachado on Nariño, Colombia. Nariño, Colombia.
- Cárdenas, I. (2020). Propiedades físicas y químicas del Suelo. Obtenido de Universidad Intercultural del estado de México:
<https://ri.utn.edu.mx/bitstream/handle/123456789/48/PROPIEDADES%20FISICAS,%20QUIMICAS%20Y%20BIOLOGICAS%20DEL%20SUELO.pdf.pdf?sequence=1>
- Casanova, E. (2005). Introducción a la ciencia del Suelo. Segunda Edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 453. Obtenido de Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- CEDIA. (2020). Diagnóstico sector agrícola del Ecuador. Obtenido de
<https://blogs.cedia.org.ec/obest/wpcontent/uploads/sites/7/2020/06/Diagn%C3%B3stico-sector-agr%C3%ADcola-Ecuador.pdf>
- Chávez, L., Sandoval, M., Cohen, I., Echavarría, F., Velásquez, M., & Santos, A. (2018).). Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos

- Bouteloua curtipendula. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 9 (4). Obtenido de Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias.
- Clavijo, F. (2015). Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Obtenido de Implementación de tecnologías sostenibles para el incremento de rendimiento de pasturas, pág.: 42-51:
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/12241>
- Cuesta, E. (enero de 2019). ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN, ESCORRENTÍA SUBSUPERFICIAL Y TENDENCIA DIRECCIONAL DEL MOVIMIENTO DEL AGUA ENTRE ESTRATOS DE SUELOS.
- Debelis, S. (2017). La variabilidad espacial en tierras hidrohalmórficas. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Colombia.
- Duque, C., & Escobar, G. (2016). Relaciones gravimétricas y volumétricas del suelo. Obtenido de Gromecánica. pág: 22-47: <http://galeon.com/geomecanica>
- Eras, R. (2020). Estimación de las relaciones espaciales entre la conductividad hidráulica y las propiedades físicas del suelo en el cultivo de banano. Trabajo de titulación de Ciencias Agropecuarias. Machala, Ecuador.
- ERGO-SUM, C. (2018). Revista Científica multidisciplinaria de Prospectiva. Obtenido de vol.25, núm 3:
<https://www.redalyc.org/journal/104/10455646009/html/>.
- ESPAC. (2019). Visualizador de estadísticas y censos. Obtenido de Informe ejecutivo:
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- Estévez, R. (2020). Análisis geoestadístico con R, ArcGis y Qgis. Obtenido de Análisis GIS, Spatial Data Science: <https://www.geomapik.com/spatial-data-science/que-es-la-geoestadistica-r-qgis/>
- Fadda, G., Fernández, J., & Cordero, R. (2017). Guía de estudio Morfología del Suelo. Obtenido de Cátedra de Edafología. Universidad Nacional de Tucumán:
<file:///C:/Users/HP/Downloads/Morfologia%202017.pdf>

- FAGRO. (2017). Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo. Obtenido de Portal Frutícola: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/11/30/metodologia-para-determinar-los-parametros-hidricos-de-un-suelo/>
- FAO. (2016). Compactación del suelo. Obtenido de <http://www.fao.org/3/i6473s/i6473s.pdf>
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos analíticos. Obtenido de Laboratorio de física de suelos. Universidad Nacional autónoma de México:
<https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- García, J. (2011). Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de artemisa y mayabeque. Obtenido de http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3473/3/curvas%20de%20retenci%C3%B3n%20de%20humedad%20y%20su%20estimaci%C3%B3n%20mediante%20pedotransferencia_p.1-61.pdf
- García, Y., & Navarro, W. (2013). Indicadores de la calidad de los suelos. Obtenido de Pastos y forrajes 35 (2): http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001
- González, M., & Vargas, A. P. (2009). Estadística aplicada una visión instrumental. Díaz de santos Ediciones. Madrid, España.
- IGM. (2018). Instituto Geográfico Militar. Obtenido de Estadísticas ecológicas, políticas, geográficas y ambientales de la Estación Experimental Santa Catalina (Pichincha). climatología:
<http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- INAMHI. (2019). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Estación Izobamba. Mejía, Ecuador: Estadística Climatológica. Datos meteorológicos correspondientes al período Enero-diciembre 2019.

Instituto Nacional de Innovación y transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2006). Establecimiento y manejo de forrajes de corte. Sistemas intensivos de producción bovina. San José, Costa Rica.

Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. Obtenido de Revista de la Facultad de ciencias, 1(1), pág: 73-87:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004/50077>

Jiménez, L., Mezquida, E., & Rubio, A. (2008). FERTILIDAD DEL SUELO DE BOSQUES TROPICALES Y PASTIZALES DE USO GANADERO EN ECUADOR. Instituto de Investigación y Manejo Sustentable del Suelo, Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.

Johnson, C., & Bailey, A. (2002). Soil compaction. In Advances in Soil Dynamics. ASAE. Mich, USA. vol. 2, 155-178.

León, R., Bonifáz, N., & Gutiérrez, F. (2008). Pastos y forrajes del Ecuador. Obtenido de Siembra y producción de pasturas: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19019>

López, A. (2005). Manual de edafología. Obtenido de Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla: <http://biblioteca.utsem-morelos.edu.mx/files/asp/topografia/manual%20De%20Edafologia-Jordan.pdf>.

Luna, M. (2012). Análisis y aplicación de técnicas geoestadísticas para la clasificación agrológica de suelos de la hacienda El Prado IASA-ESPE. Tesis de Postgrado. Escuela Politécnica Nacional. Quito.

Martínez, J. (1995). Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Departamento de Geografía. I Antigüedad, 193-201.

MIDENA. (2013). Perfil PM2-P128. Proyecto: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25000. Obtenido de Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE). Quito, Ecuador: <http://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/suelos/PM2-P128.pdf>

- Montenegro, G., & Malagón, C. (1990). Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Subdirección Agrológica. Santa fe de Bogotá, D.C, 812.
- Oliver, M. (2010). Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Department of Soil Science. New York, 6-32.
- Plant, R. (2001). Site specific management: the application of information technology to crop production. Estados Unidos. Obtenido de University of California. ResearchGate. p.9-29:
https://www.researchgate.net/publication/223463350_Site-specific_management_The_application_of_information_technology_to_crop_production
- Pozo, J. (2016). Caracterización físico-química de suelos actualmente productores de pastos y/o forrajes en el periodo lluvioso (PLL) y poco lluvioso (PPLL) para determinar su aptitud, Hacienda “La Concepción” Parroquia Tufiño. Facultad de Industrias Agropecuarias. Tulcán, Ecuador.
- Redrován, K. (2018). APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL ANÁLISIS ESPACIAL DE LA VARIABLE RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE CUENCA. Universidad Politécnica Salesiana- sede Cuenca. Ecuador.
- Reinoso, O., & Ramírez, E. (2010). Características morfogénicas y su influencia en el rendimiento del pasto Mombaza, cosechado a diferentes intervalos de corte. Tropical and Subtropical Agroecosystems. vol.12, no.2, 303-311.
- Rodríguez, M. (2009). Rendimiento y valor nutricional del pasto Panicum maximun cv Mombaza a diferentes edades y alturas de corte. Obtenido de
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3946/Rendimiento%20y%20valor%20nutricional%20del%20pasto%20Panicum%20maximun%20CV%20mombaza%20a%20diferentes%20edades%20y%20alturas%20de%20corte.pdf?sequence=1>

Román, D., Gutierrez, F., García, P., & Acevedo, O. (febrero de 2012). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. Obtenido de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000100010

Rubio, M. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcomocales.

Obtenido de Sevilla, España:

<https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., León, J. P., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Obtenido de Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay:

<http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>

Salcedo, E., Galvis, A., & Hernández, M. (2007). LA HUMEDAD APROVECHABLE Y SU RELACIÓN CON LA MATERIA ORGÁNICA Y SUPERFICIE ESPECÍFICA DEL SUELO. *Terra Latinoamericana*, 419-425.

Sánchez, Y. (2019). Determinación de la conductividad hidráulica para diversas muestras de suelo caolinítico. Obtenido de Universidad Católica de Colombia:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23890/1/tg%20firma4.pdf>

Soto, L. (2014). Grado de Compactación y Densidad. *Ingeniería Civil y Construcción*. Ecuador.

Ulloa, M., Abreu, C., & Paz, A. (2001). Disponibilidad de macro- y micronutrientes en un suelo de cultivo de Mabegondo. *Cadernos do Laboratorio*, 243-254.

UNC. (2017). Determinación del contenido hídrico del suelo. Obtenido de

<https://www.tecnoriegovalley.com.ar/uploads/fca-unc-determinacion-del-contenido-hidrico-del-suelo-2983.pdf>

Vargas, J. (2015). Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena. Obtenido de ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/319493327_Implementacion_de_imagenes_termogr

aficas_para_la_deteccion_de_estres_hidrico_en_hierbabuena_Mentha_spicata_bajo_invernadero_en_la_Sabana_de_Bogota

Zamora, M., Zamora, Y., & Félix, M. (2020). Composición botánica del pastizal según el nivel de arborización. Obtenido de Revista Cubana de Ciencias agrícolas. vol.54 no.1:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2079-020000100125&script=sci_arttext&tIng=es

Enlace:

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1YPNLbJKqQ3sajHHxaHBBN6l6wYC29Qgz>