



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Desarrollo de un modelo de estimación geoestadístico para la 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 Ph.D

03 de agosto del 2022





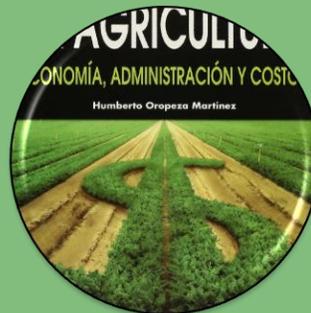
En el territorio Ecuatoriano, el sector agropecuario constituye uno de los principales motores rentables de la economía, el cual depende del suelo como recurso indispensable de producción.

Un suelo apto para condiciones agrícolas tendrá una densidad aparente entre : 1.14 - 1.39 g/cm<sup>3</sup>; 16.2% para humedad gravimétrica, oscilando entre valores de 33 % en capacidad de campo y 13 % en punto de marchitez permanente.



Las técnicas de laboratorio y toma de datos en campo se han ido innovando con el uso de nuevas tecnologías como la geoestadística, Permiten predecir valores que tendrá una variable analizada en toda la superficie.

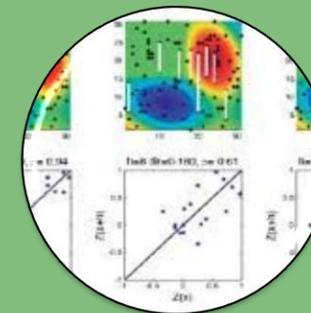




Las actividades de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca aportan al PIB nacional el 9,63% con \$9.626.014 dólares.



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.



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

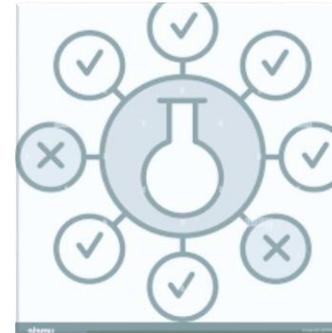


Desarrollar un modelo de estimación geoestadístico para la densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica de suelos usados para pastoreo en la Estación Santa Catalina INIAP

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



- **H<sub>0</sub>**: Las propiedades físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) de suelos no se pueden estimar con modelamientos geoestadísticos.
- **H<sub>1</sub>**: Las propiedades físicas (densidad aparente, humedad gravimétrica y volumétrica) de suelos se pueden estimar con modelamientos geoestadísticos.

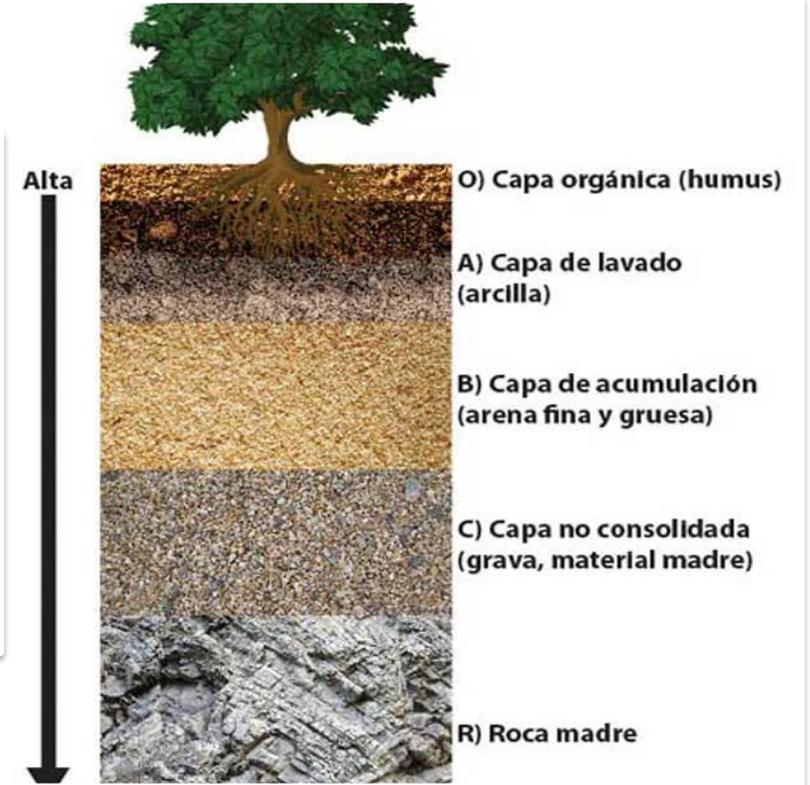
## Definición de Suelo Agrícola

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



## 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



## •Densidad aparente

•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 de 1.32 y suelos orgánicos o suelos volcánicos tienen densidades menores a 1.0 g/cm<sup>3</sup>



## •Color

•Está influido por el contenido de materia orgánica, el material parental, el clima, el drenaje y la aireación.



## •Compactación

•Incremento en densidad y disminución de macro-porosidad en el suelo que impide la penetración de las raíces, el agua y el intercambio gaseoso.



## •Conductividad Hidráulica

•Cantidad de agua que se desplaza por medio de un suelo, en un determinado tiempo.



## Curva de retención de humedad



### •Humedad gravimétrica

- Es la relación entre la masa de la fracción líquida (agua o solución) y la masa de la fracción sólida; el contenido de humedad del suelo es muy variable y dinámica



### •Humedad volumétrica

- Es la relación entre el volumen de la fracción líquida (agua o solución) y el volumen de la muestra; el contenido volumétrico de humedad del suelo es, en promedio, alrededor del 25% del volumen del suelo



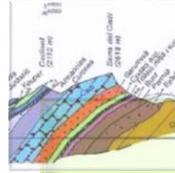
La Geoestadística es la rama de la Estadística que se centra en predecir la distribución espacial de variables continuas asociadas a fenómenos cuantificables (Oliver, 2010). De acuerdo con (González & Vargas, 2009), todo análisis geoestadístico involucra la aplicación de tres etapas:

## Análisis exploratorio de datos (AED)



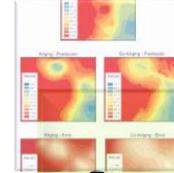
- Es la recolección de los datos muestrales sin tener en consideración su distribución geográfica
- Distribución de conjuntos de datos

## Análisis estructural.



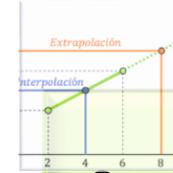
- En esta etapa se procede a estudiar la continuidad de la variable mediante el variograma

## Predicción espacial.



- Se realizan estimaciones de la variable de estudio en localizaciones donde no se realizó muestreo o puntos no observados

## Validación del modelo



- Separa el conjunto de datos disponibles en dos subconjuntos, uno utilizado para el entrenamiento del modelo y otro para realizar el test de validación



Ubicación del lugar de investigación



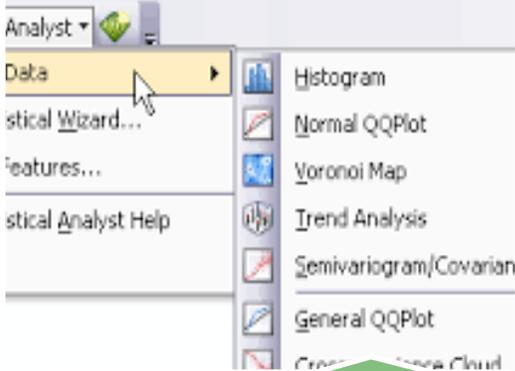
Equipos de Laboratorio



Equipos de campo

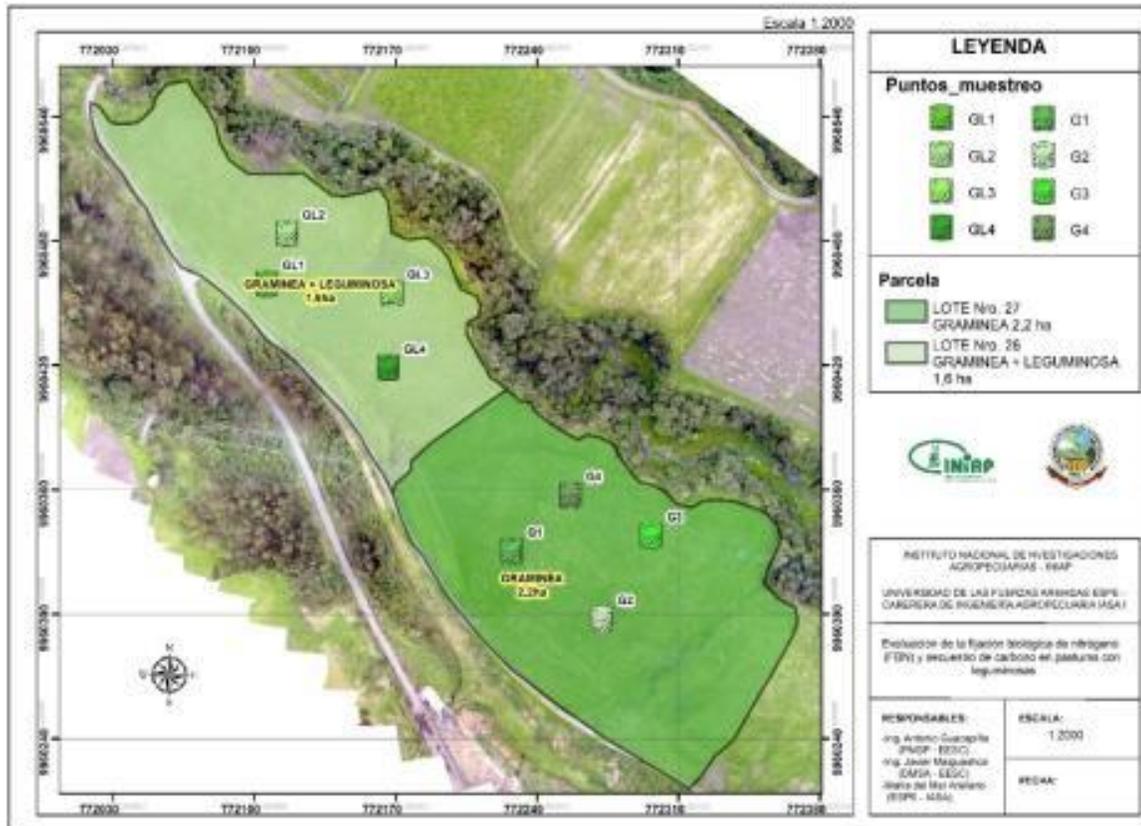


Materiales de campo



Software

## Delimitación de área de estudio



## Evaluación propiedades físicas del suelo

### Color

- Se caracterizará mediante las tablas de color Munsell que incluyen todos los matices del rango visible del espectro electromagnético

### Compactación

- Se evaluará con el penetrómetro de lectura directa FieldScout SC-900 Digital, en el cual los resultados se expresarán en PSI

### Curva de retención de humedad del suelo

- Se procesará de acuerdo a la metodología de las ollas de Richards

## Conductividad Hidráulica

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

## Humedad Gravimétrica

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

## Densidad aparente

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

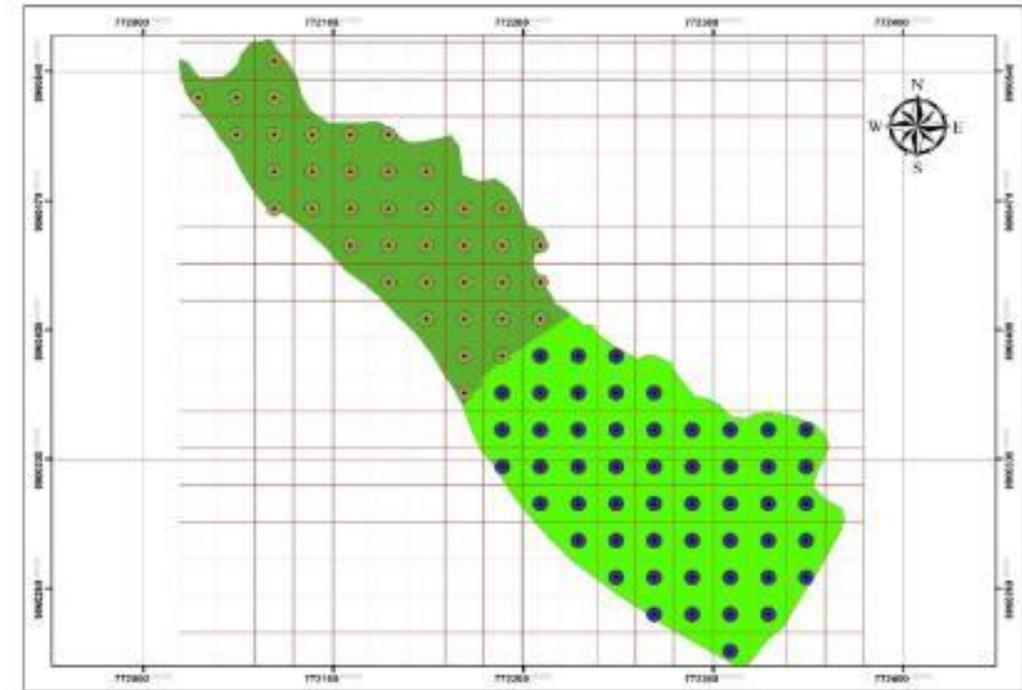
## Humedad Volumétrica

$$\%H_v = D_a * H_g$$

## Rendimiento

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

## Análisis Geoestadístico



Este método estimará valores desconocidos al momento de especificar la distancia de búsqueda, puntos más cercanos.

Se realizará asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa

## Ponderación de distancia inversa

Es un método de inferencia espacial lineal no sesgado con una varianza mínima.

- Kriging ordinario
- Kriging simple
- Kriging de punto
- Kriging de bloque

## Kriging

En donde:

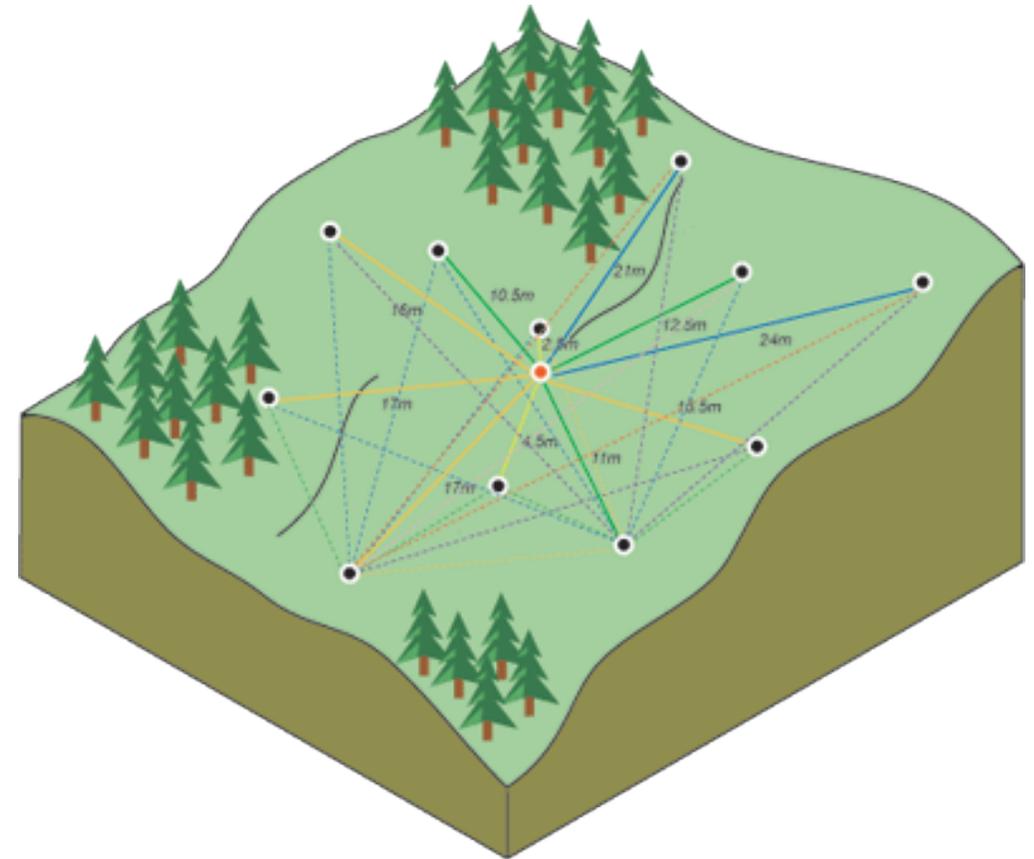
$P_i$ = Valores Predichos

$O_i$ = Valores Observados

$N$ = número de muestras

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

## Cálculo del error



## Color (Tabla Munsell)



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, color pardo oscuro, de textura franco-arcillosa, característico del orden Andisols; que de acuerdo a lo explicado por (Jiménez, Mezquida, & Rubio, 2008) se encuentran dentro de los rangos de matiz YR, describiendo como suelos franco, franco-arcilloso.

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, color gris muy oscuro; que según lo descrito por (Pozo, 2016), los colores negros u oscuros revelan un alto contenido de materia orgánica.

Munsell Munsell  
7.5yr 3/2 vs 10yr 3/2

Munsell Munsell  
10yr 3/1 vs 10yr 5/1



## Conductividad Hidráulica



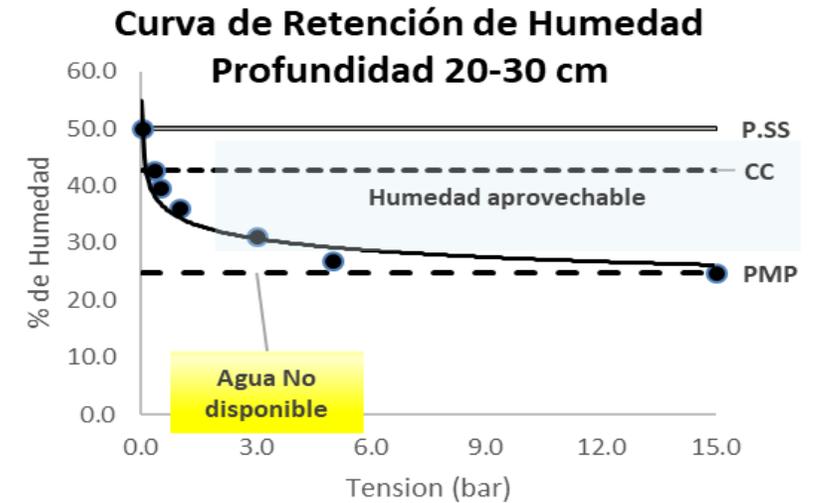
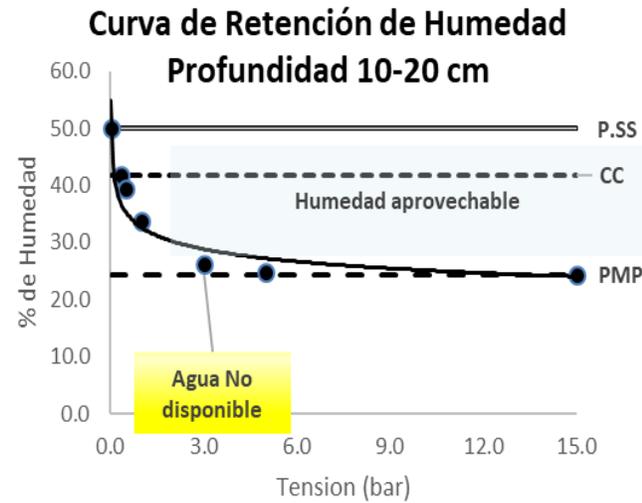
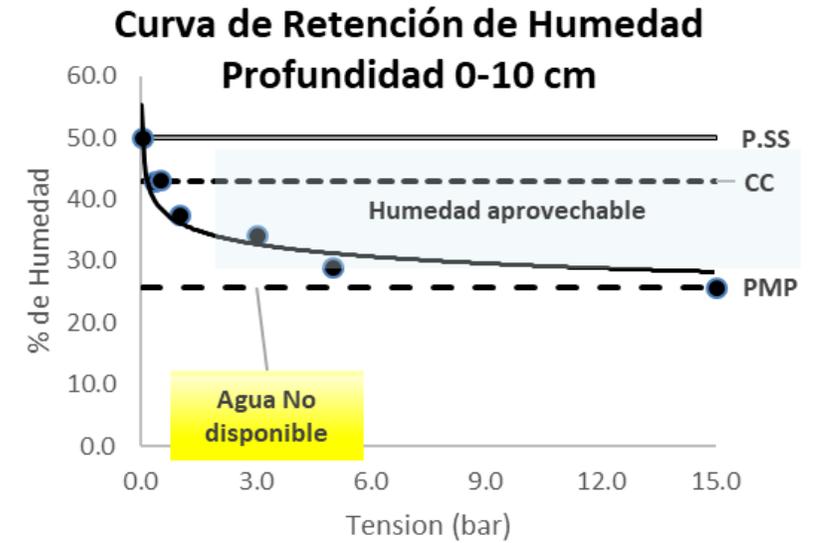
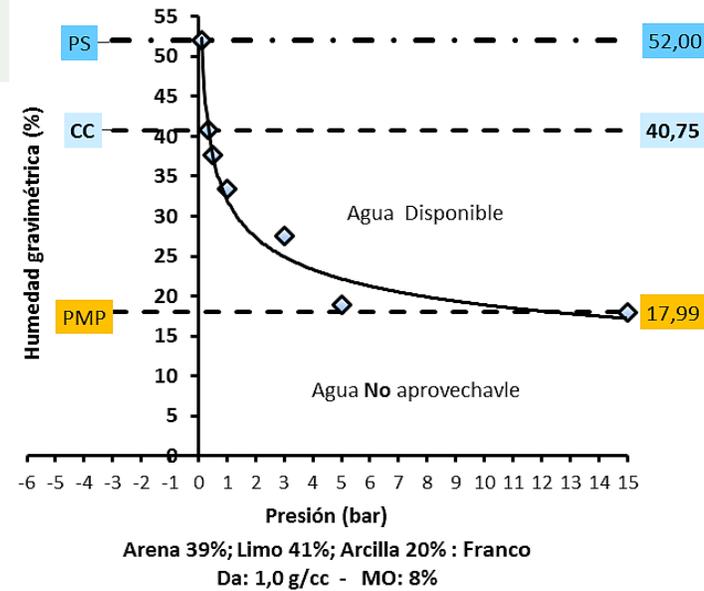
Velocidad	Descripción	Capacidad retención
25.4	Muy rápido	Baja
25,4 - 12,4	Rápida	Poco Satisfactoria
12,4 - 6,3	Moderadamente Rápida	Satisfactoria
6,3 - 2,0	Moderada	Muy adecuada
2,0 - 0,5	Moderadamente Lenta	Adecuada

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.

De 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 %).



# Curva de Retención de Humedad



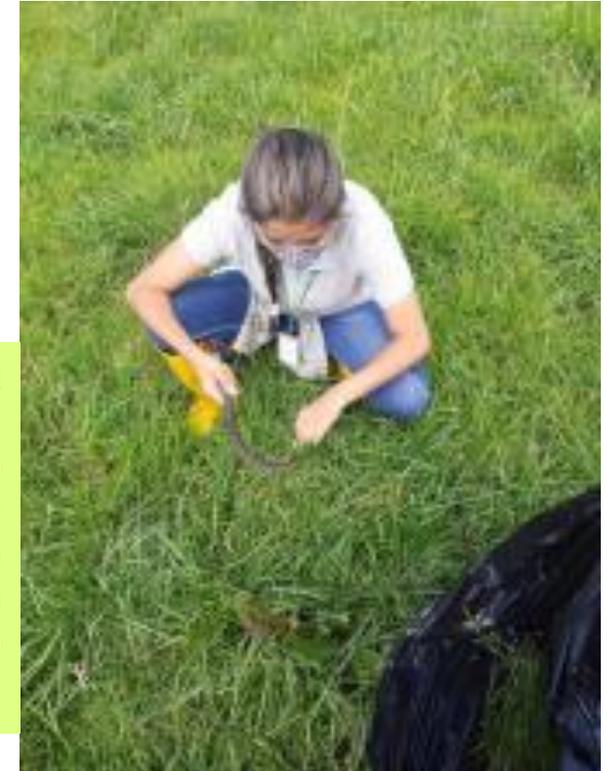
## Compactación



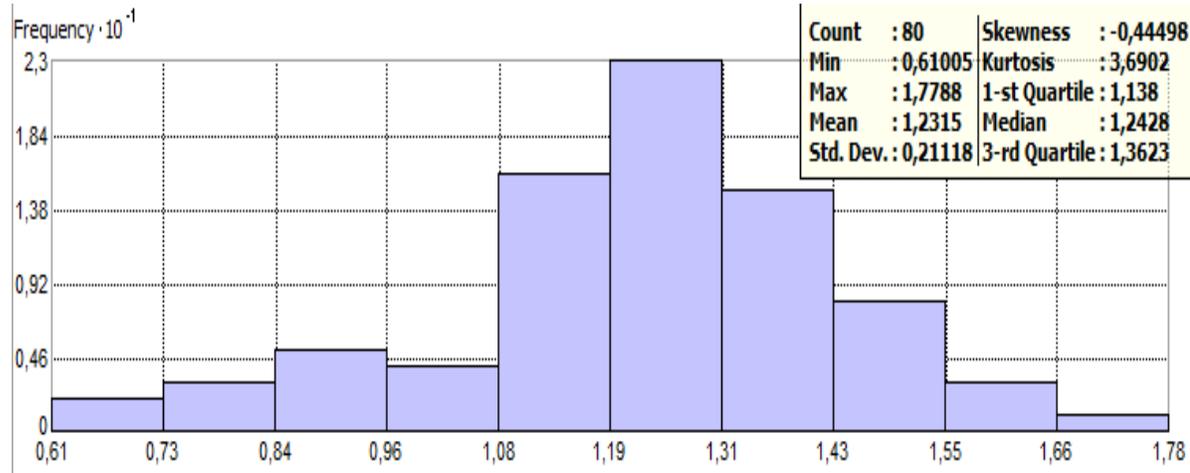
De 0-10 cm no existe mayor grado de compactación, sin embargo a una profundidad de 10-20 y 20-30 cm ( $70$  a  $130 \text{ lbf/pulg}^2$ ), no se muestra niveles de compactación muy altos, caracterizando como compactación baja según lo descrito por (Soto, 2014).

Rendimiento de materia fresca y seca de la presente investigación de  $43 \text{ t. ha}^{-1}$  y  $9.5 \text{ t. ha}^{-1}$  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  $40\,000 \text{ kg}$  de forraje verde por corte (cada 60 días).

## Rendimiento de Biomasa

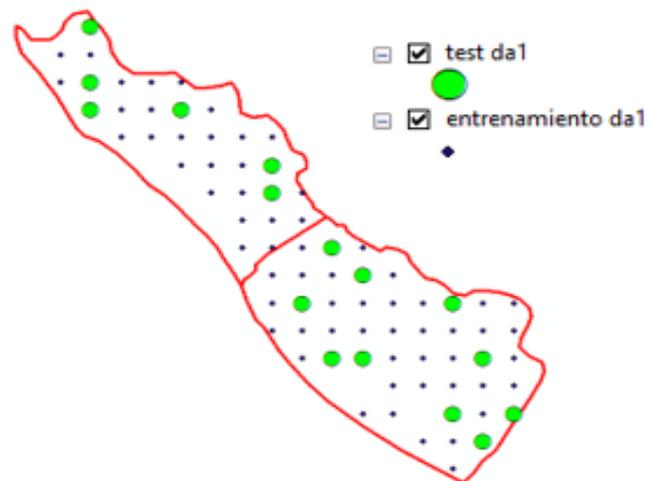


Distribución de conjunto de datos



Análisis estructural

Subset Features



Predicción espacial

Geoestatistical Wizard

Kriging

Regression function 0,0573482490940165 \* ...

Prediction Errors

Samples	64 of 64
Mean	0,00353991
Root-Mean-Square	0,1955779
Mean Standardized	0,01522736
Root-Mean-Square Stan...	0,9871501
Average Standard Error	0,1984343

IDW

Regression function 0,13857150065266 \* x + 1...

Prediction Errors

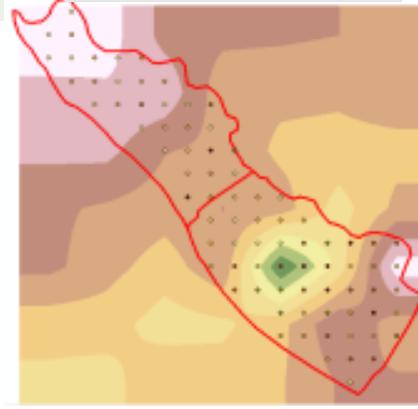
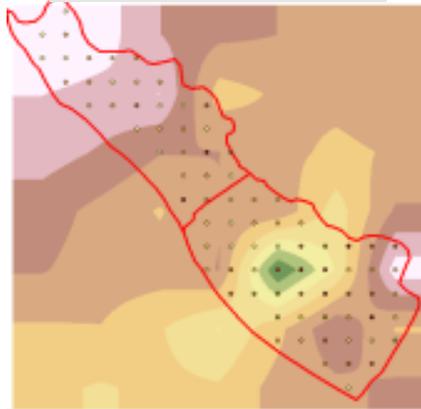
Samples	64 of 64
Mean	0,00315713
Root-Mean-Square	0,18998
Export Result Table	



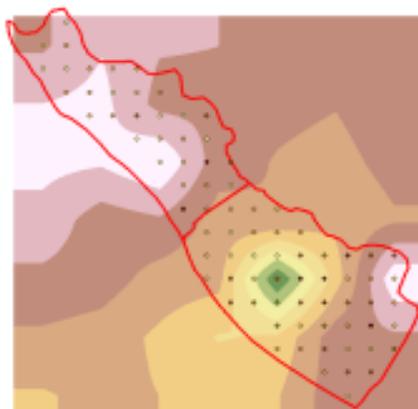
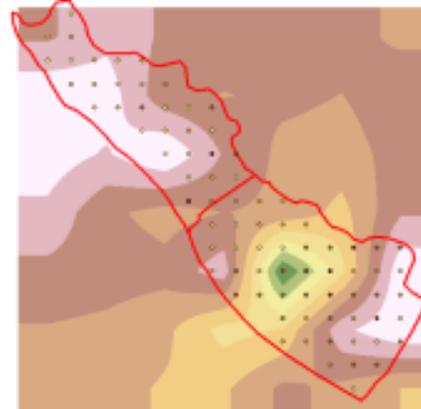
## IDW

## KRIGING

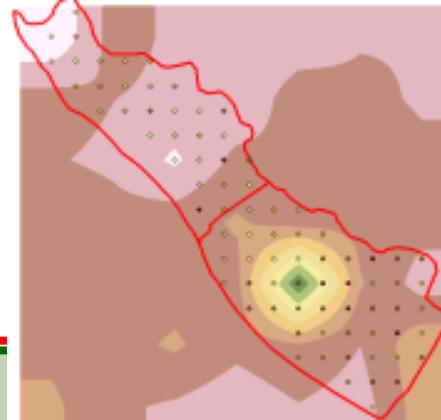
0-10 cm



10-20 cm



20-30 cm



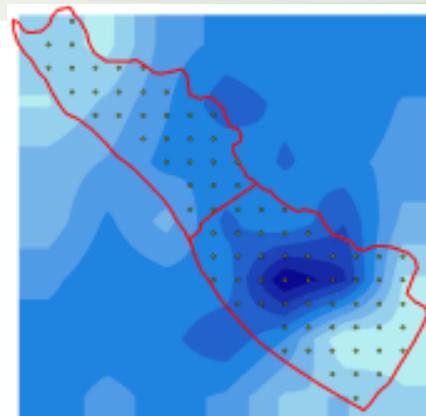
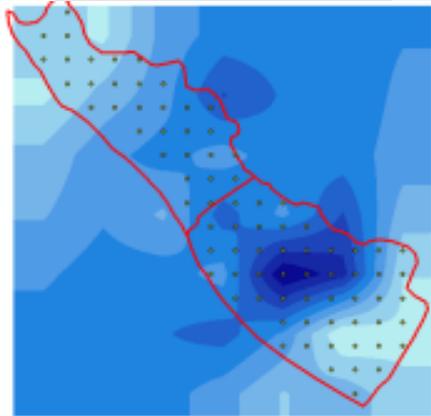
El rango de matiz de color para densidad aparente va desde el verde (zona con menor densidad); naranja (zona con densidad media) y blanco, morado (zona con mayor densidad).



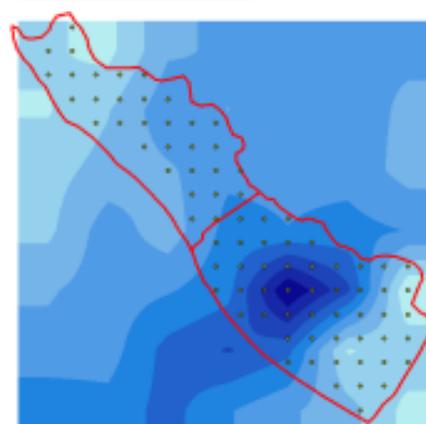
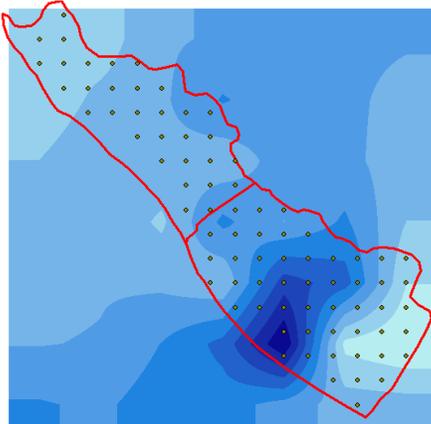
## IDW

## KRIGING

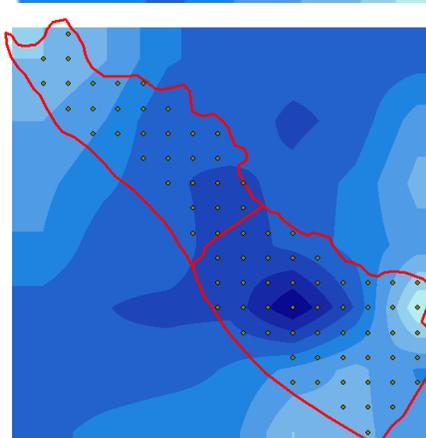
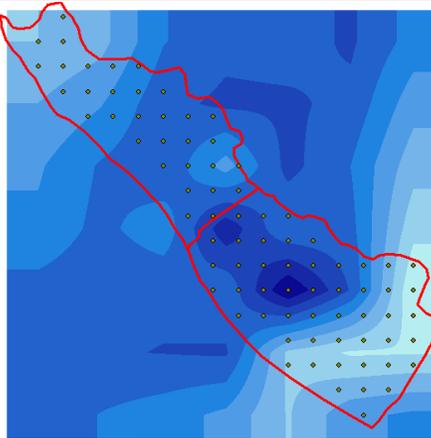
0-10 cm



10-20 cm



20-30 cm



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

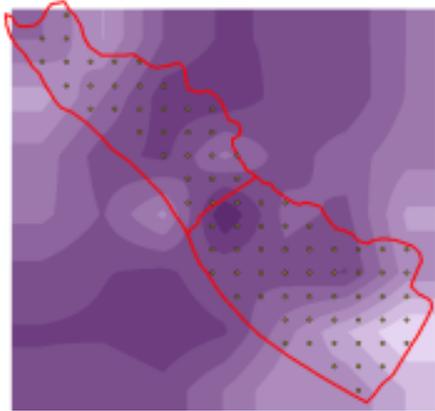


## IDW

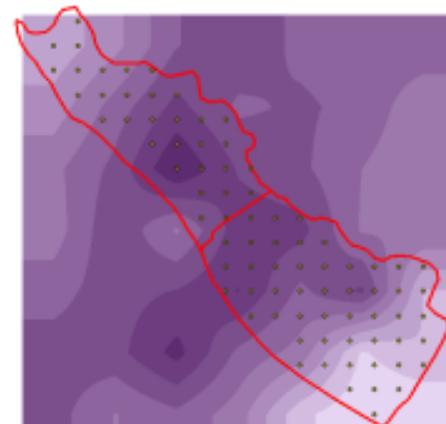
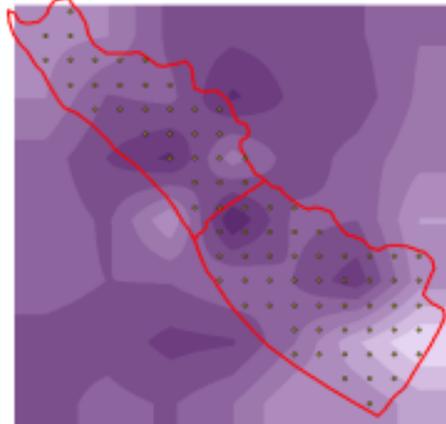
## KRIGING

## RESULTADOS

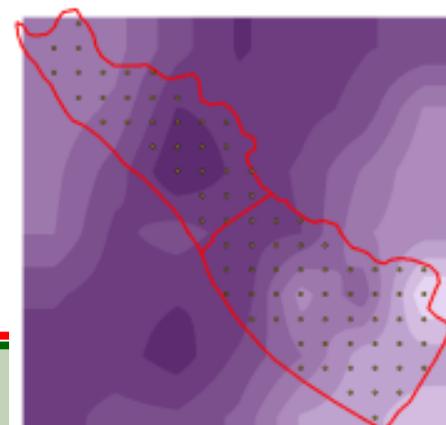
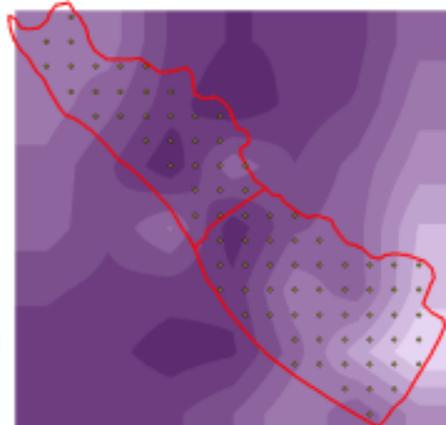
0-10 cm



10-20 cm



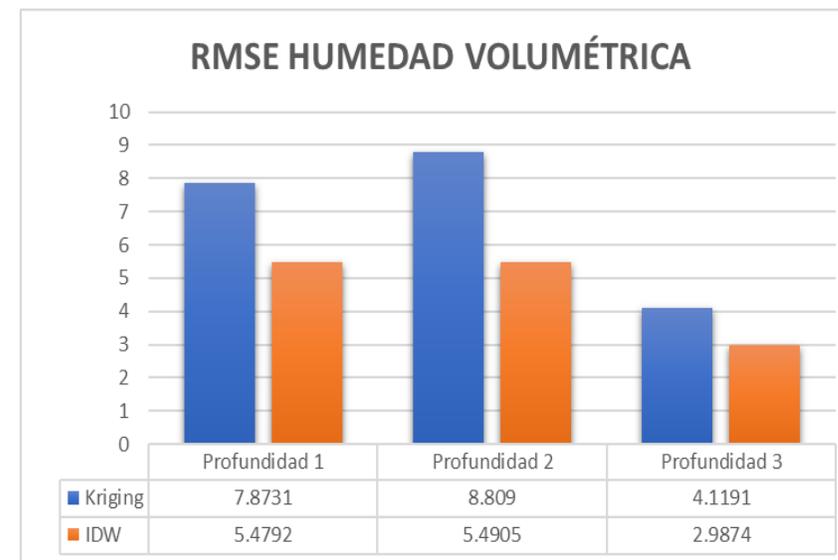
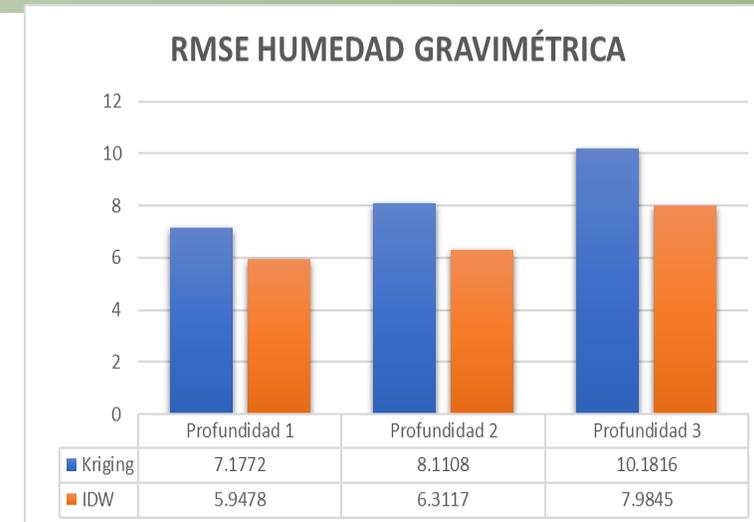
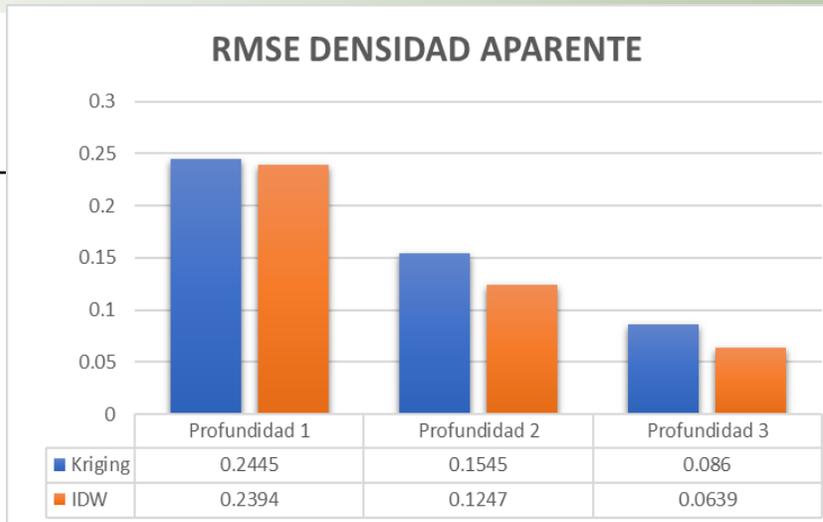
20-30 cm



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



Variable	Prof	Promedio	Kriging	IDW
Densidad Aparente	0-10 cm	1.23 g/cm <sup>3</sup>	± 0.2445	± 0.2394
	10-20 cm	1.17 g/cm <sup>3</sup>	± 0.1545	± 0.1247
	20-30 cm	1.19 g/cm <sup>3</sup>	± 0.0860	± 0.0639
Humedad gravimétrica	0-10 cm	37.79%	± 7.1772	± 5.9478
	10-20 cm	36.81%	± 8.1108	± 6.3117
	20-30 cm	32.61%	± 10,1816	± 7.9845
Humedad Volumétrica	0-10 cm	45.84%	± 7.8731	± 5.4792
	10-20 cm	41.29%	± 8.8090	± 5.4905
	20-30 cm	37.80%	± 4.1191	± 2.9874



- 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/pulg<sup>2</sup>
  - ✓ Rendimiento de biomasa: Se manifiesta el mayor rendimiento de materia fresca y seca de la presente investigación de 43 t. ha<sup>-1</sup> y 9.5 t. ha<sup>-1</sup> 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.



