



Estimación de la Biomasa de Pasturas con tres modelos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo.

Jaramillo Proaño, Bryan Andres

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Agropecuario

PhD. Pérez Guerrero, Patricio Alejandro

10 de febrero del 2022



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **“Estimación de la Biomasa de Pasturas con tres modelos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo”** fue realizado por el/los señor/señores **Jaramillo Proaño Bryan Andres**; 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, 10 de Febrero del 2022



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

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



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Jaramillo Proaño, Bryan Andres**, con cédula n°1722598859, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Estimación de la biomasa de pasturas con tres modelos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo** 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, 20 de Enero del 2022

Jaramillo Proaño, Bryan Andres

C.C.: 1722598859



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de publicación

Yo **Jaramillo Proaño, Bryan Andres** , con cédula de ciudadanía n° 1722598859 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Estimación de la biomasa de pasturas con tres modelos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 20 de Enero del 2022

Jaramillo Proaño, Bryan Andres

C.C.: 1722598859



Tesis Bryan Jaramillo V3 con correcciones.docx

Scanned on: 16:41 February 10, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	488
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Ommited Words	1091



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

Pérez Guerrero, Patricio Alejandro
Director



Website | Education | Businesses

Dedicatoria

La presente tesis quiero dedicar a Dios, por concederme de salud y de inteligencia para poder concluir mis estudios,

A mi padre Tito Jaramillo por brindarme su apoyo en la formación de mis estudios,

A mi madre Ligia Proaño por su incondicional apoyo y muestra de cariño,

A mis hermanos Belén Jaramillo Proaño y Christian Jaramilo Proaño por su afecto,

A mis Abuelitos Enrique Proaño, Ligia Rojas (+), Tito Jaramillo(+), Dorila Jaramillo(+) por su cariño e inspiración para estudiar una carrera enmarcada en la vida del campo y la agricultura,

A mis amigos, compañeros y a todas aquellas personas que han contribuido para el logro de mi carrera universitaria.

Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios que con su amor y bondad me permitió lograr mis objetivos en mi carrera universitaria.

A mis padres y hermanos por estar presente en esta etapa tan importante de mi vida y por su apoyo incondicional con el fin de ofrecer y buscar lo mejor para mi persona.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especialmente a la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I y a sus docentes que acertadamente compartieron sus conocimientos y experiencias dentro del mundo Agropecuario.

A mis profesores Diego Vela, Juan Ortiz, Patricio Pérez, Julio Pazmiño, Gabriel Larrea, Martha Vargas, Pedro Romero, Jaime Villacis, Jorge Ron, María Augusta Chávez, Darwin Rueda, Fernando Peñafiel, Fabian Tunala, Torres, Patricia Falconí, Wilmer Pozo, Marcelo Arce, Soledad Aguirre que fueron mis mentores durante mi formación profesional, por impartirme su conocimiento y su experiencia dentro del ámbito Agropecuario.

A Omar Paz, María Belén Jaramillo, William Paillacho, Roberto Arias, Pamela Martínez, a Iveth Vaca y a la empresa PRONACA S.A por permitirme realizar mis prácticas preprofesionales en tan prestigiosa institución.

A Gabriel Larrea, Ana Guamán y a la empresa Schlumberger del Ecuador por permitirme participar en proyectos de apoyo a la comunidad de Puerto Francisco de Orellana.

A Jorge Ron y a María Augusta Chávez y a la Corporación el Salinerito por permitirme formar parte de vinculación con la sociedad en Bolívar.

A los investigadores del INIAP Jose Luis Rivadeneira, Javier Manguashca, Yamil Cartagena, Rafael Parra que apoyaron el tema de investigación.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias-Santa Catalina por el apoyo económico y financiación del proyecto de investigación.

A Xavier Salvatierra y Nicolas Castro por su apoyo académico y motivacional durante mi carrera universitaria.

Índice de Contenidos

Carátula.....	1
Certificado Director.....	2
Responsabilidad de autoría.....	3
Autorización de publicación.....	4
Reporte de verificación de herramienta de solicitud.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice de Contenidos.....	8
Índice de Tablas.....	14
Índice de Figuras.....	16
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Capítulo I.....	19
Introducción.....	19
Antecedentes.....	19
Justificación.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específico.....	22
Hipótesis.....	22
Capítulo II.....	23
Revisión de Literatura.....	23

Concepto de suelo.....	23
El perfil de suelo y sus horizontes.....	23
Horizonte O.....	23
Horizonte A.....	24
Horizonte E.....	24
Horizonte B.....	24
Horizonte C.....	24
Horizonte R y W.....	25
Aspectos físicos del suelo.....	25
Textura.....	25
Triangulo de texturas del suelo.....	27
Propiedades físico químicas del suelo.....	28
Densidad aparente.....	28
Humedad gravimétrica.....	28
Humedad aprovechable.....	28
Movimiento de agua en el suelo.....	29
Resistencia a la penetración (compactación).....	29
Humedad del suelo.....	29
Geoestadística.....	30
Interpolación.....	30
Kriging con estimador lineal sesgado.....	31
Ponderación de distancia inversa.....	31
Vecino Natural.....	32

Cálculo del error.....	33
Pastos.....	33
Capítulo III.....	35
Materiales y Métodos.....	35
Ubicación del lugar de investigación.....	35
Ubicación Política.....	35
Taxonomía del suelo.....	36
Material Vegetal.....	37
Materiales de campo.....	37
Equipos de laboratorio.....	37
Equipos de Campo.....	38
Software.....	38
Métodos.....	38
Delimitación de parcelas.....	38
Implementación del ensayo.....	38
Siembra.....	39
Corte de igualación.....	39
Control de malezas.....	39
Fechas de corte.....	39
Textura de suelo.....	39
Humedad gravimétrica de suelo.....	40
Densidad aparente.....	41
Curva de retención de humedad.....	42
Instalación de tubos de medición de humedad.....	42
Calibración de la sonda FDR Divinner 2000.....	42
Toma de datos de humedad con sonda FDR Dvinner 2000.....	43

Cálculo del error.....	44
Altura.....	44
Estimación del rendimiento de biomasa en materia verde ($Kg \cdot ha - 1$).....	45
Estimación del rendimiento de Biomasa en materia seca ($Kg \cdot ha - 1$).....	45
Diseño experimental del proyecto.....	45
Características del campo experimental.....	48
Análisis de varianza.....	48
Análisis funcional.....	49
Capítulo IV	50
Resultados y Discusión	50
Resultados.....	50
Altura.....	50
Rendimiento.....	52
Pasto azul.....	52
Ryegrass Híbrido.....	53
Trébol blanco.....	55
Trébol rojo.....	56
Achicoria.....	57
Llantén.....	58
Kikuyo.....	59
Ryegrass perenne.....	59
Ryegrass Anual.....	61
Curva de retención de Humedad del suelo.....	62
Textura del suelo y densidad aparente.....	63

Interpolaciones Geoestadísticas.....	64
Kriging Ordinario.....	64
Ponderación de Distancia Inversa IDW.....	65
Vecino Natural.....	66
Mapas de distribución de Humedad.....	67
Correlaciones.....	69
Pasto Azul.....	69
Trébol Rojo.....	69
Trébol Blanco.....	70
Llantén.....	71
Ryegrass Hibrido.....	71
Ryegrass Anual.....	72
Ryegrass Perenne.....	73
Error Cuadrático medio.....	73
Capítulo V.....	75
Conclusiones y Recomendaciones.....	75
Conclusiones.....	75
Recomendaciones.....	76
Bibliografía	77

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de las partículas del suelo según el sistema internacional.....	27
Tabla 2 Clases texturales de suelos, según el USDA.....	28
Tabla 3 Características Estación Experimental Santa Catalina	37
Tabla 4 Taxonomía del suelo del sitio experimental	37
Tabla 5 Tabla de corrección por temperatura para determinaciones de Textura.	41
Tabla 6 Tratamientos asignados a unidades experimentales	47
Tabla 7 Características del campo experimental.....	49
Tabla 8 Análisis de varianza para el estudio	49
Tabla 9 Análisis de varianza y promedios de altura para las 9 especies en estudio.	51
Tabla 10 Análisis de varianza para el rendimiento de las variedades de Pasto azul	53
Tabla 11 Promedio de rendimiento en los cuatro cortes de pasto azul.....	54
Tabla 12 Análisis de varianza para el rendimiento las variedades de Pasto azul	54
Tabla 13 Promedio de rendimiento para las variedades de Ryegrass Híbrido.....	55
Tabla 14 Promedio de rendimiento de cuatro cortes de Ryegrass Híbrido.	55
Tabla 15 Análisis de varianza para el rendimiento en las variedades de Pasto azul	56
Tabla 16 Promedio de rendimiento para los cuatro cortes de trébol blanco.....	56
Tabla 17 Análisis de varianza para el rendimiento en variedades de Trébol rojo.	57
Tabla 18 Promedio rendimiento los cuatro cortes de las variedades de trébol rojo.	57
Tabla 19 Promedio de rendimiento cuatro cortes de las variedades de trébol rojo.	58
Tabla 20 Promedio de rendimiento en los cuatro cortes para la especie Achicoria	58
Tabla 21 Promedio de rendimiento para los cuatro cortes de Achicoria.	59
Tabla 22 Promedio de rendimiento en los cuatro cortes para la especie Llantén	59
Tabla 23 Promedio de rendimiento para los cuatro cortes de Llantén.	59
Tabla 24 Promedio de rendimiento en los cuatro cortes para la especie Kikuyo	60

Tabla 25	Promedio de rendimiento para los cuatro cortes de Kikuyo.	60
Tabla 26	Análisis de varianza para rendimiento en las variedades de Pasto azul.....	61
Tabla 27	Promedio de rendimiento para las variedades de Ryegrass perenne.	61
Tabla 28	Promedio de rendimiento para las variedades de Ryegrass perenne.	62
Tabla 29	Análisis de varianza para rendimiento en variedades de Ryegrass Anual	62
Tabla 30	Promedio de la variable rendimiento variedades de Ryegrass Anual	63
Tabla 31	Resultados para determinación textura de suelo y densidad aparente.	64

Índice de Figuras

Figura 1 Descripción de los horizontes del suelo	26
Figura 2 Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación	36
Figura 3 Croquis experimental aplicado al ensayo.....	48
Figura 4 Curva de retención de humedad del suelo en estudio.....	64
Figura 5-7 Kriging Ordinario.....	65
Figura 5 Interpolación Kriging Ordinario a 10 centímetros de profundidad.....	66
Figura 6 Interpolación Kriging Ordinario a 20 centímetros de profundidad.....	66
Figura 7 Interpolación Kriging Ordinario a 30 centímetros de profundidad.....	66
Figura 8-10 Ponderación de Distancia Inversa IDW.....	66
Figura 8 Ponderación de Distancia Inversa IDW a 10 centímetros de profundidad.	67
Figura 9 Ponderación de Distancia Inversa IDW a 20 centímetros de profundidad.	67
Figura 10 Ponderación de Distancia Inversa IDW a 30 centímetros de profundidad.....	67
Figura 11-13 Vecino Natural	67
Figura 11 Vecino Natural a 10 centímetros de profundidad.	68
Figura 12 Vecino Natural a 20 centímetros de profundidad.	68
Figura 13 Vecino Natural a 30 centímetros de profundidad.	68
Figura 14 Mapas de distribución de humedad gravimétrica por corte y profundidad	69
Figura 15 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa de pasto azul.....	70
Figura 16 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa de Trébol Rojo.....	71
Figura 17 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa de Trébol Blanco	71
Figura 18 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa de Llantén	72
Figura 19 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa Ryegrass Híbrido.....	73
Figura 20 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa de Ryegrass Anual	73
Figura 21 Correlación entre humedad gravimétrica y Biomasa Ryegrass Perenne.....	74

Figura 22 Gráfico de curvas de error absoluto promedio	75
---	----

Resumen

Dentro del área agropecuaria los sistemas automatizados de toma de información y de análisis como son los sistemas de Información geográficos toman cada vez mayor importancia en la agricultura con el fin de ahorrar tiempo en toma de datos y de análisis. Es por esto que en este estudio se busca determinar la biomasa de pasturas con tres modelos geoestadísticos de la humedad gravimétrica del suelo. En primer lugar, se estableció parcelas experimentales con 9 especies de pastos: Ryegrass anual, Ryegrass perenne, Ryegrass híbrido, Pasto azul, Trébol blanco, Trébol rojo, Llantén, Achicoria y Kikuyo, dentro de cada especie se encontrarán 27 variedades a ser evaluadas en altura, rendimiento y valor nutritivo. En cuanto al suelo se determinó la textura por el método de Bouyoucos y la curva de retención por el método de ollas de Richards que nos permitirá conocer punto de Saturación (PS), Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) del suelo. Para el análisis de los interpoladores en estudio se utilizaron el Error cuadrático medio y análisis gráficos para determinar el mejor interpolador entre Kriging, Ponderación de Distancia Inversa (IDW) y Vecino natural. Finalmente se estableció una Correlación de Pearson para evaluar el índice entre la biomasa y la humedad gravimétrica del suelo.

Los resultados muestran que existe diferencias estadísticamente significativas entre variedades y entre especies, sin embargo se nota que en el cuarto corte de producción existe un aumento de rendimiento en materia seca de todas las especies y variedades, se logró realizar las interpolaciones gráficas de los 3 interpoladores así como el error cuadrático medio que nos permitió escoger al mejor interpolador y establecer la correlación positiva existente entre la cantidad de biomasa en forrajes con la humedad gravimétrica del suelo.

Palabras clave: Pasturas, Biomasa, Humedad gravimétrica, Geoestadística, Interpoladores.

Abstract

Within the agricultural area, automated data collection and analysis systems such as geographic information systems are becoming increasingly important in agriculture in order to save time in data collection and analysis. For this reason, this study seeks to determine the biomass of pastures with three geostatistical models of gravimetric soil moisture.

In the first place, experimental plots were established with 9 species of grasses: annual Ryegrass, perennial Ryegrass, hybrid Ryegrass, Blue Grass, White Clover, Red Clover, Plantain, Chicory and Kikuyo, within each species there will be 27 varieties to be evaluated in height, yield and nutritional value. Regarding the soil, the texture was determined by the Bouyoucos method and the retention curve by the Richards pot method that will allow us to know the Saturation Point (PS), Field Capacity (CC) and Permanent Wilting Point (PMP). ground. For the analysis of the interpolators under study, the Mean Square Error and graphical analyzes were used to determine the best interpolator between Kriging, Inverse Distance Weighting (IDW) and Natural Neighbor. Finally, a Pearson Correlation was established to evaluate the index between biomass and gravimetric soil moisture.

The results show that there are statistically significant differences between varieties and between species, however it is noted that in the fourth production cut there is an increase in dry matter yield of all species and varieties, it was possible to perform the graphic interpolations of the 3 interpolators as well as the mean square error that allowed us to choose the best interpolator and establish the positive correlation between the amount of biomass in forages and the gravimetric humidity of the soil.

Keywords: Pastures, Biomass, Gravimetric humidity, Geostatistics, Interpolators.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El territorio ecuatoriano en su mayoría presenta condiciones medioambientales favorables para la producción de pastos todo el año, los factores más importantes en este cultivo son humedad, fertilidad y pH. La superficie cultivada en Ecuador según la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) realizada en el año 2014 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) corresponde a 5 381 383 hectáreas y dentro de esta superficie, los predios cultivados presentan el 42% y los predios naturales el 15.4% (León, Bonifaz, & Gutiérrez, 2018).

Los suelos del territorio ecuatoriano tienen características muy variables, los de origen volcánico representan un recurso valioso por su contenido de materia orgánica, estos ocupan un 31% del territorio ecuatoriano (Cruzatty & Vollman, 2012), a partir de estos suelos generalmente podemos encontrar los llamados Andisoles, aquellos que poseen una buena estructura, buen drenaje y buena retención de humedad, usados generalmente para pastos (SIGTIERRAS, 2017).

El contenido de humedad gravimétrica en los suelos cultivado con pasto debe estar entre 16.2 % para obtener un buen rendimiento en materia seca, oscilando entre valores de 33 % en capacidad de campo y 13 % en punto de marchitez permanente (Chavez, y otros, 2018). La disponibilidad de forrajes y la producción de biomasa se ve afectada cuando los niveles de precipitación se encuentran debajo de los 250 mm, especies que son resistentes a sequías necesitan una tasa anual promedio de 800 mm (Nuñez, 2017). El contenido de agua en el suelo es un factor para la regulación de la

escorrentía, considerando que cuando la humedad aumenta en los suelos, la capacidad de infiltración se ve disminuida (Gómez, 2000).

Los modelos geoestadísticos son una herramienta importante para interpretar el comportamiento de las variables en el suelo, el uso de interpoladores permite analizar distribuciones y variaciones espacio-temporales con el fin de generar estimaciones en posiciones dentro de la región en estudio (Conesa & Bautista, 2004).

A través de la geoestadística se puede estudiar la variabilidad espacial de la humedad, permitiendo analizar su comportamiento en un sitio determinado (Largaespada & Henríquez, 2015). La tecnología de las sondas electromagnéticas TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo) y FDR (Reflectometría en el dominio de la frecuencia), poseen sus limitaciones, como que sus lecturas abarcan un pequeño volumen de suelo, son sensibles a burbujas de aire que se forman en los tubos de acceso, se requiere la instalación adecuada de los tubos de medición, la limitación económica sumado a la heterogeneidad de condiciones físicas y climáticas del Ecuador genera requerimientos elevados de sensores o equipos de medición (Martin & Muñoz, 2017).

Para poder establecer comparaciones entre las metodologías geoestadísticas (Kriging con estimador lineal sesgado, ponderación de distancia inversa y vecino natural) y la densidad de puntos, se establecen algunos métodos de medición de los cuales uno de los más certeros para comparaciones directas de valores interpolados con los valores medidos es el del error absoluto promedio (Soto & Gonzáles, 2019; Fox, 1981). Los métodos geoestadísticos IDW (Ponderación de distancia inversa) y Kriging requieren que los puntos sean cercanos al punto de estudio para incrementar su

eficiencia. La aplicación del método de interpolación Kriging en la predicción de parámetros de fertilidad de suelos, bajo condiciones específicas, posee una mayor efectividad en la predicción en comparación con el método de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) (Villatoro, Henríquez, & Sancho, 2008).

Justificación

La dinámica de los contenidos de agua en el suelo y las variables que intervienen en la misma dificultan poder establecer las condiciones espaciales de la humedad del suelo, optimizando recursos y manteniendo una aproximación cercana a la real. El agua dentro del suelo es importante en cuanto a factores de movilidad de nutrientes y de turgencia para las plantas, así como también para nutrición animal (FAO, 2013).

Los métodos de interpolación geoestadística son una herramienta con gran potencial para la predicción, interpretación del comportamiento de la humedad del suelo con elevado contenido de materia orgánica en presencia de pastos. La información que se tiene sobre modelos geoestadísticos aplicados a la agricultura son escasos, lo que ocasiona que en la mayoría de componentes requeridos para su aplicación se tenga que utilizar datos obtenidos de otros países (León, Montes, Hernández, & Henríquez, 2017).

El interés de este estudio es poder realizar interpolaciones de los valores de humedad a diferentes profundidades, en condiciones de heterogeneidad de los pastos en el área de estudio, condiciones de pendiente, y lograr independientemente de la influencia de los parámetros encontrar los modelos que nos dan la mejor aproximación, al igual que encontrar la densidad de puntos de medición que generen la mayor eficiencia en el resultado (Moral, 2004).

Por lo tanto en este estudio se incluirá tecnología en los procesos agropecuarios, mediante la comparación de tres métodos de interpolación a partir de datos de humedad del suelo obtenidos con la sonda FDR Divinner 2000 asociados a condiciones de humedad y a índices de producción de biomasa en especies forrajeras, con la finalidad de obtener un modelo que permita estimar el número óptimo de puntos de medición para realizar un mapa de distribución confiable; puesto a que la medición de estas variables demandan una elevada cantidad de tiempo, costo y mano de obra para obtener resultados producibles (Valero, 2011).

Objetivos

Objetivo General

Determinar la biomasa de pasturas con tres modelos geoestadísticos de la humedad gravimétrica del suelo.

Objetivos Específicos

Validar tres modelos geoestadísticos de interpolación para datos de humedad en suelo a diferentes profundidades y etapas de crecimiento del pasto.

Realizar curvas de retención de humedad en función de la textura del suelo en estudio.

Realizar mapas de distribución con datos de humedad obtenidos mediante sonda FDR (Divinner 2000).

Determinar la correlación entre biomasa y distribución de humedad en el suelo.

Hipótesis

Ho: La biomasa de pasturas no se puede estimar con modelamientos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo.

Hi: La biomasa de pasturas se puede estimar con modelamientos geoestadísticos de humedad gravimétrica del suelo.

Capítulo II

Revisión de Literatura

Concepto de suelo

Como señala Parra et al. El suelo es una colección de cuerpos naturales que se encuentran sobre la superficie terrestre, en determinados sitios modificados o incluso creados artificialmente por la actividad humana a partir de materiales terrosos, que contienen organismos vivos y que sustentan o tienen la capacidad de sustentar plantas al aire libre (Parra, Alvarado, Valverde, & Yamil, 2019).

El perfil de suelo y sus horizontes

La parte superficial de la tierra tiene varias características para el desarrollo de los vegetales en ella como por ejemplo la capacidad de suministrar nutrientes, la capacidad de almacenar aguas provenientes de precipitaciones naturales, el contenido de aire que se encuentra disponible en los espacios porosos del suelo para la respiración de las raíces de las plantas (INIA, 2015)

Los horizontes del suelo son volúmenes de suelo casi paralelos a la superficie terrestre, descritos por varios ensambles, su relación específica de color y cromas, agregados, poros, entre otras características propias de los horizontes. Cada horizonte tiene su espesor, extensión lateral y sus límites morfológicos tanto vertical como lateral, estos horizontes terminan desapareciendo en el paisaje del suelo cuando se funden entre sí y se crean nuevos ensambles (FAO, 2009).

Horizonte O

Capa con gran contenido de materia orgánica, generalmente saturadas por agua durante un periodo considerable de tiempo, compuesto por residuos vegetales en

proceso de descomposición o descompuestos totalmente en este horizonte, característico de bosques naturales (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017)

Horizonte A

Capa mineral formada bajo el horizonte O resultante en gran parte por presencia de cultivos, pastoreos consecutivos en la superficie o perturbaciones humanas, con una considerable cantidad de materia orgánica humificada que se encuentra mezclada con la fracción mineral del suelo (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017)

Horizonte E

Capa de color más claro al del Horizonte A, con alta concentración de partículas de arena y limo. En algunos recubrimientos se presenta en la composición de este horizonte óxidos de hierro, generalmente se encuentra cerca de la superficie y en la mayoría de perfiles de suelo tiene un espesor menor al horizonte A (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017).

Horizonte B

Capa frágil con formaciones de arcillas silicatos, con presencia de minerales como hierro y aluminio, humus, carbonatos, yeso, sílice que pueden estar solos o combinados. Se presenta remoción de carbonatos y una ligera alteración prismática de arcilla o la acumulación de la misma (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017).

Horizonte C

Representa a las capas minerales que contienen saprolita, roca en proceso de meteorización que presenta dificultad para la excavación, poco afectadas por los procesos pedogenéticos con características diferentes a las de los horizontes O, A, E o B (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017).

Horizonte R y W

Las capas R son rocas duras como el granito, basalto, cuarcita, rocas areniscas o calcáreas, capa cementada con gran dificultad para su excavación del suelo o debajo de él, cuando el agua se encuentra congelada se lo puede denominar Wf (Padda, Fernández, & Cordbella, 2017).

Figura 1

Descripción de los horizontes del suelo



Elaborado por: (Álvarez, y otros, 2015)

Aspectos físicos del suelo

Los factores importantes que deben ser tomados en cuenta en los suelos son las condiciones edafológicas que predominan en las áreas de cada unidad de producción establecidas como potreros, la fertilidad de los suelos también es importante para la producción de forrajes de buena calidad y con un buen rendimiento por superficie cultivada (Borges, Barrios, Sandoval, Bastardo, & Marquez, 2012)

Textura

Característica influyente en la calidad de suelos, determinado por el porcentaje de arena, arcilla y limo, las partículas de arena son de gran tamaño (PSE, 2017), las partículas de limo son medianas y las partículas de arcilla son pequeñas, la textura del

suelo es una propiedad que no sufre cambios bajo prácticas de manejo diferentes (FAO, 2006).

Tabla 1

Clasificación de las partículas del suelo según USA y el sistema internacional

Fracción del suelo	Sistema del Dpto USA	Sistema Internacional
	Diámetro en mm	Diámetro en mm
Arena muy gruesa	1,0 – 2,0	
Arena gruesa	0,5 – 1,0	0,2 – 2,0
Arena media	0,25 – 0,5	
Arena fina	0,1 – 0,25	0,02 – 0,2
Arena muy fina	0,005 – 0,1	0,002 -0,02
Limos	0,002 – 0,005	
Arcilla	< 0,002	< 0,002

Elaborado por (FAO, 2006).

Existen varias clases texturales que pueden presentarse en los suelos según la cantidad de arena, limo y arcilla y se presentan las texturas generales según el USDA, es importante realizar la mecánica del suelo en un laboratorio para determinar de forma cuantitativa el tamaño de las partículas, se puede clasificar la textura del suelo de fina a gruesa, este tipo de clasificación textural es muy útil al momento de establecer la facilidad con la que se puede trabajar en el suelo, la cantidad de agua que este retiene y la velocidad con que el agua se infiltra en el suelo (FAO, 2006).

Tabla 2*Clases texturales de suelos, según el USDA*

Nombres vulgares de los suelos (textura general)	Arenoso	Limoso	Arcilloso	Clase Textural
	86-100	0-14	0-10	Arenoso
Suelos arenosos (textura gruesa)	70-86	0-30	0-15	Franco arenoso
	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	23-52	28-50	7-27	Franco
	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	0-20	88-100	0-12	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso
	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: USDA (FAO, 2006)**Triángulo de texturas del suelo**

Representación gráfica que distingue las distintas clases texturales presentes en los suelos, cuantificando las proporciones de arena, limo y arcilla expresadas en porcentaje se logra el resultado de dar un nombre a la textura que pertenece el suelo en estudio.

Propiedades físico químicas del suelo

Las propiedades químicas están relacionadas con la disponibilidad del recurso principal agua y de la calidad que esta posea, los nutrientes que están presentes en el suelo también están dados por propiedades químicas del suelo como por ejemplo pH, cantidad de materia orgánica, conductividad eléctrica, cantidad de N, P y K extractables. Dentro de las propiedades físicas del suelo se encuentra el tipo de estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, capacidad de infiltración del suelo, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento (Medina, Bautista, & Salvador, 2018).

Densidad aparente

Corresponde a la relación existente entre la masa de suelos con el volumen de las partículas correspondientes a las fases sólidas, en este tipo de densidad se excluye los espacios porosos entre partículas. Las medidas de la densidad aparente y la densidad real es necesaria para la determinación de porosidad (Ortiz, 2016).

Humedad gravimétrica

Es la manera de expresar la cantidad de agua que contiene el perfil del suelo a una cierta profundidad, en un tiempo determinado, la humedad gravimétrica corresponde a la relación de la masa de agua contenida en los poros o agua libre, en una masa específica con contenido de sólidos (Rodríguez, 2017)

Humedad aprovechable

Cantidad determinada de agua disponible para el crecimiento de las plantas que se encuentra entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), la CC que está referida a la cantidad de agua que se encuentra después de 48 horas que se ha drenado el agua en el suelo por los poros comprendidos entre 0.03 y 1 mm de diámetro. El PMP es el contenido de agua en el suelo que no se encuentra

disponible, el cultivo en este punto se encuentra marchito y vuelve a sobrevivir cuando el estado del suelo regresa al punto de saturación (Salazar, y otros, 2016)

Movimiento de agua en el suelo

También llamado infiltración, sucede cuando el agua ingresa al suelo, comenzando por la superficie hasta las capas más profundas, provocada la mayoría de veces por fenómenos naturales como la lluvia o artificiales como la aplicación de riego en sus diferentes formas de aplicación, el agua se mueve en función de gradientes potenciales por ejemplo el potencial mátrico y el potencial gravitatorio. La distribución de la humedad en el suelo cambia según sus características físicas y químicas, existe cambios que son evidentes en la humedad entre un suelo que contenga gran cantidad de arcilla y un suelo que contenga en su estructura partículas de arena (Frías & Salgado, 2016)

Resistencia a la penetración (compactación)

Esta dada por un aumento en la densidad y una reducción de la porosidad en el suelo que es perjudicial para las funciones del suelo, así como también la dificultad para la penetración de las raíces al suelo, disponibilidad de agua e intercambio gaseosos. La compactación reduce el rendimiento agrícola producida principalmente por sobrepastoreo y malas gestiones en las actividades agrícola (FAO, 2018)

Humedad del suelo

El contenido de humedad se puede expresar de varias maneras, una de ellas es el agua como compuesto químico dentro del espacio poroso que forma parte de la estructura de algunos materiales en la fase sólida del suelo (Calvache, 2011)

La humedad del suelo es definida como la energía potencial relativa de agua contenida en el suelo, la mayoría de casos la mezcla de agua y suelo se considera localmente homogénea y se puede expresar de varias formas, relación de peso

(gravimétrica), relación de volumen (volumétrica), relación de poros ocupados por agua (grado de saturación) (Shaxson & Barber, 2005). Los métodos para medir la humedad en el suelo, se los puede clasificar en métodos directos e indirectos, dentro de los métodos directos se encuentra el método gravimétrico que nos permite medir el contenido de humedad en el suelo de forma directa, en los métodos indirectos encontramos las sondas de neutrones, instrumentos electromagnéticos, tensiómetros, entre otros (Capraro, Tosetti, & Serman, 2010)

Geoestadística

Los métodos geoestadísticos son herramientas que permiten estimar la variabilidad y la estructura de las propiedades físico-químicas y morfológicas del suelo, por eso es importante conocer la variabilidad en el espacio de las propiedades del suelo que pueden predecirse con procesos geoestadísticos y mapas de distribución del comportamiento del suelo en distintas regiones, contribuyendo al manejo adecuado de suelos. Los modelos geoestadísticos presentan una gran flexibilidad para su interpolación motivo por el cual se utilizarán tres métodos de interpolación. (Monroy, Alvarez, & Alvarado, 2017)

Las variables físicas y biológicas presentes en la naturaleza generalmente presentan una distribución espacial heterogénea, la aplicación de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) ha impulsado el análisis de la distribución de las diferentes variables aplicadas en la ecología y las ciencias ambientales (Moral, 2004).

Interpolación

La interpolación pertenece al campo de la geoestadística, basada en la estimación de valores que no son conocidos de una variable espacial, a partir de otros datos que se conocen, estos procesos son válidos cuando se los aplican en un terreno concreto. Las variables climáticas son las que se utilizan con frecuencia para este tipo

de análisis. El resultado que se obtiene de las interpolaciones es conocido como superficie estadística, se trata de un mapa con valores interpolados a partir de datos ya conocidos previamente. (Moral, 2004)

Los modelos geoestadísticos presentan una gran flexibilidad para su interpolación motivo por el cual se utilizarán 3 métodos de interpolación.

Kriging con estimador lineal sesgado

Método geoestadístico formulado por Danie Krige en 1951 que se considera la distancia como la geometría de la localización de las muestras, se logra minimizar la varianza del error (diferencia entre el valor real y el estimado). El fundamento consiste en la dependencia espacial de los datos, los que tengan menor distancia presentaran atributos más semejantes en comparación a puntos o bloques que se encuentran más separados, este comportamiento es representativo en la naturaleza (Moral, 2004).

Los estimadores tipo kriging son variantes del estimador lineal básico:

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

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

Ponderación de distancia inversa

Este método estima valores desconocidos al momento de especificar la distancia de búsqueda, búsqueda, puntos más cercanos, la configuración de la potencia y las

barreras. El punto problema se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa.

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

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.

Vecino Natural

Técnica de interpolación que usa regiones naturales locales determinadas alrededor de los puntos de medición de cada punto a elegir y de esta manera ponderar el valor de los polígonos creados alrededor del punto de medición, la sobreposición entre los polígonos se utiliza para otorgar los pesos en los diferentes puntos en estudio.

$$Z_{(x,y)} = \sum_{i=1}^n w_i * f_{(x_i,y_i)}$$

Donde:

$Z_{(x,y)}$ = valor de la estimación en la posición (x,y)

$f_{(x_i,y_i)}$ = valor de la humedad observada en la posición (x_i, y_i)

w = peso asociado a $f_{(x_i,y_i)}$

Cálculo del error

Para el cálculo del error se utilizará el error absoluto promedio (MAE, por sus siglas en inglés), para lo cual se tomarán las combinaciones de tubos de validación para cada número de tubos (valores entre 1 y 4) y los diferentes estadíos (Moral, 2004).

La fórmula del MAE se expresa a continuación.

$$MAE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i|$$

Donde:

N=número de validaciones

Xi=valores medidos

Yi=valores extraídos geográficamente

Pastos

Los pastos son considerados la principal fuente de nutrientes para alimentar al ganado bovino, ya que constituye con el suministro de grandes cantidades de proteína, energía, vitaminas, fibra, minerales aún más si está destinado a producción de carne y leche (Solano, López, Castellanos, Rodríguez del Rey, & Hernández, 2009).

Una de las limitantes en la producción ganadera es la baja calidad de los pastos y el inadecuado manejo del suelo. Según Sánchez et al., (2008) la respuesta a la productividad de los animales se relaciona con la disponibilidad de materia seca y calidad nutritiva de los pastizales.

En un sistema de pastoreo tiene la finalidad de mantener una alta producción de pastos de buena calidad durante el mayor periodo, leguminosas logrando una producción ganadera sostenible y sustentable a lo largo del tiempo que según Hernández y Guenni (2008) se define el manejo en tres factores como la frecuencia, la intensidad y la duración del pastoreo en los potreros.

Los procesos hidrológicos presentan gran importancia al momento de estimar la cantidad de biomasa que se podría generar en un predio de producción agrícola, la variabilidad espacio-temporal de la distribución de la humedad gravimétrica nos va a permitir tomar una decisión al momento de elegir el tipo de pasto que se podría sembrar según el tipo de suelo y el contenido de agua (Llorens, Latron, & Gallart, 2003).

Capítulo III

Materiales y Métodos

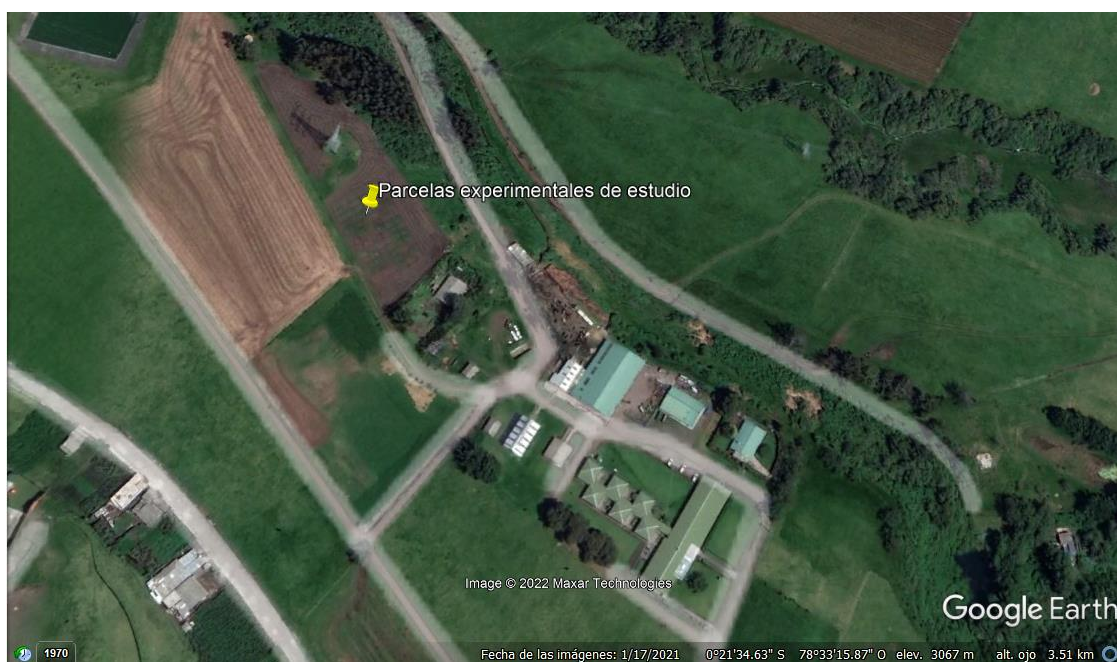
Ubicación del lugar de investigación

Ubicación Política

El presente estudio se realizó en el lote No. 19 de la Unidad de Apoyo a la Investigación Pecuaria (UIAP) del Programa de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP, cuyas características ecológicas, políticas, geográficas y ambientales se presentan en la Tabla 3.

Figura 2

Imagen satelital de la ubicación del lugar de investigación



Fuente: Google Earth

Tabla 3

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

Detalle	Características
Provincia	Pichincha
Cantón	Mejía
Parroquia	Cutuglagua
Latitud	00° 21' 33.05'' S
Longitud	78° 33' 18.85'' O
Altitud	3058 msnm
Humedad relativa (%)	79
Temperatura promedio anual (°C)	12
Precipitación media anual época lluviosa (mm)	1300
Precipitación media anual época seca (mm)	171

Fuente: (Cañadas, 1983); (INAMHI, 2020)

Taxonomía del suelo

En la tabla 4 se detalla la taxonomía de suelo del sitio experimental.

Tabla 4

Taxonomía del suelo del sitio experimental

Detalle	Características
Orden	Andisols
Suborden	Udands
Gran grupo	Hapludands
Subgrupo	Vitric Hapludands
Textura	Franco
Color	Negro

Detalle	Características
pH	5.7 (ligeramente ácido)
Arcillas (%)	14
Materia orgánica (%)	13
Clasificación	Humic Durustands

Fuente: (MIDENA, 2013)

Material Vegetal

Se utilizará 9 especies de pastos de la serranía ecuatoriana para medir la humedad en presencia de los mismos, que generan un estudio con condiciones heterogéneas forzadas de cobertura. Estas se detallan en la tabla 6.

Materiales de campo

- Azadón.
- Pala.
- Rastrillo.
- Libro de campo.
- Carpeta de guía para descripción.
- Kit de descripción de suelos.
- Cuadrante de 50 x 50 cm.
- Barreno de núcleos.
- Navegador satelital GPS.
- Cámara fotográfica.
- Tubos de acceso para sonda FDR.

Equipos de laboratorio

Los análisis físicos de suelo y determinación de biomasa en pastos, se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas de la EESC, el cual dispone de:

- Estufa (Shell Lab)
- Estufa (LAB LINE)

- Balanza de precisión (Shimadzu, modelo LIBROR AEG – 220)
- Potenciómetro (ThermoScientific, modelo ORION STAR A2011)
- Agitador automático (ThermoScientific)

Equipos de Campo

Para el desarrollo del presente experimento se utilizaron los siguientes equipos:

- Termómetro Greisinger
- Sonda FDR (Divinner 2000)

Software

- Software para sistemas de información geográfica (ARCGIS 10.4)
- Microsoft Word
- Microsoft Excel
- Software estadístico (R)

Métodos

Delimitación de parcelas

Se delimitaron 81 parcelas experimentales de 4m de ancho por 3 m de largo siendo cada parcela de 12 m²

Implementación del ensayo

La siembra de las especies de interés en el estudio, así como la instalación de tubos de medición se realizó en el lote No. 19 de la Unidad de Apoyo a la Investigación Pecuaria (UIAP) del Programa de Ganadería y Pastos de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP.

Siembra

La siembra de las semillas de pasto se realizó el 16 de diciembre del 2020, las semillas fueron distribuidas uniformemente al voleo en cada parcela (12 m²), posteriormente se tapó las semillas utilizando un rastrillo permitiendo el ingreso de las mismas entre 1.5 – 2.0 cm del suelo para protegerlas del sol, de lluvias abundantes y de pájaros.

Corte de igualación

Se realizó un corte de igualación a los 70 días después de la siembra con una motoguadaña dejando un residual de 5 cm, con el fin de obtener un rebrote vigoroso y para controlar de cierta manera el surgimiento de malezas en el ensayo.

Control de malezas

Se realizó un control manual de malezas en las parcelas y un control químico dentro de las parcelas con el herbicida 2-4 D amina en el caso de parcelas que contenían gramíneas y para el caso de control de malezas en caminos se utilizó glifosato.

Fechas de corte

Se consideraron 4 cortes en las especies de interés forrajero, dos para la época seca y dos para la época lluviosa, los análisis de biomasa se generaron en los 4 cortes, un primer corte de igualación a los 25 días después de la siembra de las especies de pastos e intervalos de corte cada 3 meses aproximadamente y los análisis de valor nutritivo en laboratorio se generó uno para la época lluviosa y otro para la época seca.

Textura de suelo

La textura del suelo se la determinó a través del Método de Bouyoucos, con el fin de determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en la fracción mineral del suelo. La toma de muestras de suelo se realizó con 20 submuestras con la ayuda

del barreno de núcleos, posteriormente se muele con la ayuda de una pesa de 5 kg, se tamiza en una malla de 2 mm, se añade 40 ml de floculante que en este caso se utilizó hidróxido de sodio 0.1 N, se dejó reposar durante 24 horas, terminado el reposo se licua la muestra durante 10 minutos, se trasvasó la muestra al bouyouco de 1000 ml y se aforó con el densímetro, se agitó durante 20 segundos y se realizó la primera lectura a los 40 segundos, luego de haber tomado la primera lectura se dejó reposar durante 2 horas y se tomó la segunda lectura con densímetro sin agitación después de 40 segundos colocada la muestra, se tomó la temperatura de cada lectura, para ajustar las lecturas con el factor de corrección.

Tabla 5

Tabla de corrección por temperatura para determinaciones de Textura.

° C	Factor de Rectificación
15	-1.6
18	-0.6
19	-0.2
20	0.2
21	0.4
22	0.8
23	1.2
24	1.6

Fuente: (FAO, 2006)

Humedad gravimétrica de suelo

Se evaluó la humedad gravimétrica del suelo con un barreno de torniquete, a profundidades de 10, 20 y 30 cm en cada tubo de acceso de medición de humedad. Las muestras se pesaron en una balanza de precisión marca Shimadzu, después se procedió a introducir a una estufa de secado marca LAB LINE a una temperatura de

105°C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante (peso seco). Se registró los pesos secos de las muestras, con los datos obtenidos se calculó la relación entre peso seco y peso húmedo. Esta variable se calculó utilizando la siguiente fórmula (Martin & Muñoz, 2017)

$$\%Hg = \frac{(PSH + PC) - (PSS + PC)}{(PSS + PC) - PC} \times 100$$

Dónde:

%Hg = Humedad gravimétrica porcentaje.

PSH = Peso del suelo húmedo.

PC = Peso de caja.

PSS = Peso del suelo seco

Densidad aparente

La densidad aparente del suelo se determinó mediante una muestra tomada con el barreno de anillos en los tubos de acceso de medición de humedad gravimétrica, la muestra de suelos se colocó en cajas metálicas, se pesó en la balanza para obtener el peso húmedo de la muestra, posteriormente se colocó en la estufa a una temperatura de 105 °C hasta que la muestra tenga humedad constante de (24 a 72) horas. Luego del tiempo de espera se sacó la muestra de suelo seco de la estufa y se pesó la muestra, para realizar los cálculos de la densidad aparente se lo hace mediante la siguiente fórmula (García, Ramírez, & Sánchez, 2012).

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

Donde:

Da= Densidad aparente.

M= Masa o peso del suelo seco.

V= Volumen de la muestra (68.19 cm³) cilindro.

Curva de retención de humedad

Se seleccionaron tres muestras de diferente profundidad (0-10, 10-20 y 20-30 cm) cercana a los tubos de acceso del lote en estudio, las cuales se transportaron al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas y se secaron al ambiente para posteriormente ser tamizada y colocar en los anillos de las bandejas de cerámica. La CRH se determinó mediante el método de ollas de presión de Richards con presiones de 0 bares para saturación 0.33 bares para capacidad de campo y 15 bares para punto de marchitez permanente (Rucks, Kaplan, & Hill, 2004).

Instalación de tubos de medición de humedad

Para la instalación de los 10 tubos en el sitio del área experimental se utilizó un barreno de instalación de las tuberías con un trípode y un nivel para poder colocar el tubo de medición de forma vertical para facilitar el ingreso de la sonda, se utilizó un barreno para sacar la tierra que sale al ingresar el tubo, el proceso se repitió hasta lograr que el tubo ingrese por completo, en la parte superior del tubo se sobró 10 cm de tubería desde el nivel del suelo para colocar la tapa y evitar que ingrese agua a los tubos de medición o cualquier otro objeto que pueda interferir en la medición.

Calibración de la sonda FDR Divinner 2000

Se realizó la calibración del equipo tomando 3 muestras de suelo a distintas profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm) para determinar la humedad volumétrica en función de la humedad gravimétrica del suelo y la densidad aparente para determinar la escala de frecuencia (SF) utilizando la siguiente ecuación:

$$SF = \frac{(Fa - Fs)}{(Fa - Fw)}$$

Dónde:

SF= Frecuencia a escala.

Fa = es la lectura de frecuencias en el tubo de lectura mientras se encuentra suspendido en el aire.

Fs = lectura del tubo a una profundidad específica.

Fw = es la lectura en el tubo sumergido dentro del agua.

A partir de los datos de contenido hídrico volumétrico y SF se obtendrá la ecuación de calibración:

$$\theta = (a SF^b)$$

Dónde:

θ = Contenido hídrico volumétrico.

a y b = coeficientes dependientes de la profundidad.

SF= Frecuencia a escala.

Los parámetros de la ecuación y los coeficientes dependientes de la profundidad fueron tomados de un estudio realizado por (Morla, 2016).

Toma de datos de humedad con sonda FDR Dvinner 2000

Las mediciones de humedad del suelo se realizaron 3 veces por semana desde el día de siembra de los pastos hasta el corte número 4 de las especies de interés en el estudio, las mediciones se realizaron en horas de la mañana en los 10 tubos de acceso. El conjunto de datos se utilizó para realizar los 3 métodos de interpolación y para la generación de la estimación del error absoluto promedio.

Para descargar los datos de la sonda FDR se utilizó el programa Divinner Utilities, programa proporcionado por Sentek Pty Lt. Luego de iniciar al programa Divinner Utilities, se seleccionó el puerto de comunicación para descargar los datos, se descargó los datos desde el 18 de diciembre del 2020 hasta el 05 de noviembre del 2021, se guardó en la carpeta de respaldo, los datos fueron guardados en la carpeta correspondiente en formato txt., como un bloc de notas.

Cálculo del error

Para el cálculo del error se utilizará el error absoluto promedio (MAE, por sus siglas en inglés), para lo cual se tomarán las combinaciones de tubos de validación para cada número de tubos (valores entre 1 y 4) y los diferentes estadíos. (Moral, 2004)

La fórmula del MAE se expresa a continuación.

$$MAE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i|$$

Donde:

N=número de validaciones

Xi=valores medidos

Yi=valores extraídos geográficamente

Tomando en cuenta los valores (x) como los valores medidos y los valores (y) los extraídos geográficamente de la interpolación en los puntos de ubicación de los puntos de validación.

Altura

Para la variable altura se utilizó una regla para medir las especies de pastos desde la base del cuello del tallo hasta el ápice de la hoja, la medición se realizó en los cuatro cortes.

Estimación del rendimiento de biomasa en materia verde ($Kg \cdot ha^{-1}$)

En cada unidad experimental se evaluó el rendimiento considerando el estado de madurez de las variedades de pastos. La primera evaluación se realizará a los 80 días dds (después de la siembra). Se realizó 4 cortes por año. Empleando una motoguadaña, se cortará el pasto de cada una de las parcelas de 12 m² a ras de suelo que no han sido considerados para la muestra del cuadrante y considerando el efecto del borde, se debe eliminar 0,50 m del contorno de la parcela, los datos se reportarán en kilogramos de materia verde por hectárea.

Estimación del rendimiento de Biomasa en materia seca ($Kg \cdot ha^{-1}$)

Para evaluar la materia seca se pesó una muestra de 500 g de pasto, la cual se colocó en una funda plástica sellada para evitar la pérdida de humedad. Se procedió a secar en una estufa con aire forzado a 65 °C durante 12 horas (Silva, 2011; De La Roza et al., 2012). Para estimar la materia seca se utilizará la siguiente fórmula.

$$PMS = \left(\frac{Ps}{Ph} \right) X 100 \%$$

Donde:

PMS: Porcentaje de materia seca.

Ps: Peso seco en gramos.

Ph: Peso húmedo en gramos.

Diseño experimental del proyecto

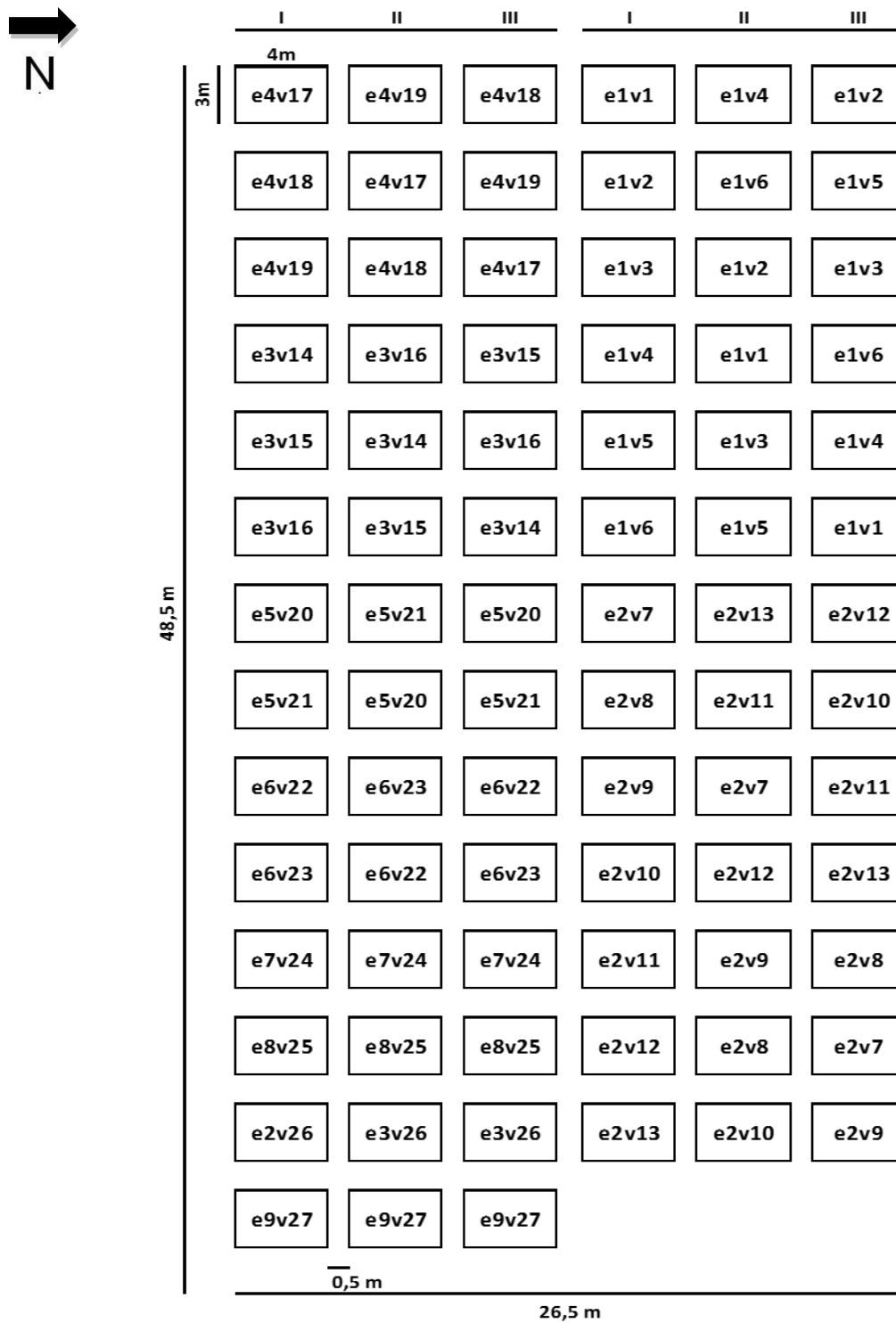
Los tratamientos se asignaron a las unidades experimentales bajo un Diseño en Bloques Completamente al azar con 3 repeticiones considerando como primer factor a las especies forrajeras (9) y el segundo factor a las variedades (27) Tabla 6.

Tabla 6*Tratamientos asignados a unidades experimentales*

Tratamiento	Código	Especies	Variedad
T ₁	e ₁ V ₁	Ryegrass perenne	Albion
T ₂	e ₁ V ₂	Ryegrass perenne	Tetraverde
T ₃	e ₁ V ₃	Ryegrass perenne	Ohau
T ₄	e ₁ V ₄	Ryegrass perenne	Premium
T ₅	e ₁ V ₅	Ryegrass perenne	Suxyl
T ₆	e ₁ V ₆	Ryegrass perenne	Duramas
T ₇	e ₂ V ₇	Ryegrass anual	Magnun
T ₈	e ₂ V ₈	Ryegrass anual	Adrenalin
T ₉	e ₂ V ₉	Ryegrass anual	Max
T ₁₀	e ₂ V ₁₀	Ryegrass anual	Pichincha
T ₁₁	e ₂ V ₁₁	Ryegrass anual	Austral
T ₁₂	e ₂ V ₁₂	Ryegrass anual	Gulf
T ₁₃	e ₂ V ₁₃	Ryegrass anual	Tetilia
T ₁₄	e ₃ V ₁₄	Ryegrass hibrido	Sabana
T ₁₅	e ₃ V ₁₅	Ryegrass hibrido	Bandito
T ₁₆	e ₃ V ₁₆	Ryegrass hibrido	Tetralite
T ₁₇	e ₄ V ₁₇	Pasto azul	Quick draw
T ₁₈	e ₄ V ₁₈	Pasto azul	Potomac
T ₁₉	e ₄ V ₁₉	Pasto azul	Baridana
T ₂₀	e ₅ V ₂₀	Trébol blanco	Ladino gigante
T ₂₁	e ₅ V ₂₁	Trébol blanco	White clover
T ₂₂	e ₆ V ₂₂	Trébol rojo	Dymaite
T ₂₃	e ₆ V ₂₃	Trébol rojo	Freedom
T ₂₄	e ₇ V ₂₄	Achicoria	Chicory
T ₂₅	e ₈ V ₂₅	Llantén	Tonic
T ₂₆	e ₃ V ₂₆	Ryegrass hibrido	Shugon
T ₂₇	e ₉ V ₂₇	kikuyo	

Figura 3

Croquis experimental aplicado al ensayo



Características del campo experimental

Las características del campo experimental, para la estimación de biomasa de pasturas y los modelos de humedad gravimétrica en suelo obtenidos por procesos geoestadísticos se detallan en la tabla 7.

Tabla 7

Características del campo experimental

Descripción	Unidad
Número de repeticiones	3
Número total de tratamientos	27
Unidades experimentales	81
Área total de la parcela neta	972 m ²
Área total de la parcela	12 m ² (3 m x 4 m)
Área total del experimento	1285.25 m ²

Análisis de varianza

Los análisis de varianza se detallan a continuación en la tabla 8.

Tabla 8

Análisis de varianza para el estudio

Fuentes de variación	Grados de libertad
Total	80
Repeticiones	2
Tratamiento	26
Error experimental	52

Análisis funcional

El análisis estadístico se realizó con el Software InfoStat versión 2020. Se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad mediante las técnicas inferenciales de Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente. Se calculó el coeficiente de variación y se realizó la prueba de Tukey al 5% de significancia para establecer si existen diferencias estadísticas en cuanto a los promedios (Blair & Taylor, 2008)

Correlación

Se realizará una correlación con respecto a la biomasa de pasturas y los tres modelos geoestadísticos de humedad gravimétrica en el suelo para esto se utilizó la fórmula de correlación de Pearson (Martin & Muñoz, 2017).

$$r_{xy} = \frac{\sum s_x s_y}{N}$$

Donde:

r_{xy} = Índice adimensional que indica la relación entre humedad del suelo y biomasa.

x = Valores de humedad del suelo.

y = índice de biomasa.

S_x = Desviación estándar de los valores de humedad del suelo.

S_y = Desviación estándar de los índices de biomasa.

N = Numero de datos.

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Resultados

En el presente trabajo se evaluaron diferentes características agronómicas de los pastos de interés en el estudio ubicadas en el Lote N° 19 de la Estación Experimental Santa Catalina del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, las variables evaluadas fueron altura, rendimiento de biomasa seca, así como también variables de física de suelos como densidad aparente, textura del suelo y humedad gravimétrica del suelo.

Altura

A continuación, se detalla en la tabla 9 los análisis de varianza y los promedios de la variable altura de planta para cada una de las especies en estudio, para lo cual se realizó un análisis Tukey (0.5) para cada una de las especies.

Tabla 9

Análisis de varianza y promedios de altura para las 9 especies en estudio.

Especie	Análisis de Varianza				Tukey		
	F.V	gL	F	p.valor	Tratamiento	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
Pasto Azul	Modelo	5	47.53	0.0001			
	Variedad	2	14.29	0.0052	T17(Quick draw)	25.67±1.33	a
	Corte	3	69.69	<0,0001	T18(Potomac)	22±1.05	b
	Error	6			T19(Baridana)	21.12±1.09	b
	Total	11					
	CV(%)	3.16%					

Especie	Análisis de Varianza				Tukey		
	F.V	gL	F	p.valor	Tratamiento	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
Ryegrass Híbrido	Modelo	6	40.13	<0,0001	T15(Bandito)	43.73±2.07	a
	Variedad	3	43.87	<0,0001	T14(Sabana)	30.22±1.05	b
	Corte	3	36.38	<0,0001	T26(Shugon)	26.95±1.05	b
	Error	9			T16(Tetralite)	28.62±1.16	b
	Total	15					
	CV(%)		2.67%				
Trébol Blanco	Modelo	4	25.70	<0,0001	T20(Ladino gigante)	18.12±1.38	a
	Variedad	1	11.21	0.0011	T21(Green)	22.33±0.94	b
	Corte	3	30.53	<0,0001			
	Error	3					
	Total	7					
	CV(%)		4.15%				
Trébol Rojo	Modelo	4	44.87	0.6312	T22(Dymaite)	26.68±1.14	a
	Variedad	1	0.05	0.2775	T23(Oregon)	26.47±1.16	a
	Corte	3	59.81	0.7766			
	Error	3					
	Total	7					
	CV(%)		3.34%				
Achicoria					Tratamiento	Promedio ± e.e.	CV(%)
					T24 Achicoria	27.88±1.31	3.6
Llantén					Tratamiento	Promedio ± e.e.	CV(%)
					T25 Llantén	19.48±1.16	4.6
Kikuyo					Tratamiento	Promedio ± e.e.	CV(%)
					T27 Llantén	15.70±1.01	4.9
Ryegrass Perenne	Modelo	8	58.63	<0,0001	T1(Albion)	23.05±1.26	a
	Variedad	5	23.93	<0,0001	T2(Tetraverde)	21.07±0.84	a
	Corte	3	116.48	<0,0001	T4(Premium)	22.78±0.98	a
	Error	10			T5(Suxyl)	21.08±1.15	a
	Total	26			T6(Duramas)	31.88±2.03	b
	CV(%)		3.3%		T3(Ohau)	28.62±1.08	b

Especie	Análisis de Varianza				Tukey		
	F.V	gL	F	p.valor	Tratamiento	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
Ryegrass Anual	Modelo	9	22.96	<0,0001			
	Variedad	6	17.52	<0,0001			
	Corte	3	33.85	<0,0001			
	Error	11					
	Total	29					
	CV(%)	2.9%					
					T8(Adrenalin)	34.55±1.34	a
					T13(Tetilia)	45.07±1.40	b
				T9(Max)	46.88±1.69	bc	
				T12(Gulf)	47.73±1.81	bc	
				T11(Austral)	50.65±1.38	bc	
				T10(Pichincha)	50.87±1.76	bc	
				T7(Magnum)	52.97±1.38	c	

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Los valores representados en el análisis de varianza para las 9 especies se encuentran divididas por cortes y por variedades, valores ($P \leq 0,01$) presentan diferencias altamente significativas, en cuanto a los valores promedios de cada variedad en estudio se muestra el valor promedio \pm error estándar y una prueba estadística Tukey (0,5) ordenadas de menor a mayor donde letras comunes no son estadísticamente diferentes.

Rendimiento

Pasto azul

En la Tabla 10 indica que las tres variedades de pasto azul en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes, pero no entre variedades.

Tabla 10

Análisis de varianza para el rendimiento de las variedades de Pasto azul

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	7	15.39	<0.0001
Variedad	2	2.04	0.1493
Repetición	2	0.18	0.8338
Corte	3	34.44	<0.0001

F.V	gl	F	p-valor
Error	28		
Total	35		
CV(%)	24.49%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 10) para la variable rendimiento de tres variedades de Pasto azul. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron los del corte 4 con 2346 kg * Ha⁻¹, mientras que el rendimiento más bajo fue en el corte 3 con 807.56 kg * Ha⁻¹.

Tabla 11

*Promedio de la variable rendimiento expresado en kg * Ha⁻¹ en los cuatro cortes para las variedades de pasto azul.*

Corte	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
3	807.67±81.92	a
2	1134.33±119.08	ab
1	1274.67±127.21	b
4	2346.00±123.29	c

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Ryegrass Híbrido

En la Tabla 12 indica que las cuatro variedades de pasto azul en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes y entre variedades.

Tabla 12

Análisis de varianza para el rendimiento las variedades de Pasto azul

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	8	10.18	<0.0001
Variedad	3	14.25	<0.0001
Repetición	2	1.04	0.3637
Corte	3	12.20	<0.0001

F.V	gl	F	p-valor
Error	39		
Total	47		
CV(%)	24.43%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 12) para la variable rendimiento de cuatro variedades de Ryegrass Híbrido. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron del tratamiento T15 (Bandito) con $2829.17 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue el tratamiento T26(Shugon) con $1594.17 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$.

Tabla 13

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ para las variedades de Ryegrass Híbrido.*

Tratamiento	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
T26(Shugon)	1594.17 ± 86.52	a
T14(Sabana)	1831.17 ± 142.23	a
T16(Tetralite)	1903.00 ± 110.56	a
T15(Bandito)	2829.17 ± 325.77	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 13) para la variable rendimiento de dos variedades de Ryegrass Híbrido. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron los del corte 4 con $2671.17 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue en el corte 3 con $1444.67 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$.

Tabla 14

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ de cuatro cortes para las variedades de Ryegrass Híbrido.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
3	1444.67 ± 70.74	a
2	1978.17 ± 80.92	ab
4	2063.50 ± 131.45	b
1	2671.17 ± 358.83	c

Trébol blanco

En la Tabla 15 indica que las cuatro variedades de trébol blanco en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes, pero no entre variedades.

Tabla 15

Análisis de varianza para el rendimiento en las variedades de Pasto azul

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	6	10.72	0.0001
Variedad	1	1.69	0.2111
Repetición	2	0.16	0.8532
Corte	3	20.77	<0.0001
Error	17		
Total	23		
CV(%)	24.83%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 15) para la variable rendimiento de dos variedades de trébol blanco. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron los del corte 1 con $2603.67 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue en el corte 2 con $705.00 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$.

Tabla 16

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ para los cuatro cortes de las variedades de trébol blanco.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
2	705.00 \pm 50.60	a
3	1614.00 \pm 156.52	b
4	2171.33 \pm 174.57	bc
1	2603.67 \pm 255.71	c

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Trébol rojo

En la Tabla 17 indica que las cuatro variedades de trébol rojo en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes y entre variedades.

Tabla 17

Análisis de varianza para el rendimiento en las variedades de Trébol rojo.

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	6	19.34	<0.0001
Variedad	1	34.34	0.2111
Repetición	2	0.70	0.8532
Corte	3	26.76	<0.0001
Error	17		
Total	23		
CV(%)	17.70%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 17) para la variable rendimiento de dos variedades de trébol rojo. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron en el tratamiento T23 (Oregon) con $3081.67 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue en el tratamiento T22(Dymaite) con $2107.17 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$.

Tabla 18

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ para los cuatro cortes de las variedades de trébol rojo.*

Tratamiento	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
T22 (Dymaite)	2107.17 ± 156.84	a
T23(Oregon)	3081.67 ± 315.33	b

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 18) para la variable rendimiento de dos variedades de trébol rojo. Los valores promedios de rendimiento más altos

alcanzados fueron en el corte 4 con $3611.67 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue en el corte 2 con $1591.67 \text{ kg} * \text{Ha}^{-1}$.

Tabla 19

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ para los cuatro cortes de las variedades de trébol rojo.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
2	1591.67 \pm 68.24	a
1	2287.67 \pm 187.95	b
3	2886.67 \pm 201.85	b
4	3611.67 \pm 459.34	c

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Achicoria

En la Tabla 20 se presenta los promedios resultantes de rendimiento de planta expresado en $\text{kg} * \text{Ha}^{-1}$ para la especie Achicoria.

Tabla 20

Promedio de la variable rendimiento en los cuatro cortes para la especie Achicoria

Tratamiento	Promedio \pm e.e.	CV(%)
T24	1674.90 \pm 41.02	7.74

En la Tabla 20 indica que la especie Achicoria en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes.

Tabla 21

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $kg * Ha^{-1}$ para los cuatro cortes de Achicoria.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
2	1132.40 \pm 18.82	a
3	1323.20 \pm 58.20	a
1	1892.00 \pm 6.93	b
4	2352.00 \pm 133.95	c

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Llantén

En la Tabla 22 se presenta los promedios resultantes de rendimiento expresado en $kg * Ha^{-1}$ de planta para la especie Llantén.

Tabla 22

Promedio de la variable rendimiento en los cuatro cortes para la especie Llantén

Tratamiento	Promedio \pm e.e.	CV(%)
T25	2461.09 \pm 58.07	6.12 %

En la Tabla 22 indica que la especie Llantén en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes.

Tabla 23

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $kg * Ha^{-1}$ para los cuatro cortes de Llantén.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
3	1168.00 \pm 104.92	a
2	2336.00 \pm 110.85	b
1	2960.00 \pm 46.19	c
4	3840.00 \pm 4.62	d

Kikuyo

En la Tabla 24 se presenta los promedios resultantes de rendimiento de planta para la especie Kikuyo.

Tabla 24

Promedio de la variable rendimiento en los cuatro cortes para la especie Kikuyo

Tratamiento	Promedio \pm e.e.	CV(%)
T27	2052.50 \pm 52.10	8.03

En la Tabla 24 indica que la especie Kikuyo en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes.

Tabla 25

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $kg * Ha^{-1}$ para los cuatro cortes de Kikuyo.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
1	554.00 \pm 17.32	a
2	712.00 \pm 49.15	a
4	765.33 \pm 16.97	a
3	1206.67 \pm 82.05	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Ryegrass perenne

En la Tabla 26 indica que las seis variedades de Ryegrass perenne en el análisis de varianza para la variable rendimiento de plantas de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre cortes y entre variedades.

Tabla 26

Análisis de varianza para rendimiento en las variedades de Ryegrass Perenne.

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	10	5.33	<0.0001
Variedad	5	4.30	0.0020
Repetición	2	0.02	0.9790
Corte	3	10.59	<0.0001
Error	61		
Total	71		
CV(%)	31.83%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 26) para la variable rendimiento de cuatro variedades de Ryegrass perenne. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron los del tratamiento T4 (Premium) con 2046.17 kg * Ha⁻¹, mientras que el rendimiento más bajo fue el tratamiento T2(Tetraverde) con 1121.00 kg * Ha⁻¹.

Tabla 27

*Promedio de la variable rendimiento expresado en kg * Ha⁻¹ para las variedades de Ryegrass perenne.*

Tratamiento	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
T2(Tetraverde)	1121.00±79.96	a
T5(Suxyl)	1489.63±184.55	ab
T6(Duramas)	1707.00±203.51	ab
T1(Albion)	1795.5±125.4	ab
T3(Ohau)	2031.33±348.89	b
T4(Premium)	2046.17±226.60	b

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla 28

*Promedio de la variable rendimiento expresado en $kg * Ha^{-1}$ de cuatro cortes para las variedades de Ryegrass perenne.*

Corte	Promedio \pm e.e.	Tukey (0,5)
2	1227.89 \pm 95.54	a
3	1399.89 \pm 110.15	ab
4	1934.87 \pm 171.13	bc
1	2297.78 \pm 208.40	c

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Ryegrass Anual

En la Tabla 29 indica que las siete variedades de Ryegrass Anual en el análisis de varianza para la variable rendimiento de planta de 4 cortes, presentan diferencias altamente significativas ($P \leq 0,01$) entre variedades.

Tabla 29

Análisis de varianza para rendimiento en las variedades de Ryegrass Anual

F.V	gl	F	p-valor
Modelo	11	17.41	<0.0001
Variedad	6	7.34	<0.0001
Repetición	2	0.08	0.9215
Corte	3	49.05	<0.0001
Error	72		
Total	83		
CV(%)	20.4%		

Al analizar la prueba de Tukey al 5% (Tabla 29) para la variable rendimiento de cuatro variedades de Ryegrass perenne. Los valores promedios de rendimiento más altos alcanzados fueron del tratamiento T7 (Magnum) con $3067.50 kg * Ha^{-1}$, mientras que el rendimiento más bajo fue el tratamiento T13(Tetilia) con $1968.50 kg * Ha^{-1}$.

Tabla 30

Promedio de la variable rendimiento en las siete variedades de Ryegrass Anual

Tratamiento	Promedio ± e.e.	Tukey (0,5)
T13(Tetilia)	1968.50±172.23	a
T12(Gulf)	2229.67±332.76	a
T10(Pichincha)	2398.00±289.85	ab
T8(Adrenalin)	2424.33±98.11	ab
T9(Max)	2544.00±215.81	abc
T11(Austral)	3035.67±207.45	bc
T7(Magnum)	3067.50±342.88	c

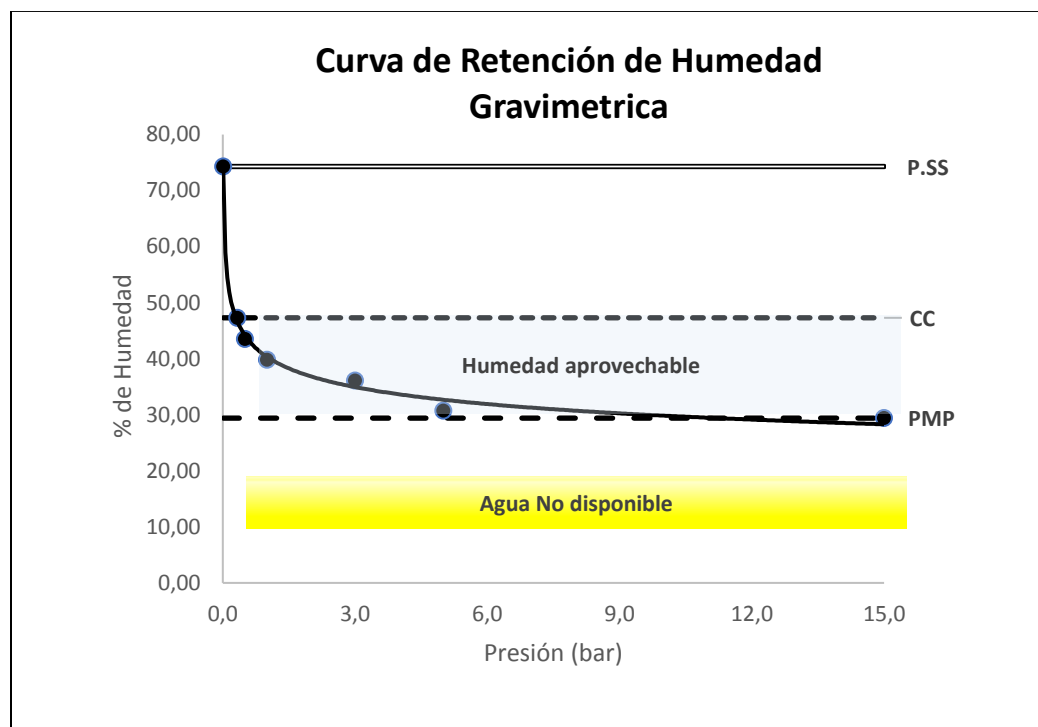
Nota. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)*

Curva de retención de Humedad del suelo

En la figura 10 se detalla la curva de retención de humedad con los 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, a una presión de 0.33 bares la humedad gravimétrica del suelo es 74.30% representando al punto de saturación del suelo en estudio, a una presión de 0.50 bares la humedad gravimétrica del suelo es 47.3% representando a la capacidad de campo del suelo en estudio y a una presión de 15 bares la humedad gravimétrica del suelo es 30.70% representando al punto de marchitez permanente. La humedad aprovechable se refiere a la cantidad de agua que se encuentra disponible entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo, mientras que el agua no disponible para las plantas es la que se encuentra por debajo del punto de marchitez permanente.

Figura 4

Curva de retención de humedad del suelo en estudio



Textura del suelo y densidad aparente

Los valores obtenidos en el análisis de laboratorio para textura del suelo y densidad aparente son los siguientes.

Tabla 31

Resultados de laboratorio para determinación de Textura de suelo y densidad aparente.

Textura (%)				
Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Da ($g * cm^3$)
43	43	14	Franco	1.43

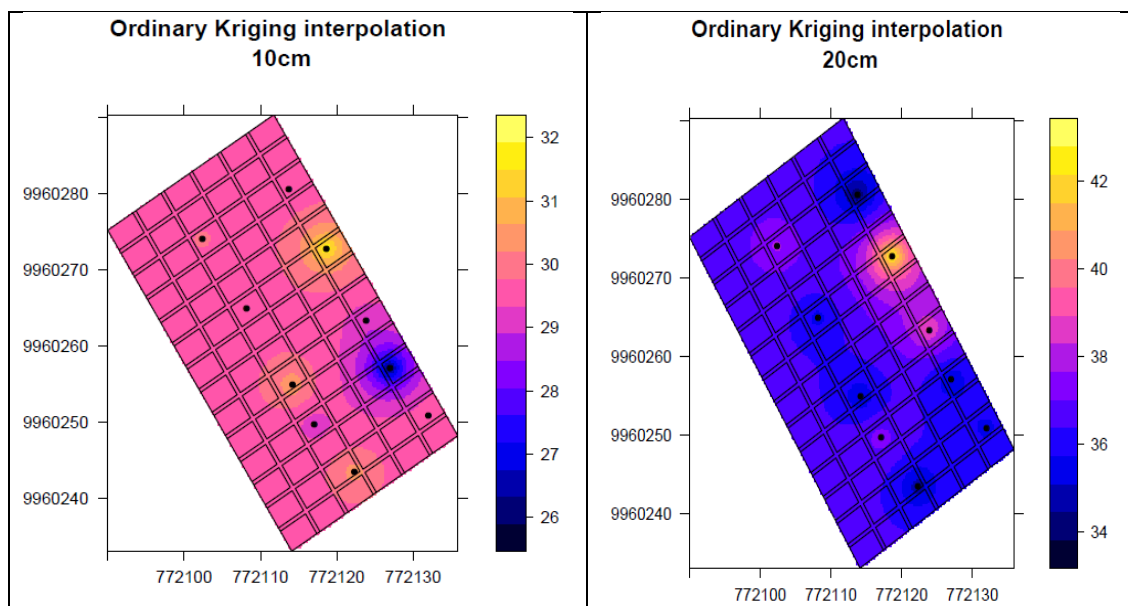
El análisis resultante del laboratorio nos muestra como resultado que el suelo en estudio presenta 43% de Arena, 43% de Limo y 14% de Arcilla por lo cual tiene una clase textural franco con una densidad de $1.43 \text{ g} * \text{cm}^3$.

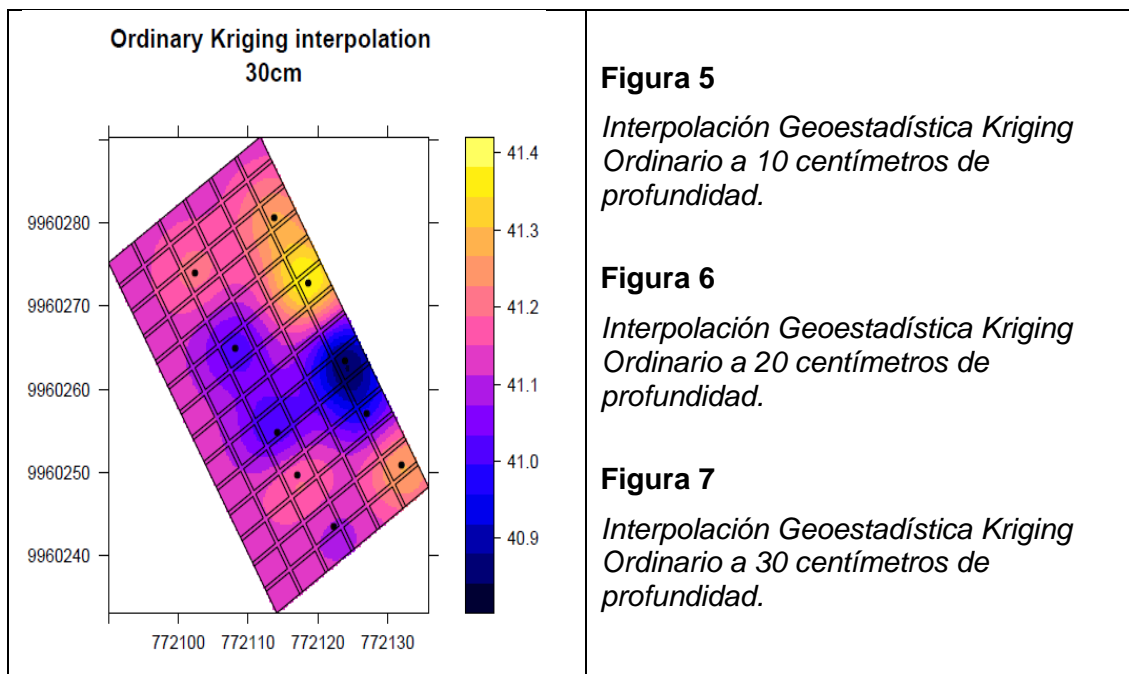
Interpolaciones Geoestadísticas

En las figuras se representa gráficamente las interpolaciones realizadas en el programa de software estadístico R, donde se puede observar los rangos de humedad al lado derecho de la figura representado con colores que van desde el amarillo, zona con menor humedad, hasta un color azul intenso que representa zonas con alta humedad, los gráficos fueron elaborados con los tres interpoladores y para las tres profundidades de interés 10 cm, 20 cm y 30 cm dentro de las 81 parcelas experimentales. En los ejes X y Y del grafico se representan las coordenadas georeferenciadas del área de estudio.

Kriging Ordinario

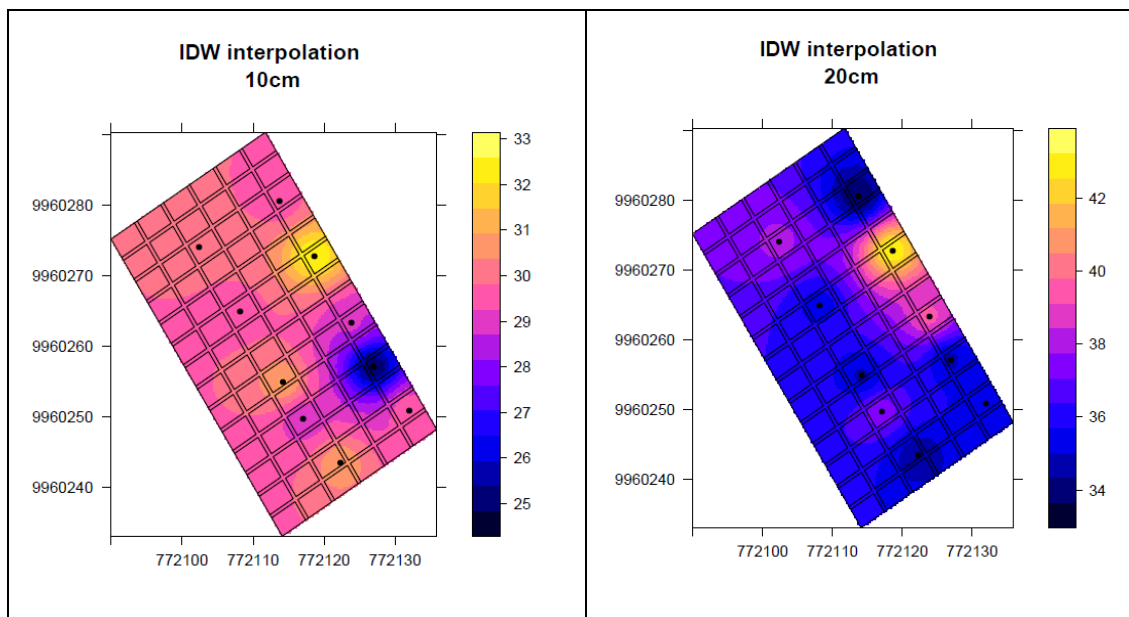
Figura 5-7

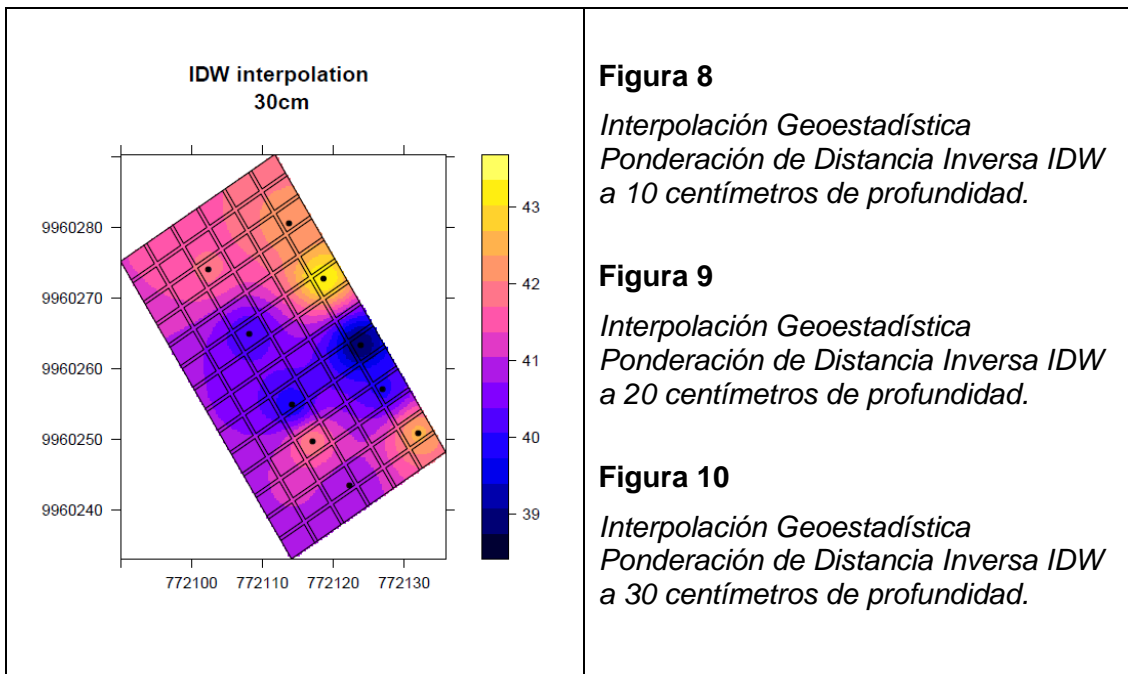




Ponderación de Distancia Inversa IDW

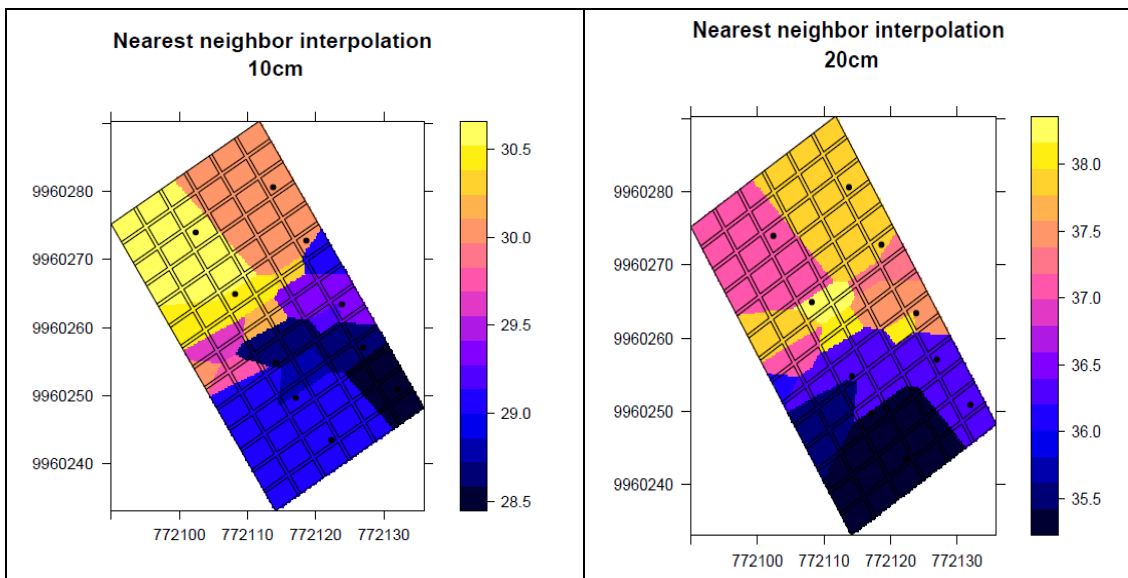
Figura 8-10

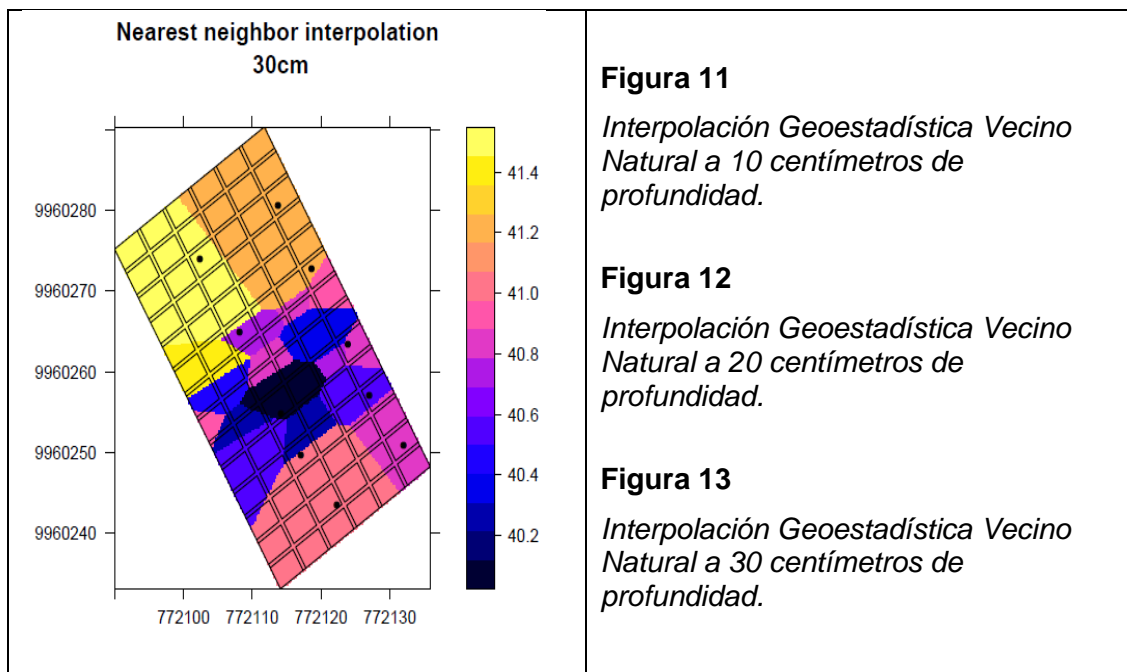




Vecino Natural

Figura 11-13



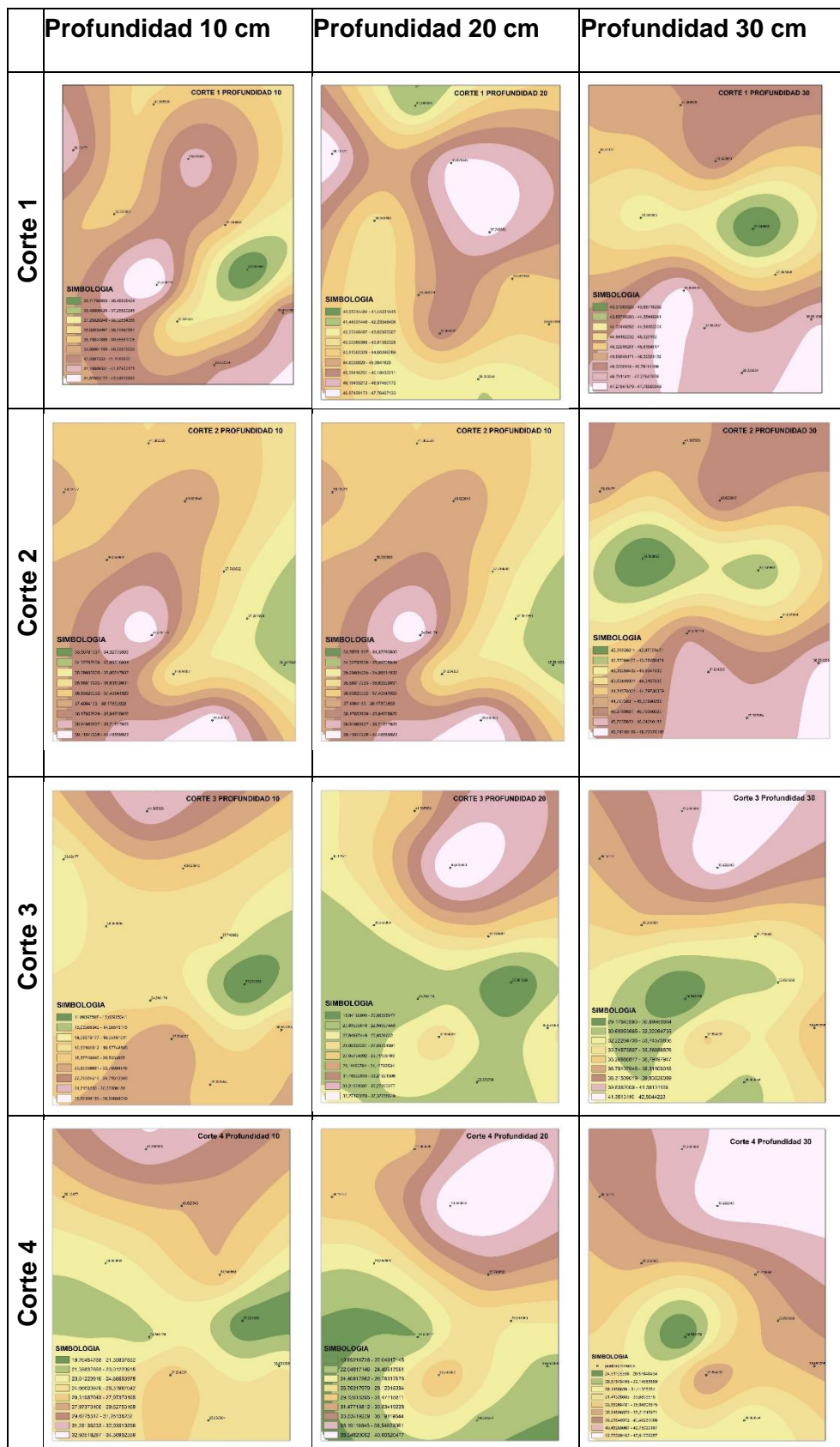


Mapas de distribución de Humedad

En las siguientes figuras se muestra los mapas de humedad resultantes de las humedades gravimétricas en los cuatro cortes del cultivo de las 9 especies forrajeras de interés, se indica la humedad promedio expresada en porcentaje en el punto de medición y su distribución a lo largo de las parcelas en estudio.

Figura 14

Mapas de distribución de humedad gravimétrica por corte y profundidad



Correlaciones

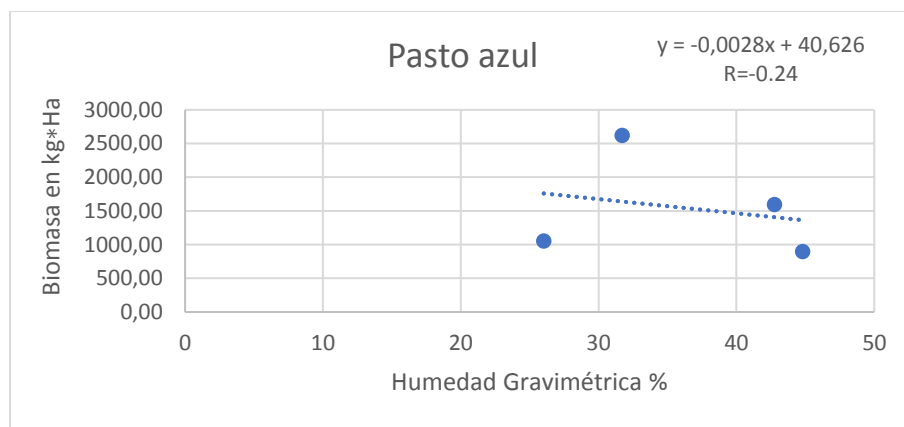
En las figuras 15-21 se muestra las correlaciones existentes entre la producción de Biomasa de las especies de Pastos donde el valor de R representa la correlación existente entre la biomasa y la humedad gravimétrica que puede ser positiva, negativa y dentro de esta clasificación débil, moderada y fuerte.

Pasto Azul

En la figura 15 se muestra que la correlación existente entre la especie Pasto Azul y la humedad Gravimétrica del suelo es negativa e irrelevante.

Figura 15

Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de la especie pasto azul

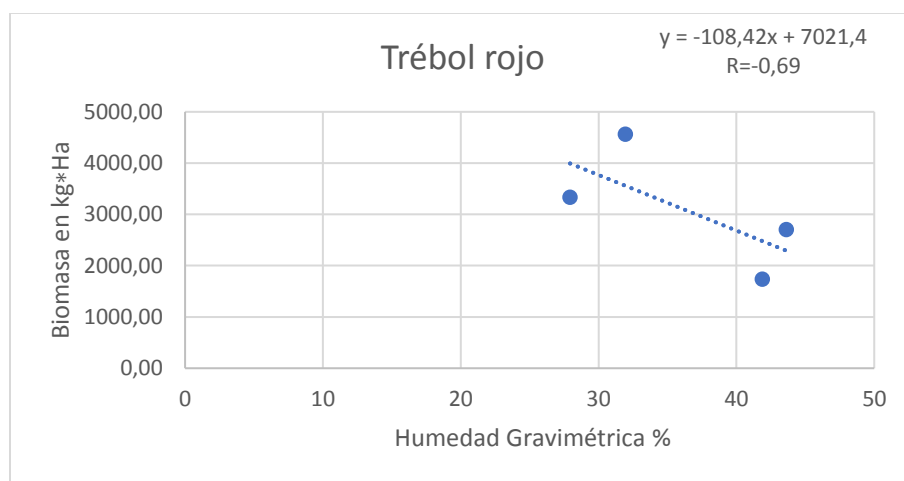


Trébol Rojo

En la figura 16 se muestra que la correlación existente entre la especie Trébol rojo y la humedad Gravimétrica del suelo es negativa e irrelevante.

Figura 16

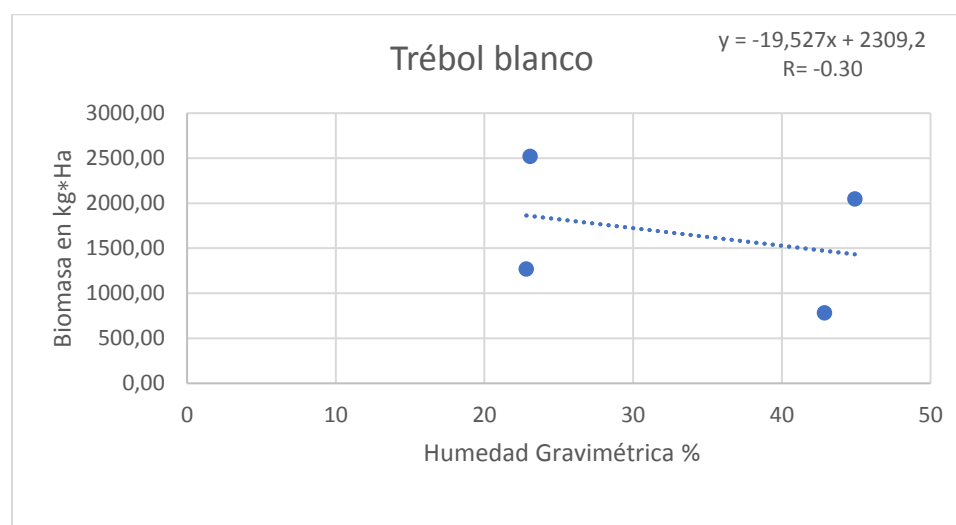
Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Trébol Rojo

**Trébol Blanco**

En la figura 17 se muestra que la correlación existente entre la especie Trébol Blanco y la humedad Gravimétrica del suelo es negativa e irrelevante.

Figura 17

Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Trébol Blanco

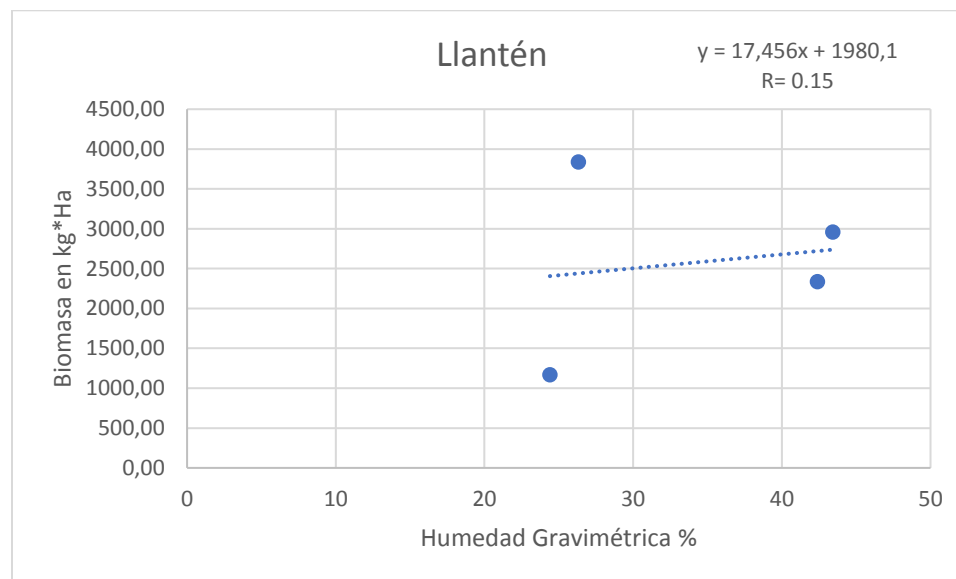


Llantén

En la figura 18 se muestra que la correlación existente entre la especie Llantén y la humedad Gravimétrica del suelo es positiva y con una correlación débil.

Figura 18

Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Llantén

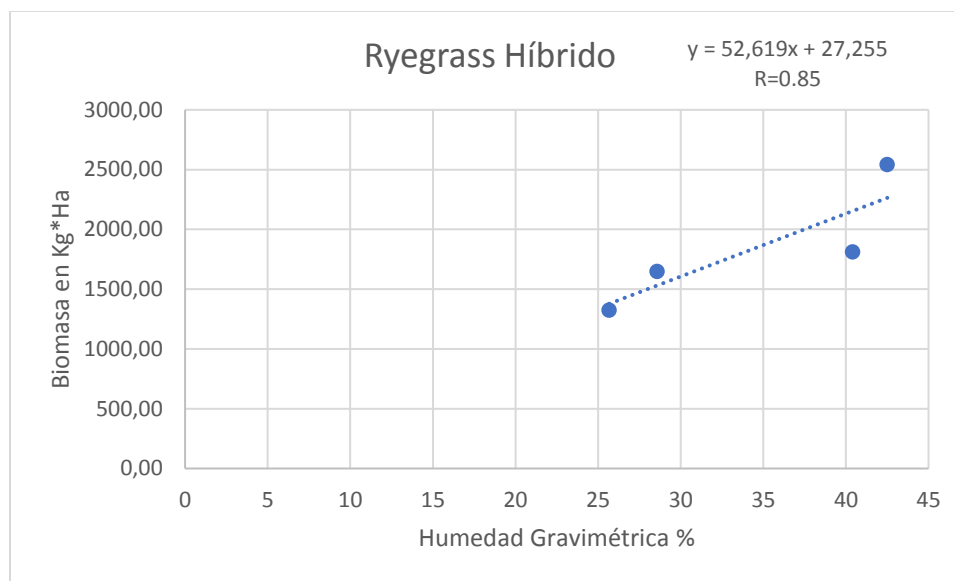


Ryegrass Híbrido

En la figura 19 se muestra que la correlación existente entre la especie Ryegrass Híbrido y la humedad Gravimétrica del suelo es positiva y con una correlación fuerte.

Figura 19

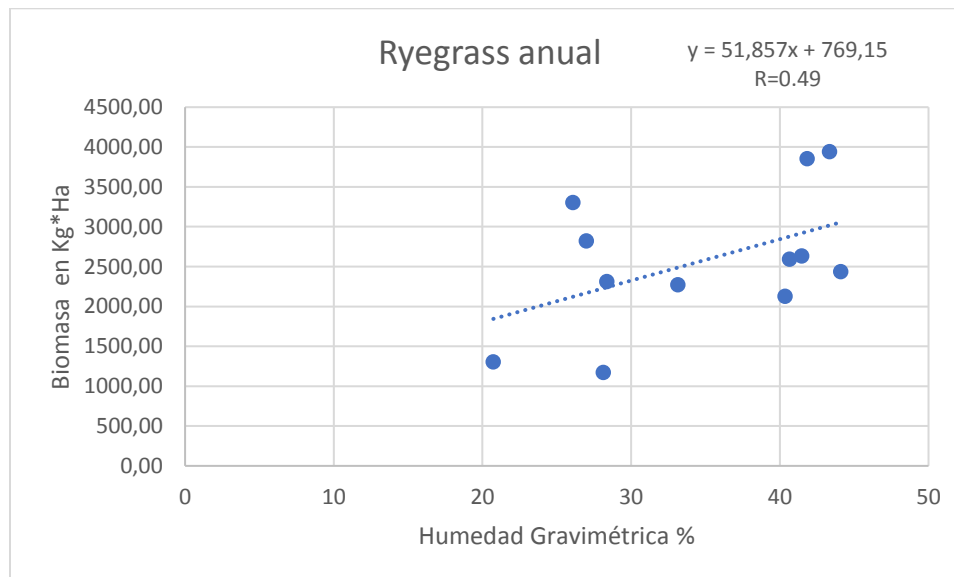
Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Ryegrass Híbrido

**Ryegrass Anual**

En la figura 20 se muestra que la correlación existente entre la especie Ryegrass Anual y la humedad Gravimétrica del suelo es positiva y con una correlación moderada.

Figura 20

Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Ryegrass Anual

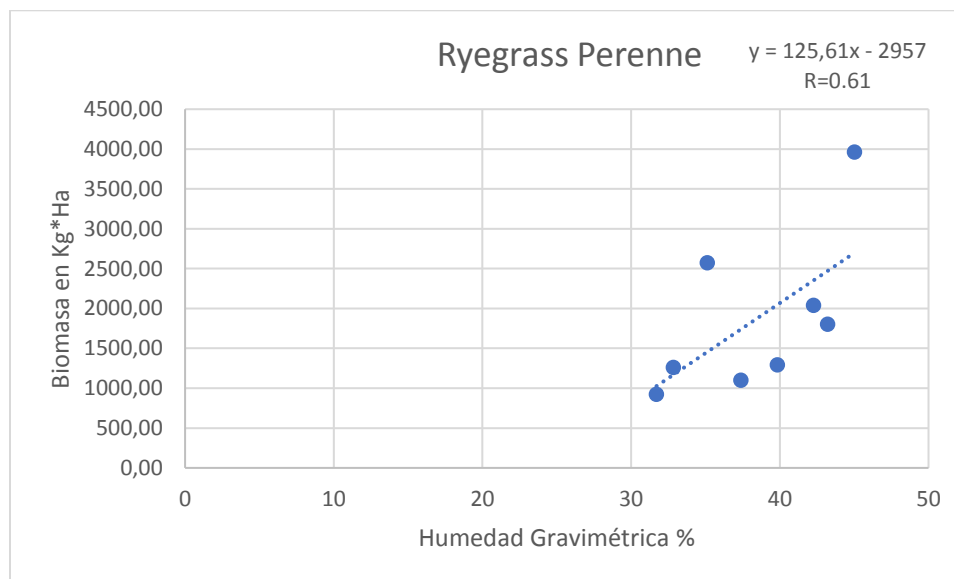


Ryegrass Perenne

En la figura 21 se muestra que la correlación existente entre la especie Ryegrass Perenne y la humedad Gravimétrica del suelo es positiva y con una correlación fuerte.

Figura 21

Correlación de Pearson entre humedad gravimétrica y Biomasa de Ryegrass Perenne

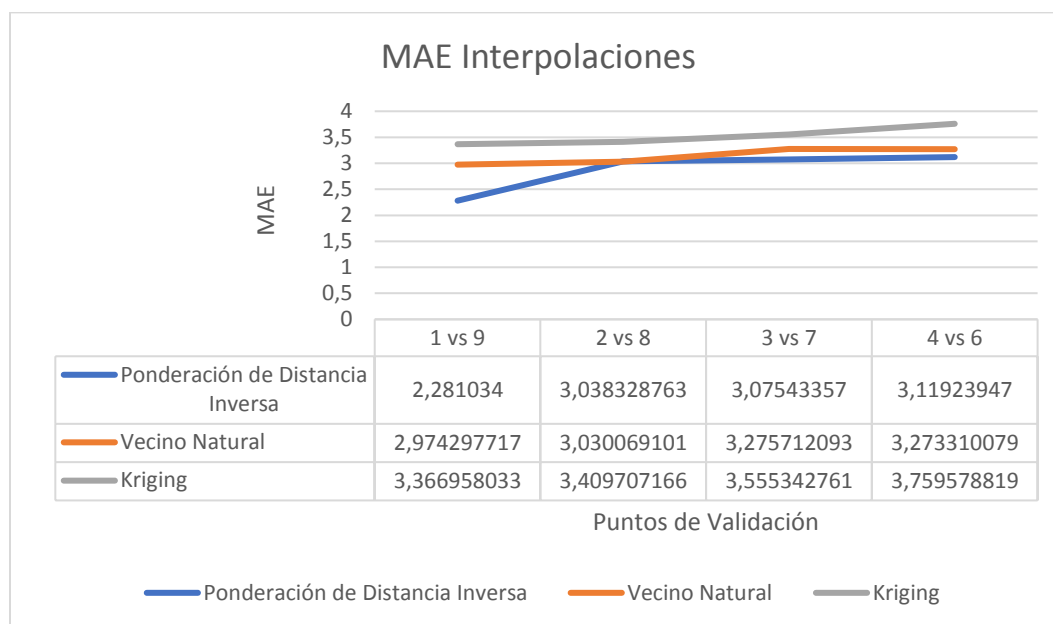


Error Cuadrático medio

A continuación, se presenta en el gráfico los métodos interpoladores con su respectivo valor del error cuadrático medio que permitió elegir al mejor método geoestadístico para determinar la cantidad de biomasa de pasturas.

Figura 22

Gráfico de curvas de error absoluto promedio



El gráfico representa los valores de error absoluto promedio en los 4 puntos de validación obteniendo como resultados el valor promedio para Kriging: 3.52, para Vecino Natural: 3.13 y para ponderación de Distancia inversa IDW: 2.87 siendo el último interpolador mencionado el que obtuvo menor error en relación a los otros métodos geoestadísticos interpoladores.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Con los modelos geoestadísticos pudimos determinar acertadamente la biomasa de pasturas de interés Agropecuario.

Los métodos de Interpolación geoestadística Kriging, Ponderación de Distancia Inversa y Vecino natural fueron validados gráficamente y con curva del error absoluto promedio siendo el interpolador Ponderación de Distancia Inversa IDW el que mejor describe la distribución de humedad en el área de estudio debido a que el error absoluto promedio fue menor que en las interpolaciones Kriging y Vecino Natural.

Se realizó la curva de retención de humedad gravimétrica del suelo obteniendo valores de 74.3 % para punto de saturación, 43.5% para capacidad de campo y 30.7 % para punto de marchitez permanente, con esto se puede decir que la humedad aprovechable para pastos en esta zona de estudio se encuentra entre 30.7% y 43.75% de humedad gravimétrica dentro de suelos que tienen una textura franca.

Se generó mapas de distribución de humedad a partir de los datos obtenidos mediante la sonda FDR (Divinner 2000), los mapas fueron realizados durante los 4 cortes obtenidos por las 9 especies de pastos y 27 variedades dentro de ellas y las profundidades utilizadas fueron 10, 20 y 30 centímetros. Se realizó mapas de distribución con los tres interpoladores y con las tres profundidades de interés.

La correlación existente entre biomasa y la humedad gravimétrica del suelo es Positiva y muy fuerte en las especies Ryegrass Híbrido y Ryegrass perenne. La correlación es positiva y moderada para la especie Ryegrass Anual. La correlación es positiva y débil para la especie de Llantén. Mientras que la correlación se presenta negativa e irrelevante para las especies de Trébol rojo, Trébol Blanco y Pasto Azul. Con esto se puede decir que se puede obtener el dato de biomasa mediante la ecuación lineal obtenida en la correlación en las especies de Llantén, Ryegrass Híbrido, Ryegrass Perenne y Ryegrass anual pero no en Trébol Blanco, Trébol Rojo y Pasto Azul.

Recomendaciones

Realizar el estudio en diferentes pisos climáticos para obtener diferentes mapas de distribución dependiendo de la altura y del tipo de suelo que se presente.

Probar otro tipo de especies de interés Agropecuario para generar datos de biomasa a partir de la humedad gravimétrica del suelo.

Utilizar otro tipo de sondas de medición para comparar con otros métodos de obtención de humedad gravimétrica del suelo y analizar costos y eficiencia en los distintos métodos.

Incluir más variables como fertilización, dotación de riego para que el modelo sea más eficiente.

Bibliografía

- Álvarez, R., Álvarez, C., Fernández, P., Steinbach, H., De Paepe, J., Rubio, G., .
Logegaray, V. (2015). Fertilidad de Suelos y Fertilización en la Región
Pampeana.
- Blair, C., & Taylor, R. (2008). *Bioestadística*. Pearson.
- Borges, J., Barrios, M., Sandoval, E., Bastardo, Y., & Marquez, O. (2012).
Características físico-químicas del suelo y su asociación con macroelementos en
áreas destinadas a pastoreo en Yaracuy. *Bioagro*, 24(2). Obtenido de
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-
33612012000200006](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612012000200006)
- Calvache, M. (2011). Aplicaciones de las Sondas Electromagnéticas y de Neutrones en
la Ingeniería Agrícola.
- Cañadas, L. (1983). El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador . *MAGPRONAREG*.
- Capraro, F., Tosetti, S., & Serman, F. (2010). Laboratorio Virtual y Remoto para Simular,
Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos. *Revista
Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7, 73-84. Obtenido
de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791210700108>
- Chavez, L., Sandoval, M., Cohen, I., Echavarría, F., Velasquez, M., & Santos, A. (2018).
Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de
dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. y *Chloris gayana*
Kunth. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4). doi:10.22319
- Ciancaglini. (2009). Guía para la determinación de textura de suelos por método
organoléptico. *INTA*.

- Conesa, C., & Bautista, J. (2004). Métodos cuantitativos y técnicas de información geográficas. *Territorio y medio ambiente*, 42-44.
- Cruzatty, L., & Vollman, J. (2012). Caracterización de suelos a lo largo de un gradiente altitudinal en Ecuador. (U. F. Pernambuco, Ed.). *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 456-464. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119024529014.pdf>
- FAO. (2006). Textura de suelos. Obtenido de http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#top
- FAO. (2009). Base referencial mundial del recurso suelo. *Centro internacional de referencia e información de Suelos*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/w8594s/w8594s.pdf>
- FAO. (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. *Participación del Fondo Internacional para el Desarrollo de la Agricultura (FIDA) y la Cooperación Suiza*, 224-228. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>
- FAO. (2018). Compactación del suelo. *Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/i6473s/i6473s.pdf>
- Fox, D. (1981). Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 62(5), 599-609.
- Frías, C., & Salgado, R. (2016). Conceptos Básicos de las Relaciones Agua-Suelo-Planta. *Revista divulgativa Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero*. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta-_conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua_suelo_planta.pdf

- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos. *Pastos y Forrajes*, 35(2). Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001
- Gómez, A. (2000). Variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad del suelo en una zona mediterránea semiárida, efectos de las condiciones antecedentes en la respuesta hidrológica. *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=2948>
- INAMHI. (2020). Geoinformación Hidrometeorológica.
- INIA. (2015). Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas Tacuarembó. *Semana de la ciencia y la tecnología*. Obtenido de <http://inia.uy/Documentos/P%C3%BAblicos/INIA%20Tacuaremb%C3%B3/2015/EI%20Suelo%2020%20de%20mayo.pdf>
- Largaespada, K., & Henríquez, C. (2015). Distribución espacial de la humedad y su relación con la textura en un suelo. *Agronomía Costarricense*, 39(3), 137-147. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/436/43642604010/movil/>
- León, G., Montes, B., Hernández, A., & Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Investigaciones geográficas*, 93(1). doi:<https://doi.org/10.14350/rig.54706>
- León, R., Bonifaz, N., & Gutiérrez, F. (2018). *Pastos y forrajes del Ecuador. Siembra y producción de pasturas*. Quito: Universitaria Abya-Yala. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19019/5/2018%20PASTOS%20Y%20FORRAJES%20DEL%20ECUADOR.pdf>

- Llorens, P., Latron, J., & Gallart, F. (2003). Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea. Cuencas experimentales de Vallcebre(Alto Llobregat). *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 6.
- Martin, E., & Muñoz, C. (2017). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. *Tucson: College of Agriculture, University of Arizona*.
Obtenido de
https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/625275/az1220s-2017_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martin, E., & Muñoz, C. (2017). *Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego*. Tucson: College of Agriculture, University of Arizona.
Obtenido de
https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/625275/az1220s-2017_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Medina, C., Bautista, G., & Salvador, R. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos*, 22(2). Obtenido de doi:<http://passthrough.fw-notify.net/download/627651/http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v22n2/0121-3709-rori-22-02-00141.pdf>
- MIDENA. (2013). Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000. Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE). Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/suelos/PM2-P128.pdf>
- Monroy, L., Alvarez, J., & Alvarado, O. (2017). Distribución espacial de propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja tunguavita, Paipa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 91-100. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v20n1/v20n1a11.pdf>

- Moral, F. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. (A. E. Terrestre, Ed.). *Ecosistemas*, 13(1), 78-86. Obtenido de <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/582/550#:~:text=Como%20ejemplo%20de%20aplicaci%C3%B3n%20de,plaga%20en%20una%20parcela%20experimental.&text=En%20la%20naturaleza%2C%20las%20variables,encontrar%20un%20patr%C3%B3n%20de>
- Morla, F. (2016). CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA SONDA DE CAPACITANCIA (FDR) EN HAPLUSTOLES TÍPICOS DEL DEPARTAMENTO DE RÍO CUARTO. *Researchgate*, 1-9. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/305850843>
- Núñez, J. (2017). Perfil alimentario y plan de pastoreo para la producción lechera con pasturas. Lima, Perú. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2911/L02-N85-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ortiz, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo. *Utmach*. Obtenido de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/10690/1/FUNDAMENTOS%20Y%20PROCEDIMIENTOS.pdf>
- Padda, G., Fernández, J., & Cordero, R. (2017). Morfología del suelo. *Edafología Facultad de agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de Túcumán*.
- Parra, R., Alvarado, S., Valverde, F., & Yamil, C. (2019). Protocolo y prácticas de físicas. *INIAP*.
- PSE. (2017). Introducción a los suelos. *Penn State Extension*. Obtenido de <https://extension.psu.edu/introduction-to-soils-soil-quality>
- Rodríguez, K. (2017). Análisis físico de suelo (Determinación de la humedad gravimétrica). *Informe de laboratorio de geología y suelos tropicales*.

- Rucks, L., Kaplan, A., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. *Solim workshop*.
Obtenido de <http://www.fagro.edu>.
- Salazar, V., Escobosa, M., Ceceña, C., Román, J., Avilés, S., Nuñez, F., & Soto, R. (2016). Evapotranspiración *Gossypium hirsutum* L. en el valle de Mexicali. *Agroproductividad*, 63-65. Obtenido de <http://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/748/614>
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal*. Roma. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=K-JwJZw1hMwC&oi=fnd&pg=PP10&dq=humedad+del+suelo&ots=giqVeawq_H&sig=MRc7cgDnDLdpwUKs-_CY_5Ffw4#v=onepage&q&f=true
- SIGTIERRAS. (2017). Memoria explicativa del Mapa de Órdenes de Suelos del Ecuador. *Quito: Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica*. Obtenido de http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/MEMORIA_MAPA_DE_ORDENES_DE_SUELOS_MAG_SIGTIERRAS.pdf
- Solano, E., López, E., Castellanos, S., Rodríguez del Rey, M., & Hernández, J. (2009). La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *Revista Científica de las Ciencias Médicas en Cienfuegos*, 7(4), 59-62.
- Soto, F., & Gonzáles, M. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 517-534.
- Valero, M. (2011). Régimen hídrico del suelo y evapotranspiración en áreas agrícolas y forestales. *Universidad de Coruña*, 34-36. Obtenido de <https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Paz->

Gonzalez/publication/315072349_Regimen_hidrico_del_suelo_y_evapotranspiracion_en_areas_agricolas_y_forestales_Soil_water_regime_and_evapotranspiration_of_agricultural_and_forestry_areas/links/58c971f192851c

Villatoro, M., Henriquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los Interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial del pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.

<https://drive.google.com/drive/folders/1TzQ0FjgpHr6sUSaC9CVRgRQiDOcegH3H?usp=sharing>