

**DIAGNOSTICO DE LA DENSIDAD APARENTE, ESTABILIDAD DE AGREGADOS,
POROSIDAD DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL ESTADO ACTUAL DE
DEGRADACIÓN QUÍMICA EN EL DISTRITO DE RIEGO RUT**

**OSCAR LEONARDO OROZCO MARTINEZ
COD: 1125216**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI. MAYO DE 2016**

**DIAGNOSTICO DE LA DENSIDAD APARENTE, ESTABILIDAD DE AGREGADOS,
POROSIDAD DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL ESTADO ACTUAL DE
DEGRADACIÓN QUÍMICA EN EL DISTRITO DE RIEGO RUT**

**OSCAR LEONARDO OROZCO MARTINEZ
COD: 1125216**

**Director
ANDRÉS FERNANDO ECHEVERRI SÁNCHEZ. MSc; Candidato PhD.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI, MAYO DE 2016**

DEDICATORIA

A Dios

Porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome, iluminándome y dándome fortaleza para continuar a pesar de las adversidades.

A mi familia

Especialmente a mi madre, Luz Marina Martínez y abuela, María Teresa Hull, por brindarme su apoyo incondicional, velando a lo largo de mi corta vida por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Y a los demás integrantes de mi familia que en algún momento contribuyeron con su apoyo para mi formación profesional.

A mis amigos

Paola, Fabián, Javier, Greydi, Brenda, Santiago y todos los que hicieron y hacen parte de este camino, por brindarme su apoyo incondicional durante estos años, siendo un pilar importante en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad del Valle y a todos los integrantes del grupo de investigación REGAR, especialmente al profesor Andrés Echeverri por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo bajo su tutoría, por todo el tiempo, la dedicación prestada y el conocimiento transmitido. Al profesor Aldemar reyes por su acompañamiento durante la realización de este trabajo y por su aporte al mismo.

A la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego RUT (ASORUT), al Ingeniero Leonardo Sánchez por haber permitido hacer uso de sus instalaciones, vehículos y demás implementos necesarios para llevar a cabo nuestro trabajo. Muy cordialmente les agradezco a los inspectores de riego su apoyo del Distrito, colaboración y acompañamiento constante durante las labores de muestreo realizadas.

Al laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Universidad del Valle por brindarnos sus instalaciones para el procesamiento de las muestras de suelo del presente trabajo.

Por ultimo pero no menos importante agradezco al técnico Aldemar, jefe de riego James de ASORUT, el Ingeniero Camilo Cajas, la Ingeniera Diana Cubillos y al Ingeniero Cristian Pérez, de la Universidad del Valle, por su valiosa contribución en el muestreo realizado en el Distrito de riego RUT, sin ellos no hubiera sido posible tan difícil labor.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 EL AGUA EN EL SUELO.....	3
2.2 PROPIEDADES FÍSICAS RELACIONADAS CON EL MOVIMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO.....	4
2.2.1 Estabilidad de agregados	4
2.2.2 Densidad aparente	5
2.2.3 Porosidad	5
2.3 DEGRADACIÓN QUÍMICA (SALINIDAD Y SODICIDAD) Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	6
2.3.1 Suelos salinos	6
2.3.2 Suelos sódicos	8
2.4 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	10
2.4.1 Definición.....	10
2.4.2 Aplicaciones	10
2.4.3 Estructuras de datos en los SIG	11
2.5 GEOESTADÍSTICA	12
2.5.1 Métodos de interpolación (IDW, spline, kriging)	12
2.5.2 Elementos de semivariograma	14
3. OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. METODOLOGÍA.....	18
4.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO	18
4.2 PUNTO DE MUESTREOS PARA ANÁLISIS DE SUELOS	19

4.3	MUESTREO Y DETERMINACIÓN	20
4.3.1	Metodología de campo	21
4.3.2	Metodología de laboratorio	22
4.4	SELECCIÓN DE METODO DE INTERPOLACIÓN.....	26
4.5	GEOPROCESAMIENTO DE DATOS ¡Error! Marcador no definido.	
4.6	CORRELACIÓN CON DEGRADACIÓN QUÍMICA	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
5.1	PUNTOS DE MUESTREO ELIMINADOS.....	27
5.2	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	28
5.3	GEO ESTADÍSTICA	34
5.4	INTERPOLACIÓN	37
5.4.1	Densidad aparente	37
5.4.2	EPT	38
5.4.3	Micro poros.....	39
5.4.4	Indice de poros	40
5.4.5	DPM (0-25 cm)	41
5.4.6	DPM (25-50 cm)	42
5.4.7	LAA	43
5.5	RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES FÍSICAS	44
5.5.1	LAA-Indice de poros –EPT-Micro poros.....	45
5.5.2	Densidad aparente- espacio poroso total.....	46
5.5.3	Relación entre DPM para una profundidad entre 0-25 cm y 25-50 cm	46
5.6	RELACION CON OTRAS PROBLEMATICAS IDENTIFICADAS	47
5.6.1	Relación entre zonas críticas identificadas y problemas de salinización	47
5.6.2	Relación entre zonas críticas identificadas y problemas de sodicida	48
5.6.3	Relación entre zonas críticas identificadas y problemas por suelos magnesicos	49

6	CONCLUSIONES	51
7	RECOMENDACIONES	52
8	BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.	Distribucion de los 100 puntos muestreados en el Distrito RUT	19
Tabla 1.	Numero de puntos de muestreo y area equivalente por orden taxonomico	20
Tabla 3.	Puntos de muestreo eliminados	28
Tabla 4.	Medidas de tendencia central por cada propiedad fisica evaluada.....	28
Tabla 5.	Analisis Geoestadistico para eleccion de metodos de interpolación.....	34
Tabla 6.	Analisis por predio de propiedades fisicas del suelo y su afectacion sobre la lamina de agua aprovechable	45
Tabla 7.	Resultado de propiedades fisicas en los suelos del Distrito RUT	53

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Componentes de un semivariograma.....	15
Figura 2.	Modelos geoestadisticos esferico, exponencial, gausiano y lineal	16
Figura 3.	Localizacion del Distrito RUT	18
Figura 4.	Puntos de muestreo por orden taxonomico.....	20
Figura 5.	Toma de muestra inalterad para densidad aparente	21
Figura 6.	cilindro con muestra de suelo para densidad aparente	21
Figura 7.	Calicata para muestras alteradas a una profundidad de 0-25 cm y 25-50 cm ...	22
Figura 8.	caja de arenas o mesa a tencion para determinacion de porosidad del suelo...	23
Figura 9.	Proceso de secado de muestras para metodo de yoder modificado	24
Figura 10.	Equipo de tamizado humedo para estabilidad estructural	24
Figura 11.	Compresor de aire para equipo de tamizado Humedo	24
Figura 12.	Plato de presiones para curva de retencion de humedad del suelo.....	25
Figura 13.	Compresor de aire para plato de presiones	25
Figura 15.	Histogramas generados por el Software GS+ versión 10.0¡Error! Marcador no definido.	
Figura 14.	Variables otorgadas por el software GS+ versión 10.0 para eleccion de metodos de interpolacion	¡Error! Marcador no definido.

Figura 16. Mapa de densidad aparente por metodo de cilindro biselado.....	38
Figura 17. Mapa de espacio poroso total en los suelos del Distrito RUT	39
Figura 18. Mapa de micro poros presentes en los suelos del Distrito RUT	40
Figura 19. Mapa del Indice de poros de los suelos del Distrito RUT	41
Figura 20. Mapa del DPM a una profundidad entre 0-25 cm del perfil del suelo.....	42
Figura 21. Mapa del DPM a una profundidad entre 25 y 50 cm del perfil del suelo	43
Figura 22. Mapa de lamina de agua aprovechable en los suelos del Distrito RUT	44
Figura 23. Mapa de salinidad de suelos a una profundidad entre 0-25 cm.....	48
Figura 24. Mapa de sodicidad en el Distrito RUT para una profundidad de 0-25 cm.....	49
Figura 25. Mapa de contenido de magnesio en los suelos del Distrito RUT	50
Figura 26. Histograma Densidad Aparente	54
Figura 27. Histograma EPT.....	54
Figura 28. Histograma Micro Poros.....	54
Figura 29. Histograma Indice de Poros.....	54
Figura 30. Histograma Punto de Marchitez Permanente	54
Figura 31. Histograma Capacidad de Campo	54
Figura 32. Histograma Diametro Ponderado Medio 25-50 cm.....	54
Figura 33. Histograma Diametro Ponderado Medio 0-25 cm.....	54
Figura 34. Histograma Lamina de Agua Aprovechable	54

RESUMEN

El Distrito de Riego RUT, ubicado al norte del Departamento del Valle del Cauca es considerado uno de los distritos más grandes de Colombia y más importantes de la región (aproximadamente 11.000 ha), comprendiendo infraestructura de riego, drenaje y control de inundaciones. Lo anterior en virtud de que la economía del norte del Departamento del Valle del Cauca está basada en el sector agropecuario; el Distrito RUT contribuye con el 45% a la composición del producto interno bruto del departamento. Por tal razón, se ve sometido a actividades agrícolas intensivas basada en la producción por área de: granos (35%), pastos (8%), frutales (17%), caña de azúcar (28%) hortalizas y otros (8%) generando degradación física, química y biológica en el suelo por malas prácticas agrícolas, mala calidad de agua para riego, y diversos factores ambientales que contribuyen a dicha problemática.

Este trabajo se realizó con el objetivo de generar un diagnóstico de algunas propiedades físicas del suelo y observar la correlación con la degradación química en el Distrito de Riego RUT. Para ello se realizó un muestreo de suelos (100 puntos elegidos previamente), garantizando representatividad por unidad cartográfica de suelo, representatividad por unidad de área y representatividad de unidades afectadas por salinidad y/o sodicidad, reportadas en estudios anteriores. Se generaron mapas a través de técnicas de interpolación geoestadística (software GS+ y ArcGis 10.3) y se reclasificaron de acuerdo a las categorías reportadas en la literatura para cada parámetro evaluado.

Los mapas obtenidos correspondientes a las propiedades físicas del suelo evaluadas y los mapas por degradación química con los que se contó por estudios previos, llevaron a determinar que existe una alta variabilidad espacial en relación al estado físico del suelo y que la zona más afectada por degradación física en el Distrito de Riego RUT corresponde al noreste del distrito.

Palabras clave: Degradación física de suelos, Distribución espacial, Interpolación

1. INTRODUCCIÓN

El Distrito de Riego Roldanillo- Unión- Toro (R.U.T) se localiza al norte del Departamento del Valle del Cauca, involucrando un área aproximada de 11000 ha, beneficiado 1800 predios y cerca de 1200 usuarios (Urrutia, 2005), y tiene como objetivo principal regular el componente hídrico de dicha planicie aluvial con infraestructura de riego, drenaje y control de inundaciones, buscando promover un programa empresarial de producción agrícola para garantizar el abastecimiento interno de los productos alimenticios y su exportación (Duarte, 2010). El Distrito de Riego RUT está compuesto por tres estaciones de bombeo (estación Tierra Blanca, Candelaria y Cayetana), dos canales de conducción (canal 1.0 y conductor) y nueve estructuras de control a lo largo de los canales principales de riego, además del sistema de drenaje que cuenta con un canal principal y dos pequeñas estaciones de bombeos (estación San Luis y Portachuelos).

Actualmente el Distrito de Riego RUT presenta diferentes problemas técnicos (operación, mantenimiento), ambientales (erosión, salinización de los suelos), financieros (cartera morosa), económicos (rentabilidad de los sistemas productivos existentes), sociales (conflictos) e institucionales (organización, administración), (Urrutia y Dossman, 2007), identificando como efecto principal de estas problemáticas, el aumento en la degradación química física y biológica del suelo que repercuten en otros aspectos involucrados como la productividad agrícola y economía del sector, entre otros.

El aumento en la degradación física y química del suelo se ve aumentada por factores como la calidad de agua para riego, la cual es tomada directamente del Rio Cauca y en algunas oportunidades del agua de escorrentía superficial de la cordillera causando un aporte importante de sales solubles al suelo (Duarte, 2010), variación del nivel freático que asciende en algunos casos, cerca de la superficie del terreno acumulando sales debido a la alta evaporación del agua, prácticas de fertilización excesivas e inadecuadas, labranza y demás prácticas agrícolas que involucren directa o indirectamente una acción sobre el suelo (Reyes et al., 2005).

La pérdida de la calidad física de un suelo puede ser evaluada por la alteración de alguna de las más importantes características tales como la densidad, porosidad, distribución del tamaño de poros, la estructura y la tasa de infiltración del agua en el suelo. Valenzuela y Torrente (2013) plantean que las modificaciones de las propiedades físicas del suelo por

diversos factores pueden dar origen a una elevación de la densidad del suelo, una mayor resistencia a la penetración de las raíces y una disminución en la porosidad del suelo afectando el movimiento del agua en el suelo y el desarrollo del sistema radicular, además el tamaño y la estabilidad de los agregados del suelo pueden ser indicativos de los efectos de los sistemas de labranza y de cultivo sobre la estructura del suelo, teniendo que suelos bien agregados proporcionan una mayor retención de agua, adecuada aireación, fácil penetración de raíces y buena permeabilidad del suelo.

Dada la importancia de las propiedades físicas del suelo en la evaluación de procesos de degradación del mismo, se planteó un estudio de algunas propiedades físicas del suelo, desarrollado en el marco del proyecto doctoral “Modelo para la identificación del riesgo de salinización de suelos asociado a la calidad del agua de riego. Caso de estudio: distrito de riego RUT, Valle del Cauca, Colombia” realizado en la Universidad del Valle, obteniendo apoyo para realizar trabajo de campo, análisis de laboratorio y análisis de datos por parte de COLCIENCIAS, ASORUT y el grupo de investigación REGAR de la Universidad del Valle en búsqueda de obtener un diagnóstico de la densidad aparente, estabilidad de agregados, porosidad del suelo y su relación con el estado actual de degradación química en el Distrito de riego RUT.

El estudio se lleva a cabo seleccionando 100 puntos de muestreo en el Distrito de riego RUT bajo tres parámetros de selección, representatividad por unidad cartográfica de suelo, representatividad por unidad de área y representatividad de unidades afectadas por salinidad y/o sodicidad. Los muestreos realizados corresponden a cada propiedad a evaluar, tomando muestras de suelo por cada punto seleccionado de dos tipos, inalteradas para el análisis de Densidad Aparente y Porosidad a una profundidad representativa de 0-25 cm y alteradas para el análisis de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente y Estabilidad de Agregados a dos profundidades, 0-25 cm y 25-50 cm del perfil del suelo. El análisis de las muestras obtenidas se lleva a cabo en el laboratorio de Aguas y Suelos Agrícolas (LASA) de la Universidad del Valle, realizando el procedimiento correspondiente a cada propiedad para su posterior determinación.

El diagnóstico en el Distrito RUT se realiza bajo análisis estadístico y geo estadísticos a cada propiedades bajo estudio, buscando generar una zonificación en el Distrito, generando mapas a través de técnicas de interpolación geo estadísticas usando herramientas como el software GS+ y ArcGis 10.3 y realizando una se reclasificaron de acuerdo a las categorías reportadas en la literatura para cada parámetro evaluado.

El presente estudio brinda el diagnostico final de la Densidad Aparente, Porosidad y Estabilidad Estructural en el Distrito RUT y su correlación con degradación química, contando con un sustento teórico de cada variable involucrada en los procesos de degradación del suelo así como de las propiedades físicas evaluadas, una metodología detallada de cada fase llevada a cabo en el diagnostico en el Distrito de riego RUT, un análisis de los resultados obtenidos bajo mapas de cada propiedad física evaluada y su relación con problemas de degradación química registrados en estudios anteriores logrando una identificación de las zonas críticas en el Distrito, obteniendo de esta manera un diagnostico final que permita concluir sobre los procesos de degradación física y química del suelo y brindar a partir de esto una serie de recomendaciones para disminuir la problemática encontrada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 EL AGUA EN EL SUELO

El agua es un elemento que debe ser considerado en todos los aspectos de la ciencia del suelo, tales como los procesos de meteorización, desarrollo de horizontes, crecimiento de las plantas, manejo y usos agrícolas de suelo, etc. (Casanova, 1991). El almacenamiento y movimiento del agua en el suelo son dos factores fundamentales que producen una variación en las propiedades del suelo y dicha variación tiene como principal variable el contenido de agua presente en el suelo.

Inicialmente el agua en el suelo puede moverse en dos estados: líquido y gaseoso, dicho movimiento en estado líquido ocurre debido a gradientes de tensión y su dirección será de zonas en el suelo con baja tensión (alto contenido de humedad) a zonas con alta tensión (bajo contenido de humedad). De manera natural, el suelo tiende a perder humedad por factores como la evaporación e infiltración, proceso el cual genera que los macro poros del suelo desalojen agua y permitan la entrada de aire y los micro poros queden parcialmente llenos de agua, bajo estos factores se presenta el flujo de agua en suelos no saturados en donde el movimiento de agua bajo estas condiciones es relativamente lento y dependerá de propiedades del suelo como la conductividad hidráulica y gradiente de tensión así como la fuerza de gravedad. Sin embargo la conductividad hidráulica depende del tamaño y distribución de los poros, textura, estructura y del contenido de materia orgánica, la cual tiende a mantener una mayor proporción en los macro poros del suelo (Casanova, 1991). Caso contrario ocurre cuando los macro poros y micro poros del suelo desalojan el aire contenido en ellos y estos se llenan de agua, donde se presentara un flujo de agua en suelos saturados.

El segundo factor fundamental en la variación de las propiedades del suelo por la presencia de agua es el almacenamiento de esta en el suelo, el cual se puede explicar a partir de dos tipos de almacenamiento: el agua almacenada disponible para la planta y agua almacenada no disponible para la planta, lo anterior se ve representado en los poros del suelo, los cuales son el lugar donde se almacena el agua en el suelo, siendo así los poros entre 0,0002 y 0,05 mm de diámetro los que retienen agua que puede ser absorbida por la planta; se denominan poros de almacenamiento, mientras que los poros más pequeños, o poros

residuales, retienen tan fuertemente el agua que las plantas no la pueden extraer de los mismos. Los poros mayores de 0,05 mm de diámetro, conocidos como poros de transmisión, permiten que el agua drene a través del suelo y permita la entrada de aire a los mismos a medida que el agua es drenada (FAO, 2005).

2.2 PROPIEDADES FISICAS RELACIONADAS CON EL MOVIMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

Existen determinadas propiedades básicas que influyen en las características hidrodinámicas del suelo, estas son: materia orgánica, textura, densidad, porosidad, estructura, profundidad, PH, y carbono orgánico (Martínez, 2008) para fines del estudio realizado se tendrán en cuenta tres propiedades físicas a analizar:

2.2.1 *Estabilidad de agregados*

Las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y unidades de mayor tamaño denominados peds. La estabilidad de los agregados hace referencia a la capacidad de estos para mantener su forma al estar sometidas a fuerzas inducidas artificialmente, derivadas de la humectación, impacto de las gotas de lluvia, el paso de agua o un determinado proceso dispersivo (FAO, 2007), por tanto podemos decir que el agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas.

La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. Esta reacción refleja las propiedades de las superficies de las partículas, dependientes en gran manera de los tipos de iones adsorbidos en ellas.

El ordenamiento espacial de los agregados y la distribución de los poros del suelo resultantes de él, es uno de los resultados que sobresalen desde el punto de vista agronómico, ya que es a través de los poros que las raíces de las plantas exploran el suelo para proveerse de nutrientes, aire y agua. Además, el sistema poroso resultante del grado de estructuración, juega un papel fundamental en la fertilidad física del suelo, así como en el crecimiento de las plantas, debido a la influencia sobre el agua y el aire del suelo por

tanto, “suelos bien estructurados permiten una adecuada infiltración y capacidad de almacenaje de agua en el perfil” (U.N.L.P, 2014).

2.2.2 Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen. Este volumen es el que ocupara la muestra en el campo. La densidad aparente tiene interés desde el punto de vista del manejo del suelo ya que informa sobre la compactación de cada horizonte y permite inferir las dificultades para el enraizamiento y la circulación de agua y aire en el suelo. La densidad aparente está directamente relacionada con la estructura y por ello dependen de los mismos factores de control.

La densidad aparente es una propiedad del suelo que con frecuencia se dispone para los distintos horizontes de un suelo, por la relativa facilidad con que se puede determinar, no obstante, cabe destacar que el valor de la densidad aparente presenta limitaciones importantes, ya que no proporciona información acerca del tamaño de los poros, ni la conexión entre ellos, ni sobre las fuerzas que han dado lugar a una estructura específica. Estos aspectos son de importancia para poder predecir el movimiento de agua en los poros de un suelo y los riesgos de degradación de los agregados. Suelos con los mismos valores de densidad aparente pueden tener distintas respuestas a fuerzas externas (Porta, 1994) y para obtener información de este carácter habrá que recurrir a estudios específicos sobre la porosidad.

2.2.3 Porosidad

Una consecuencia de la estructura y de la textura del suelo es la porosidad del mismo, que influye directamente sobre el contenido en agua y el mantenimiento de una correcta aireación, indispensables para la bio-actividad edáfica y para la de las plantas (Cobertera, 1993).

Los espacios porosos en un suelo presentan gran variación de acuerdo al tipo de suelo y a la forma en que este ha sido manejado. Los suelos con vegetación natural por lo general exhiben una alta porosidad total a causa de la intensa actividad biológica y la falta de interferencia por el ser humano. Por lo tanto, tienen cualidades físicas superiores, cuando se los compara con los suelos usados para los cultivos o para pastoreo (FAO, 2005).

La reducción de la porosidad del suelo repercute en propiedades físicas desfavorables debidas a una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración de agua y

dificultad para la penetración de las raíces. La aparición de horizontes compactados dentro de un perfil puede deberse a procesos genéticos o de posicionales, o bien, puede ser una compactación creada por el paso de maquinaria, por el laboreo en condiciones de humedad inadecuadas, o por el paso repetido del arado a cierta profundidad, creando un piso de labor (piso de arado) en la base del horizonte A (UNAM, 2005). Dichas acciones sobre el suelo producirán un sellamiento parcial o total en los poros del suelo, conociendo de antemano que los poros son los conductos que permiten el movimiento del agua en el suelo, se presentarán problemas de drenaje en el suelo, lo cual conllevará en algunos casos a problemas de salinidad, deficiencia de drenaje entre otros.

2.3 DEGRADACIÓN QUÍMICA (SALINIDAD Y SODICIDAD) Y SU RELACIÓN CON LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Uno de los factores de mayor importancia para la producción agrícola es el agua, el cual nos garantiza la existencia y desarrollo de las plantas. Cualquier adición de agua al suelo, bien por ascensión capilar desde el subsuelo o por riego, necesariamente implican la adición de sales al perfil del mismo, ya que todas las aguas naturales contienen cantidades variables de sales disueltas (Juárez y Sánchez, 2006).

La degradación química de los suelos agrícolas no depende solamente de la calidad de agua para riego, sumado a esto existen otras variables como las propiedades físicas y químicas del suelo así como la variación de las mismas por actividades antrópicas que se efectúen sobre él, generando, entre otros, problemas de salinidad y sodicidad en los suelos.

2.3.1 Suelos salinos

La salinización es el proceso de acumulación en el suelo de sales solubles en agua. Estas sales pueden ser el potasio (K^+), el magnesio (Mg^{2+}), el calcio (Ca^{2+}), los cloruros (Cl^-), los sulfatos (SO_4^{2-}), el carbonato (CO_3^{2-}), el bicarbonato (HCO_3^-) y el sodio (Na^+) (Comunidades Europeas, 2009). De acuerdo con Castellanos (2008), el problema de salinidad tiene dos efectos sobre el cultivo: Los efectos generales y los efectos específicos. Los efectos generales se refieren al descenso en el potencial de agua en el suelo, es decir a que la planta tiene que hacer un mayor esfuerzo para poder extraer agua del suelo (efecto osmótico), y los efectos específicos se refieren a la toxicidad que se puede presentar por la

presencia de un ion específico como cloro, boro, y en algunos casos sodio, afectando directamente al suelo, siendo este el causante de la destrucción de la estructura del suelo. Los suelos salinos se desarrollan principalmente en las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación es menor a la pérdida por evaporación. Los contenidos de sales presentes en las aguas de riego y su mal manejo son la principal causa de salinización de suelos.

García, (2003) y Yadav (2011) citados por Echeverri (2014) plantean que el movimiento del agua en el suelo depende del potencial hídrico, el cual, está en función del potencial gravitacional, de presión, matricial y osmótico de acuerdo a la siguiente expresión algebraica:

$$\varphi_a = \varphi_g + \varphi_p + \varphi_m + \varphi_o$$

Donde,

φ_a : Potencial hídrico
 φ_g : Potencial gravitacional
 φ_p : Potencial de presión
 φ_m : Potencial mátrico
 φ_o : Potencial osmótico

En un suelo no saturado, los componentes del potencial hídrico que retienen el agua en el suelo son el matricial y el osmótico. Cuando la concentración de sales aumenta, el potencial osmótico es más negativo y aumenta la fuerza de retención del agua en el suelo afectando el ingreso de agua a los tejidos vegetales, causando plasmólisis celular, marchitez y en algunos casos muerte.

El indicador de salinidad de suelos más aceptado es la Conductividad Eléctrica y aunque el efecto de un mismo nivel de sales sobre varios cultivos es variable se presenta a continuación una clasificación de salinización y el efecto del mismo sobre el cultivo (Castellanos, 2008)

- a) **< 2 dS/m** Suelo libre de sales, condición ideal para producir cualquier cultivo.
- b) **2-4 dS/m** Suelo ligeramente salino, es posible que se afecte el rendimiento de cultivos sensibles.
- c) **4-6 dS/m** Suelo moderadamente salino, el rendimiento de la mayoría de los cultivos se afecta. En el caso de los cultivos tolerantes el efecto es menor, pero en los cultivos susceptibles el daño puede ser muy severo.

d) **6-8 dS/m** Suelo salino, el rendimiento de la mayoría de los cultivos se afecta, en el caso de los cultivos tolerantes el efecto es menor.

e) **8-12 dS/m** Suelo muy salino, difícil de explotar en tales condiciones, requiere lavado. No obstante algunos cultivos muy tolerantes podrían explotarse si el nivel de sales está en la parte baja de este rango. Para estos cultivos el uso de sistemas de riego por goteo podrían facilitar el uso de suelos con un nivel de salinidad en la parte baja de este rango, pero de entrada se debe aceptar que aun en el caso de cultivos tolerantes habrá una reducción en el rendimiento en comparación con un suelo libre de sales.

f) **> 12 dS/m** Suelo extremadamente salino, normalmente no crece cultivo en ese suelo. Es necesario rehabilitarlo mediante lavado con agua de razonable calidad (baja en sales).

2.3.2 Suelos sodicos

Los suelos sódicos contienen en la zona radicular suficiente sodio absorbido por los coloides del suelo como para presentar propiedades físicas y químicas perjudiciales para los cultivos (Juárez y Sánchez, 2006). Se consideran suelos sódicos aquellos en los cuales el Na ocupa más del 15 % de la capacidad de cambio del suelo. Estos suelos tienen normalmente un pH elevado del orden de 8,5 o más. La presencia de Na en proporciones elevadas frente al Ca y al Mg, provoca la dispersión de los coloides arcillosos y húmicos originando fuerte inestabilidad estructural. Además pueden aparecer problemas de fitotoxicidad (Merino, 2007).

La sodicidad se mide a través de la determinación de sodio intercambiable (PSI) y se cuantifica mediante la relación que guarda con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, es decir mediante el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). Se cuantifica mediante la ecuación:

$$PSI = \left(\frac{Na}{CIC} \right) * 100$$

Usando unidades de meq/100 g o cmol₍₊₎/kg para el Na y para la CIC y se clasifican como sigue (Castellanos, 2008).

a) **0-5 %** Libre de sodio, sin problemas de manejo y no requiere de aplicaciones masivas de calcio o de formadores de calcio en el suelo.

b) **5-10%** Ligeramente sódico en suelos de textura media a fina, es posible que sea necesario darle mantenimiento con aplicaciones de yeso agrícola. Se requiere determinar necesidades de yeso.

c) **10-15%** Moderadamente sódico, será necesario hacer aplicaciones de yeso. Se requiere determinar necesidades de yeso.

d) **15-20%** Suelo francamente sódico, es posible que estén ocurriendo problemas de permeabilidad en el campo. Normalmente el pH de un suelo con este nivel de sodio es elevado. Es necesario rehabilitar el suelo con aplicaciones de yeso para que pueda producir satisfactoriamente.

e) **20-30%** Suelo muy sódico, es necesario rehabilitarlo con aplicaciones de yeso agrícola para poder hacer una explotación rentable del terreno.

f) **>30%** Suelo extremadamente sódico, que no puede ser explotado sin ser rehabilitado con aplicaciones masivas de una fuente de calcio o un formador de calcio, cuando es un suelo calcáreo. Es necesario determinar la dosis a aplicar y luego se requiere hacer lavado de la sal de sulfato de sodio que se formará al reaccionar el yeso con el sodio.

Yadav (2011) citado por Echeverri (2014) consideran que existen 831 Mha de suelo afectados por problemas de degradación química de los cuales 397 Mha causados por salinidad y 434 por sodicidad de los cuales américa latina aportan 61 Mha de suelos salinos y 51 Mha de suelos sódicos correspondientes al 3% y al 2.5% de los suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad en el mundo.

En Colombia, Otero (2002) citado por Echeverri (2014) reportan que en Colombia el 5,6% correspondiente a 63.261 Km² son suelos salino sódicos sumado a estos, el 2,81% del área nacional se encuentra bajo alto grado de susceptibilidad a procesos de salinización y/o sodificación y un 2.3% en grado moderado de susceptibilidad por los procesos de degradación química ya nombrados.

IGAC-CVC (2004) consideran que en el Valle del Cauca existen 39.468 ha afectadas con problemas de salinidad y/o sodicidad de las cuales, el Distrito de riego RUT aporta 3584 ha en suelos salinos, correspondiente al 35% del área total del Distrito, cifras las cuales nos permiten dar a conocer el estado de la problemática, la cual aumenta con el pasar del tiempo debido a que no se realiza un cambio en las prácticas agrícolas realizadas por el sector productor.

2.4 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.4.1 Definición

En la actualidad existen muchas definiciones de sistemas de información geográfica (SIG), que dependen del país, escuela y área de estudio, y no se puede decir que alguna sobresale sobre otra, sino simplemente que éstas responden a diferentes orientaciones según la perspectiva, circunstancia, aplicación o el punto de vista de los autores involucrados, por lo anterior definimos un sistema de información geográfica (SIG) como una herramienta informática que sirve para ingresar, almacenar, gestionar, recuperar, actualizar, analizar y producir información y los datos que contiene están relacionados con las características de los lugares o zonas geográficas (Naciones Unidas Nueva York, 2000). En otras palabras, un SIG nos permite responder preguntas acerca de dónde se encuentran ciertas cosas o acerca de qué cosas se encuentran en una ubicación dada.

Es importante recalcar que la aplicabilidad de los sistemas de información geográfica radica en que los diferentes procesos sobre la tierra no son independientes entre sí y los procesos pueden plantearse como sistemas que permiten estudiarse en forma interdisciplinaria. De esta manera Baquero (2011) plantea que *“Un Sistema de Información Geográfica deberá cumplir con las propiedades de un sistema y las funciones de un Sistema de Información”*, lo que lo hace diferente a este es que sus datos son entidades espaciales geo referenciadas es decir datos geográficos que poseen unas coordenadas y unos atributos propios del lugar sobre el cual se está registrando cierta información.

2.4.2 Aplicaciones

Debido a la capacidad de los SIG de integrar información de diversas fuentes, permitiendo una consulta y análisis de forma rápida y directa de la información obtenida, los SIG se han convertido en herramientas utilizadas para distintos sectores de actividad públicos o privados ya sea en el campo de investigativo, industrial, de conservación y protección y demás sectores que involucran distintas variables en un mismo análisis.

Ager Ingenieros (2003), registra que los campos de mayor aplicación de los SIG son aquellos en los cuales una variable principal de estudio depende de diferentes factores que se deben agrupar de tal manera que se logre obtener un sistema que permita la toma de

decisiones teniendo en cuenta las diferentes implicaciones en el medio por dichos factores tales como:

Planificación hidrológica: Realizando gestión del agua en comunidades de regantes, distribución de agua urbana y agrícola, modelización hidrológica, análisis de riesgos y estudios de cuencas fluviales.

Agricultura: Aplicada en la distribución y gestión territorial mediante coberturas digitales del parcelario, aplicación de fertilizantes, explotaciones agrarias y agricultura de precisión.

Protección del medio ambiente: En la creación de mapas temáticos del medio natural y seguimiento de su estado de conservación y modelización de variables ambientales.

Geografía empresarial: utilizados para la investigación de mercados y determinación de la localización óptima de nuevas empresas mediante análisis de la distribución y características de la población y geomarketing.

Estudios sociodemográficos: Determinación de la estructura de la población de un barrio para prever la evolución de las necesidades de ciertos equipamientos, determinación de zonas susceptibles y estudios orientados a fines electorales.

2.4.3 Estructuras de datos en los SIG

A pesar de la heterogeneidad de la información que puede almacenarse en un SIG, existen métodos comunes de representar la información espacial en una base de datos de SIG los cuales son modelo vector y modelo raster.

Estructura vector

De acuerdo con las Naciones Unidas de Nueva York (2000) los sistemas de SIG en forma de vectores representan características del mundo real utilizando un conjunto de primitivas geométricas: puntos, líneas y polígonos lo cual conlleva a que la estructura vector sea más compacta, este más fácilmente ligada a la topología y de ello resulta una eficiencia mayor de las operaciones que requieren información topológica, como por ejemplo análisis de redes (Baquero, 2011).

Estructura raster

Los programas de SIG en forma de cuadrícula dividen el espacio en un conjunto regular de líneas y columnas. Cada casilla de este conjunto o retícula a veces se denomina pixel, que

significa elemento de imagen y pone de manifiesto el origen de este modelo de datos en la tele observación o el procesamiento de imágenes. Baquero (2011) plantea que los objetos se describen con una o varias celdas encadenadas que no se superponen ni dejan espacios vacíos. La geometría se puede describir por medio de celdas vecinas que tengan el mismo atributo. Cada celda se define con una fila, una columna y un valor que representa el atributo, así el aspecto temático del terreno está ligado directamente a la posición del objeto, por ello la estructura raster se recomienda para zonas extensas, para escalas pequeñas, para desarrollar análisis complejos o para procesar imágenes.

2.5 GEOESTADÍSTICA

La geostatística es una manera de describir la continuidad espacial de cualquier fenómeno natural. Con ello llegamos a conocer la forma en que varía cualquier variable continua en el espacio (patrón espacial) a una o varias escalas seleccionadas, con un nivel de detalle que te permite cuantificar su variación en distintas direcciones del espacio (Gallardo ,2006). Actualmente la geoestadística tiene como mayor relevancia el manejo de funciones para modelar variaciones espaciales, que son utilizadas posteriormente para interpolar en el espacio el valor de la variable en sitios no muestreados y así obtener una representación total de una variable en una zona específica de estudio.

El proceso de estimación y modelación de la variable que describe la correlación espacial es conocido como “análisis estructural”, el cual una vez realizado, la predicción de la variable en los puntos no muestreados se realiza aplicando método de interpolación como *kriging* o simulándolos a través de simulaciones condicionales

El análisis geoestadístico en general se realiza en tres etapas macro, una que involucra el análisis exploratorio de los datos, análisis estructural de los datos y la aplicación de métodos de interpolación o predicciones de variables.

2.5.1 Métodos de interpolación (IDW, spline, kriging)

Interpolación IDW

Es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto

tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Cañada et al. Citado por Murillo et al. 2012). Matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

Donde $Z(S_o)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos. Los pesos de los puntos vecinos están dados por

$$\lambda_i = \frac{[d_{io}]^{-p}}{\sum_{i=1}^N [d_{io}]^{-p}}$$

Donde d es la distancia entre el lugar de predicción (S_o) y el lugar muestral (S_i); P es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

Interpolación Kriging

Villatoro et al (2008) en su estudio definen el Kriging como un estimador lineal in-sesgado que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos basado en auto correlación espacial de las variables. Asume que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias. Permite transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error.

Para determinar la auto correlación se usan semivariogramas y vecindades obtenidos a partir de un análisis exploratorio de los datos. El semivariograma permite a partir de la covarianza entre los puntos, representar la variabilidad de los mismos y su dependencia en función de la distancia y la dirección. Se calcula a partir de

$$Z(S) = \mu(S) + \varepsilon(S)$$

Donde $Z(S)$ es la variable de interés, $\mu(S)$ es una constante desconocida, $\varepsilon(S)$ son errores aleatorios de estimación y S son coordenadas espaciales (x, y). La predicción de un punto en el método de interpolación Kriging está dada por

$$\hat{Z}(S_o) = \sum_{i=1}^N [\lambda_i Z(S_i)]$$

Donde $\hat{Z}(S_0)$ es el valor predicho, λ_i es el peso de cada valor observado y $Z(s_i)$ es el valor medido en un lugar.

Interpolación Spliner

En el sub campo matemático del análisis numérico, un Spline es una curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios. En los problemas de interpolación, se utiliza a menudo la interpolación mediante Spline porque da lugar a resultados similares requiriendo solamente el uso de polinomios de bajo grado, evitando así las oscilaciones, indeseables en la mayoría de las aplicaciones, encontradas al interpolar mediante polinomios de grado elevado.

Para el ajuste de curvas, los Splines se utilizan para aproximar formas complicadas. La simplicidad de la representación y la facilidad de cómputo de los splines los hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador.

2.5.2 Elementos de semivariograma

Los semivariogramas proporcionan bastante información del comportamiento espacial de una variable a partir de elementos que lo componen como el Rango (A_0), Nugge (C_0), la varianza estructural (C), Sill ($C_0 + C$) y la proporción de varianza explicada ($C / C_0 + C$) (ver Figura 1). Sin embargo, es necesario ajustar una función para cuantificar el grado y escala de la variación espacial observada. Gallardo Y Maestre (2008) definen los componentes del semivariograma como sigue.

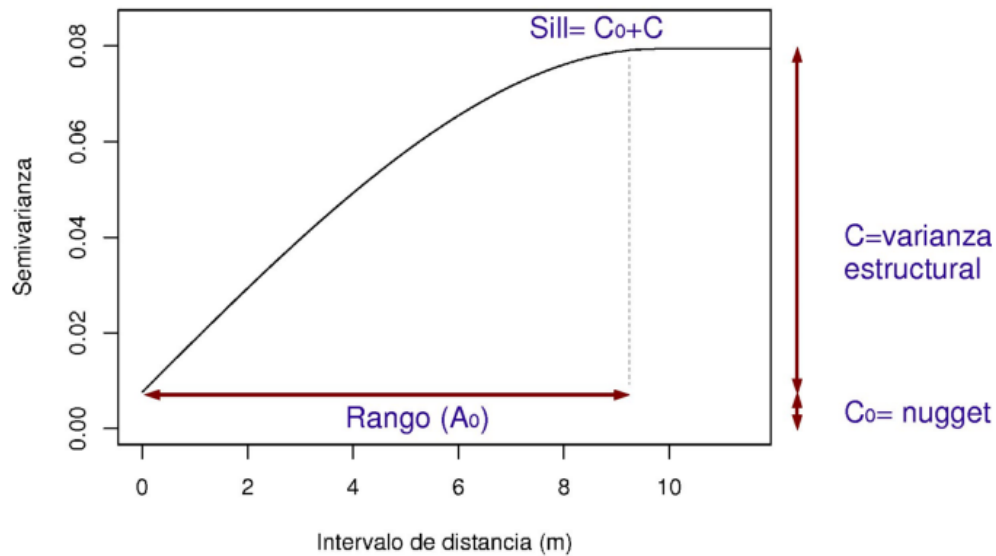


Figura 1. Componentes de un semivariograma

Fuente. Gallardo y Maestre (2008).

Rango (A_0). Es la distancia a la que la semivarianza deja de aumentar. Este parámetro, por tanto, indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras, y representa el tamaño de grano o mancha que representa la variable (Paramá, 2006 citado por Gallardo y Maestre, 2008).

Nugget (C_0). Este parámetro es la varianza no explicada por el modelo, y se calcula como la intercepción con el eje Y. Se conoce también como varianza error puesto que la varianza de dos puntos separados por 0 metros (la intercepción con el eje Y) debería ser cero. Es por ello que esta varianza está normalmente indicando variabilidad a una escala inferior a la muestreada. Además, los errores analíticos o de muestreo también contribuyen a la aparición de la varianza error.

Varianza estructural (C). Hace referencia a la varianza explicada de los puntos para el rango A_0 .

Sill ($C_0 + C$). La máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos se conoce como “sill” y debe coincidir con la varianza de la población

Proporción de varianza explicada ($C / C_0 + C$). Este cociente, expresado a menudo como porcentaje, nos indica la parte de la varianza que se encuentra estructurada espacialmente, y por tanto el grado de incertidumbre a la hora de interpolar puntos en el espacio. Un alto cociente nos indica una variable espacialmente muy predecible.

Numerosos modelos son los que se utilizan en geostatística para realizar los ajustes de variables en el espacio, siendo los más comúnmente usados el modelo esférico, el exponencial, el gaussiano y el lineal

Esférico. Tiene un comportamiento lineal a distancias de separación pequeñas cerca del origen pero se va aplanando a mayores distancias hasta que alcanza el sill.

Exponencial. Tiende a alcanzar el sill asintóticamente. El rango (A_0) se define como la distancia a la cual el valor del variograma alcanza el 95% del sill

Gausiano. Al igual que el modelo exponencial, el modelo Gausiano tiende a alcanzar el sill asintóticamente. El rango (A_0) se define como la distancia a la cual el valor del variograma alcanza el 95% del sill.

Lineal. La coordenada en el origen define el nugget (C_0). No es un modelo apropiado porque nunca se alcanza el sill.

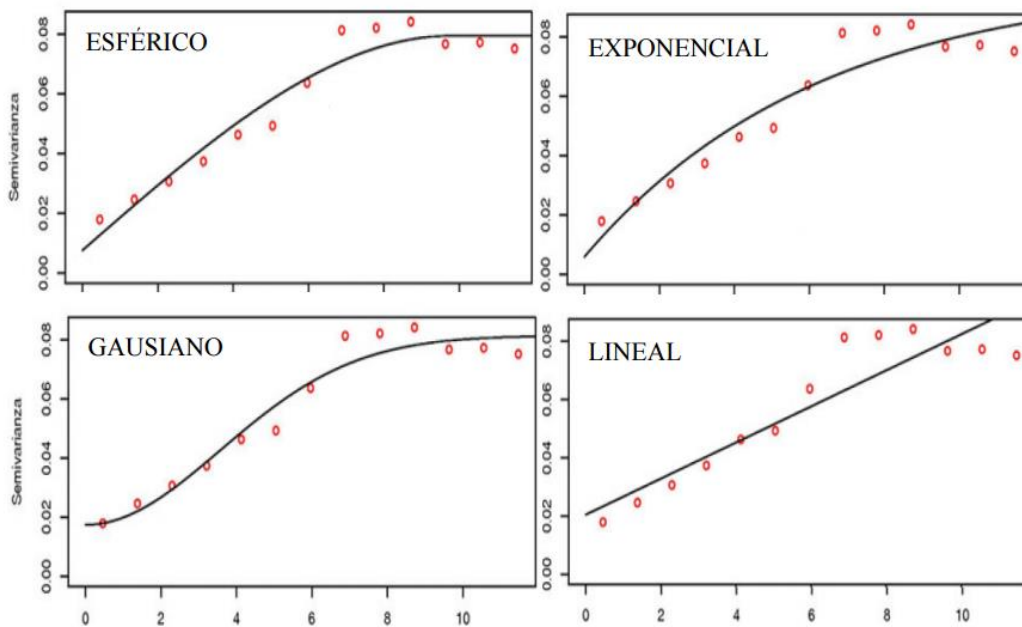


Figura 2. Modelos geoestadísticos esférico, exponencial, gaussiano y lineal

Fuente. Gallardo y Maestre (2008)

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diagnosticar el estado actual de la densidad aparente, estabilidad de agregados, porosidad de los suelos del RUT y su relación con la degradación química.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar el estado actual de las propiedades físicas del suelo del RUT.
- Espacializar el comportamiento de la densidad aparente, la estabilidad de agregados y la porosidad de los suelos del Distrito de riego RUT.
- Correlacionar el comportamiento de la densidad aparente, la estabilidad de agregados y la porosidad con la degradación química del suelo en el Distrito de riego RUT.

4. METODOLOGÍA

4.1 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

El Distrito RUT se localiza al norte del departamento del Valle del Cauca, involucrando un área de 12500 ha beneficiado 1800 predios y cerca de 1200 usuarios (Urrutia, 2005), con una altitud entre 915 y 980 msnm, una precipitación de 1100 mm y evaporación anual 1080 mm aproximadamente. El Distrito RUT es una de las unidades que constituyen el sistema de control de inundaciones del departamento del Valle del Cauca; sistema concebido por la Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC) en la década de los 50 con el fin de controlar las inundaciones por el Rio Cauca en su valle geográfico, contando además con infraestructura de riego y drenaje para prácticas agrícolas del sector, generando una contribución al producto interno bruto (PIB departamental en un 42%, 50% de los alimentos demandados por el departamento y 12% de la producción frutícola nacional; actualmente el Distrito es administrado por la asociación de usuarios del Distrito RUT (ASORUT) (Urrutia, 2011).

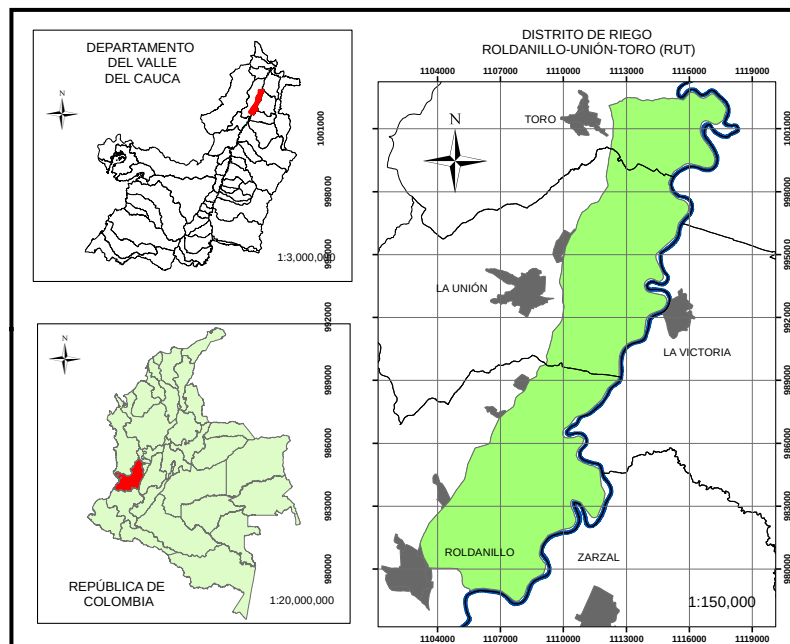


Figura 3. Localización del Distrito RUT

Fuente. Echeverri (2014)

4.2 PUNTO DE MUESTREOS PARA ANÁLISIS DE SUELOS

Los puntos de muestreo se determinaron buscando garantizar representatividad por unidad cartográfica de suelo, representatividad por unidad de área y representatividad de unidades afectadas por salinidad y/o sodicidad reportadas en la cartografía de IGAC-CVC (2004), obteniendo la distribución de puntos según los parámetros a garantizar como se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Distribucion de los 100 puntos muestreados en el Distrito RUT

ID	CODIGO UCS	Taxonomia	area/USC (ha)	% USC	area/orden (ha)	% area/orden	Representatividad por UCS	Representatividad por salinidad	Representatividad por area	TOTAL
1	(LM-EV)ar	vertic Endoaquepts	4627	41.8%	7821	70.7%	1		9	10
2	(LM-EV)axr	vertic Endoaquepts	226	2.0%			1	4	2	7
3	(LM-EV)ayr	vertic Endoaquepts	297	2.7%			1	4	3	8
4	(LM-EV)ayxr	vertic Endoaquepts	146	1.3%			1	4	2	7
5	LEakr	Vertic Haplustepts	60	0.5%			1	4		5
6	LEar	Vertic Haplustepts	1085	9.8%			1		4	5
7	LEaxr	Vertic Haplustepts	456	4.1%			1	4	3	8
8	LEayr	Vertic Haplustepts	48	0.4%			1	4		5
9	CKa	Fluventic Haplustepts	826	7.5%			1		4	5
10	CBai	Aquic Haplustepts	50	0.5%			1			1
11	(CU-MN)a	Cumulic Haplustolls	643	5.8%	2297	20.8%	1		4	5
12	(NM-SN)b	Pachic Haplustolls	46	0.4%			1			1
13	RTar	Vertic Haplustolls	1304	11.8%			1		5	6
14	SNab	Pachic Haplustolls	59	0.5%			1			1
15	SNb	Pachic Haplustolls	245	2.2%	733	6.6%	1		3	4
16	(RJ-PO)ar	Chmic Endoaquerts	3	0.0%			1			1
17	BAakr	Sodic Haplusterts	101	0.9%			1	4		5
18	CDaxr	Typic Natraquerts	47	0.4%			1	4		5
19	GLar	Udic Calciusterts	582	5.3%	148	1.3%	1		4	5
20	(SJ-PM)b	Typic Haplustealfs	73	0.7%			1			1
21	ZAd2	Typic Durustalfs	63	0.6%			1			1
22	ZAe2	Typic Durustalfs	12	0.1%	11	0.1%	1			1
23	BSa	Typic Ustipsamments	4	0.0%			1			1
24	MVaz	Aeric Fluvaquents	7	0.1%			1			1
25	MRFF3		48	0.4%	48	0.4%	1			1
TOTALES			11058	100.0%	11058	100.0%	25	32	43	100

En la Figura. 4 se presenta el mapa de orden taxonómico de los suelos en el Distrito RUT donde se observan 5 órdenes taxonómicos tales como Inceptisol, Molisol, Vertisol, Alfisol, y Entisol identificando que el 70,7% del área total del Distrito pertenece al orden Inceptisol y el 20,8% del área total al orden Molisol, al área restante correspondiente al 8,4% del área total corresponde a ordenes Vertisol, Alfisol y Entisol, adicionalmente se puede observar el número y la distribución de los puntos muestreados.

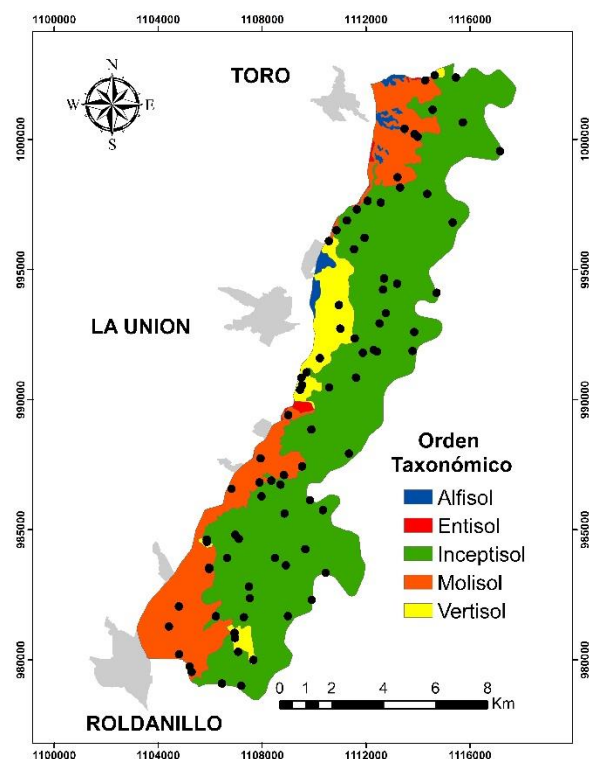


Figura 4. Puntos de muestreo por orden taxonomico

El área equivalente a cada orden taxonómico en hectáreas y en porcentaje se puede observar en la Tabla 1 así como el número de puntos de muestreo que pertenecen a cada orden taxonómico.

Tabla 2. Numero de puntos de muestreo y area equivalente por orden taxonomico

Orden taxonómico	Número de puntos de muestreo	Área (ha)	Área (%)
Inceptisol	53	7819	70,7
Molisol	19	2297	20,8
Vertisol	12	732	6,6
Alfisol	0	148	1,3
Entisol	0	59	0,5
Total	84	11055	100,0

4.3 MUESTREO Y DETERMINACIÓN

El diagnóstico de la densidad aparente, porosidad, estabilidad estructural y lámina de agua aprovechable en los suelos del Distrito RUT se llevó a cabo en dos fases macro, una inicial que involucro el trabajo de campo correspondiente a la toma de muestras en el Distrito RUT de cada propiedad física así como la georreferenciación del punto muestreado determinado previamente (ver Figura 4) y una final donde se realizó el procesamiento de las muestras en el laboratorio de aguas y suelos agrícolas (LASA) permitiendo la determinación de las variables necesarias para el cálculo de las propiedades bajo estudio, adicionalmente se realizaron análisis estadísticos y Geoestadísticos a lo largo de todo el Distrito de cada propiedad por individual, que permitieron obtener el diagnóstico actual de la densidad aparente, porosidad, estabilidad estructural y lámina de agua aprovechable y su correlación con la degradación química del Distrito RUT. A continuación se describe la metodología empleada para cada propiedad por fase trabajada.

4.3.1 Metodología de campo

Densidad aparente y porosidad

La porosidad del suelo y la densidad aparente se determina a partir de muestras inalteradas tomadas con anillos fabricados en acero inoxidable, sin soldaduras, lisos por fuera y por dentro. Por un lado tienen un filo de corte y cuentan con un volumen de 100 cc, adicionalmente se utiliza un barreno de iguales dimensiones para portar los cilindros al momento de tomar la muestra. El punto de muestreo se nivela con un palín cuidadosamente para no generar un sellamiento total de los poros y una vez obtenida la muestra se cubre tanto la parte inferior como superior con tapas para evitar pérdidas de suelo y sellamiento de los poros del suelo por golpes en la muestra la cual será representativa de los primeros 25 cm del perfil del suelo.



Figura 5. Toma de muestra inalterada para densidad aparente



Figura 6. cilindro con muestra de suelo para densidad aparente

Estabilidad estructural y curva de retención de humedad

El análisis de la estabilidad estructural y curva de retención de humedad del suelo se llevó a cabo tomando dos muestras, una representativa para una profundidad de 0-25 cm y otra para una profundidad representativa entre 25-50 cm del perfil del suelo, las cuales se tomaron realizando una calicata en el suelo (Figura 7) y extrayendo una muestra de aproximadamente un kilo tomado del lugar de la calicata realizando un corte en V con un palin, posteriormente se empacaron la muestra en bolsas rotuladas y se desplazaron al laboratorio de aguas y suelos agrícolas (LASA)



Figura 7. Calicata para muestras alteradas a una profundidad de 0-25 cm y 25-50 cm

4.3.2 Metodología de laboratorio

Densidad aparente

El proceso para la determinación de la densidad aparente en el laboratorio de aguas y suelos agrícolas (LASA) inicia enrazando la muestra de suelo tomada con los cilindros de 100 cc para determinar el peso de suelo húmedo que ocupa únicamente el volumen del cilindro, adicionalmente se llevan al horno a 105 °c por 24 horas para la determinación de humedad gravimétrica, registrando los pesos correspondientes a cada estado del suelo (seco y húmedo) y se determina así la densidad aparente del mismo.

Porosidad

El procedimiento al que se someten las muestras de porosidad en el laboratorio se divide en tres fases (saturado, drenado y seco) involucrando para ello una caja de arenas que

consta de un panel de control, soporte para nivel de succión, botella de agua con soporte, tela de filtro (140-150 micras), contenedores de arena sintética de 73 micras (aprox.) y varios accesorios para el proceso de saturación y drenaje (Maser, 2015.) (Figura 8) y un horno para el proceso de secado de la muestra. El proceso de saturado se llevó a cabo durante 48 horas y el proceso de drenado a 1 mca durante 48 horas, posteriormente se llevó a cabo el proceso de secado durante 24 horas a 105°C en el horno de secado de suelos y de cada procedimiento anterior se registraron los pesos obtenidos después de cada proceso y se aplican los cálculos respectivos para determinar los parámetros necesarios para el análisis de la porosidad del suelo



Figura 8. caja de arenas o mesa a tencion para determinacion de porosidad del suelo

Estabilidad estructural (Método de Yoder modificado)

La determinación de las variables para el análisis de la estabilidad estructural del suelo consta inicialmente de una preparación de la muestra donde se tomaron 100 g de suelo aproximadamente y sometiéndolas a un secado al aire durante tres días a temperatura ambiente para garantizar que los agregados del suelo no sufran alteración por implosión de aire durante el proceso de tamizado húmedo (Figura 9), una vez seca la muestra se tomaron 50 g de suelo de los 100 g secos y se llevaron al equipo de tamizado húmedo el cual es un equipo neumático para realización de pruebas de estabilidad de agregados al agua por método de Yoder funcionando a 33 Strokes por minuto con capacidad para dos pruebas simultáneas teniendo un desplazamiento vertical constante de 3 cm (Maser, 2015). Contando con un juego de 4 tamices No 10, 20, 35 y 60 correspondientes a 2, 0.85, 0.5 y 0.250 micras y un compresor de aire de 70 hp (Figuras 10 y 11). La prueba tuvo una

duración de 20 min y posteriormente a dicho tiempo realizo el proceso de extracción de la cantidad de suelo retenida por cada y se lleva al horno de secado durante 24 horas a 105°C, una vez secada la muestra al horno se registraron los pesos de suelo obtenidos por cada tamiz consiguiendo así las variables necesarias para el cálculo del diámetro ponderado medio (DPM) y el diámetro geométrico medio (DGM) valores que permitirán el análisis de la estabilidad estructural del suelo y condición actual del mismo.



Figura 9. Proceso de secado de muestras para metodo de yoder modificado



Figura 10. Equipo de tamizado humedo para estabilidad estructural



Figura 11. Compresor de aire para equipo de tamizado Humedo

LAA (procedimiento descrito por el LASA)

Para la determinación de la lámina de agua aprovechable se utilizaran los valores de CC y PMP encontrados en la curva de retención de humedad del suelo la cual se realiza a partir de tres puntos, 1, 3 y 15 Bares donde los valores obtenidos a 3 y 15 bares serán los valores de CC y PMP respectivamente.

Se realiza la curva de retención de humedad por el método de plato de presiones (Figura 13 y 14) donde inicialmente se somete a saturación en agua destilada la membrana del plato de presión de 24 horas a 36 horas. Se tomó una porción de suelo tal que ocupara todo el volumen de los anillos utilizados (uno por cada punto de la curva de retención) para portar la muestra de suelo en el plato de presiones y se colocaron en una bandeja para ser saturadas durante 24 horas manteniendo una capa de agua suficiente para cubrir un cuarto de la altura del cilindro. Se retiraron las muestras saturadas de la bandeja y se deja que el exceso de humedad drene para realizar el pesaje de los cilindros con la muestra saturada. Una vez registrado los pesos de suelo saturado de los cilindros, se lleva la membrana y los anillos al plato de presiones y se sella, posteriormente se aplica la primera presión (1 bar) y se estabiliza dicha presión la cual se mantiene por 24 horas, procedimiento que se repite para 3 y 15 bares. Cada vez que se completan las 24 horas para cada presión, se extrae el anillo correspondiente a dicha presión y se lleva al horno de secado de suelos a una temperatura de 105°C durante 24 horas, una vez seca la muestra se registra el peso y se procede a calcular la humedad para el punto en determinación (1,3 o 15 bares)



Figura 13. Compresor de aire para plato de presiones



Figura 12. Plato de presiones para curva de retencion de humedad del suelo

4.4 CALCULO DE LAA

$$LAA = \frac{(CC - PMP)\%}{100} * Da * P$$

Donde LAA es la lámina de agua aprovechable, CC, capacidad de campo, PMP, punto de marchites permanente, Da, Densidad aparente y P, la profundidad representativa de la muestra.

4.5 SELECCIÓN DE METODO DE INTERPOLACIÓN

La determinación del método de interpolación se realizó teniendo en cuenta tres criterios principales:

- Prueba de normalidad der datos
- Proporción de varianza explicada ($C/(C_0+C)$)
- Análisis del r^2

En la figura xx, se presenta un diagrama del proceso seguido para cada conjunto de datos.

La prueba de normalidad se realizó en el software SPSS (Versión Libre); el test aplicado fue Kolgomorov-Smirnoff (χ). La construcción y selección del semivariograma de mejor ajuste se realizó con el software Gamma Design, así mismo como el cálculo del r^2 .

En los casos en los que se puedo aplicar interpolación geoestadística, se usó Ordinary Kriging (en ambiente ArcGis 10.2), dado que no se tiene inormación previa de la zona de estudio (Cita, xxx).

Las transformaciones usadas para intentar cumplir con el supuesto de normalidad de los datos fueron: Logaritmica, otras.

Finalmente, cuando no fue posible cumplir con el supuesto de normalidad, o la proporción de varianza explicada fue menor al 75% o el valor del r^2 fue menor a 0.5, se utilizaron métodos dterminísticos disponibles en el ArcGis 10.2.

4.6 CORRELACIÓN CON DEGRADACIÓN QUÍMICA

Se realizaron comparaciones espaciales entre los datos obtenidos en la etapa anterior y el diagnóstico de salinidad, sodicidad y suelos magnésicos producidos en el marco de la tesis de maestría “Distribución espacial de las propiedades químicas en los suelos del Distrito de riego RUT”. Las herramientas utilizadas fueron “Spatial Join” e “Intersect” en el ambiente del software ArcGis 10.3. Se identificaron zonas del Distrito donde hubo coincidencia en la localización espacial de zonas afectadas por degradación química con zonas con problemáticas en algunas propiedades físicas evaluadas en el presente trabajo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de las propiedades físicas del suelo en el Distrito RUT se llevaron a cabo bajo análisis estadísticos, geo estadísticos y bases teóricas de la ciencia del suelo, obteniendo así un análisis correspondieron a todos los parámetros evaluados en el Distrito RUT (Da, PMP, CC, Índice de poros, Micro poros, LAA, EPT, DPM 0-25 cm y 25-50 cm) donde los resultados obtenidos de cada propiedad por cada punto muestreado se presentan en el Anexo I.

5.1 PUNTOS DE MUESTREO ELIMINADOS

El diseño del muestreo planteado constaba inicialmente de 100 puntos ubicados a lo largo y ancho del Distrito de riego RUT, los cuales garantizaban por lo menos una muestra representativa por unidad cartográfica, problemas de salinidad y sodicidad en el Distrito. En la Tabla 3 se observan 7 puntos eliminados del muestreo donde se especifica el predio, las coordenadas geográficas, el municipio al cual pertenecen y coordenadas planas de los puntos muestreados, los cuales fueron eliminados por las siguientes problemáticas: los predios 3B157 y 5A360 no cuentan con los valores correspondientes a la curva de retención de humedad, la cual es necesaria para la determinación de CC y PMP y por ende de la LAA, y los predios 3A055, 3A012, 1C227, 2C559 y 1B177 cuentan con valores de la curva de retención de humedad no coherentes teniendo en cuenta el comportamiento de las

demás propiedades bajo estudio. La determinación de la curva de retención es realizada por el laboratorio de aguas y suelos agrícolas (LASA).

Tabla 3. Puntos de muestreo eliminados

Predio	Coordenada		Altura (m)	Municipio	POINT X	POINT Y
	Norte	Este				
3B157	04°35'07,1"	076°03'39,3"	934	La unión	1112812,912	998877,634
5A360	04°32'25.9"	076°04'56.9"	932	La unión	1110435,367	993919,524
3A0550	04°33'06.2"	076°04'10.8"	928	La unión	1111856,237	995156,813
3A0120	04°33'05.8"	076°04'19.9"	928	La unión	1111564,948	995156,406
1C2270	4°28'41.4"	76°06'26.4"	929	Roldanillo	1107680,683	987010,215
2C5590	04°28'12.8"	76°05'58.1"	938	Roldanillo	1108549,005	986147,326
1B1770	04°27'26.5"	076°06'55.2"	928	Roldanillo	1106796,201	984707,202

5.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

En la Tabla 4 se muestra las medidas estadísticas de tendencia central obtenidas tales como media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de variación de curtosis para un total de 93 mediciones por propiedad correspondiente a 93 puntos de muestreo en todo el Distrito de riego RUT.

5.2.1 Estadística tendencia central general

Tabla 4. Medidas de tendencia central por cada propiedad física evaluada

Propiedad	Media	Mediana	Varianza	Desviación	Mínimo	Máximo	Coeficiente de variación	Curtosis
Da	1,41	1,41	0,02	0,15	1,06	1,77	0,10	-0,24
Micro	43,08	43,79	46,78	6,84	25,61	58,22	0,16	0,06
IP	1,10	1,11	0,09	0,31	0,50	2,08	0,28	1,04
DPM25	1,53	1,46	0,39	0,62	0,31	3,33	0,41	0,43
DPM50	1,23	1,10	0,24	0,49	0,57	2,88	0,40	2,69
LAA	37,56	35,51	429,44	20,72	0,11	113,28	0,55	1,42
EPT	51,45	52,60	48,81	6,99	33,35	67,58	0,14	0,21

Densidad aparente

La densidad aparente promedio corresponde a $1,4123 \text{ g/cm}^3$ y el 50% o menos de las mediciones es de $1,4101 \text{ g/cm}^3$ presentando una variación entre ellas de $0,1454 \text{ g/cm}^3$ y obteniendo un coeficiente de variación del 10,30% el cual representa un buen control local ejercido en el muestreo debido a que se garantizó que las únicas variaciones presentes en el mismo fueran las del entorno, las cuales son variables no controladas en el muestreo tales como climatología, textura de suelo, actividad agrícola, etc.

La densidad aparente mínima en las 93 muestras tomadas fue de $1,06 \text{ g/cm}^3$, mientras que la máxima densidad aparente fue de $1,7695 \text{ g/cm}^3$

Espacio poroso total (EPT)

El espacio poroso total en cada muestra corresponde aproximadamente al 51,18% mientras que el 50% de las muestras o menos tienen un espacio poroso total del 52,59%, teniendo una variación del 7,2687% y un coeficiente de variación del 14,20 % el cual no representa una mayor problemática en la evaluación del muestreo debido a que el espacio poroso total presenta una variación considerable para diferentes tipos de suelos.

El EPT mínimo en las 93 mediciones de dicha variable fue del 33,35 % mientras que el EPT máximo correspondió al 67,57%.

Micro poros

En el Distrito RUT se determinó el porcentaje de micro poros del suelo donde se encontró que correspondía aproximadamente a 42,92% y el 50% de las mediciones o menos tienen una micro porosidad del 43,76%. Obteniendo una variación del 7,21% entre las mediciones y un coeficiente de variación del 16,80% la cual, al igual que el espacio poroso total es acertada teniendo en cuenta las variaciones de la dicha propiedad dependiendo en gran parte del tipo de suelo muestreado, sin embargo existen otras variables que pueden afectar dicho valor tales como el método de muestreo y el procesamiento de las muestras.

El porcentaje de micro poros mínimo en las 93 mediciones obtenidas en el Distrito RUT fue de 25,61 % mientras que el valor máximo obtenido correspondió al 58,22%.

Índice de poros

El índice de poros en el Distrito RUT es aproximadamente 1,093 mientras que el 50% o menos del índice de poros registrado fueron de 1,1093 con una variación del 0,3148 entre

las mediciones y un coeficiente de variación del 28,78% el cual representa un valor alto para un muestreo experimental, sin embargo se debe recalcar la heterogeneidad que se presenta en los suelos del Distrito RUT, prácticas agrícolas, cultivos asociados y condiciones del suelo, factores que varía considerablemente el valor del índice de poros.

El índice de poros mínimo que se encontró en las 93 mediciones tomadas del Distrito RUT fue de 0,50, mientras que el valor máximo del índice de poros correspondió a 2,08.

Diámetro ponderado medio (DPM 0-25 cm)

El diámetro ponderado medio (DPM) en los primeros 25 centímetros del suelo en el Distrito RUT corresponde aproximadamente a 1,5567 mm y el 50% o menos de los valores de DPM corresponden al 1,4975 mm presentando una variación entre las mediciones correspondientes a 0,6407 mm y un coeficiente de variación del 41,16% el cual dependió de dos factores fundamentales:

La estabilidad estructural es una propiedad física del suelo que permite observar el comportamiento de los agregados del suelo y el porcentaje de agregados estables al agua (lobo y pulido 2007) dicho porcentaje de agregados estables al agua presenta una variación grande entre diferentes tipos de suelos debido a características propias de él, las cuales adicionalmente varían dependiendo de factores antrópicos que intervienen sobre el suelo.

Las muestras para la determinación del DPM requieren de ciertos pre tratamientos para el análisis tales como: seco al aire y luego el humedecimiento de los agregados por capilaridad, seco al aire y humedecimiento controlado por tensión, seco al aire y humedecimiento rápido (slaked), y húmedo a capacidad de campo (Beare y Bruce, 1993; Cambardella y Elliot, 1993; Six et al., 1998; Márquez et al., 2004). El método de Yoder modificado plantea un pre tratamiento de seco al aire y humedecimiento rápido el cual es el segundo factor de variación en la determinación del DPM debido a que dicho pre tratamiento se realizan a muestras con distinto contenido de humedad y con un tiempo de secado al aire aleatorio de tres días para todas las muestras. De lo anterior se recalca que se presentaron muestras no secas completamente al tercer día, sin embargo se realiza la determinación para no obtener más variaciones en la determinación del DPM.

El DPM mínimo encontrado en las 93 mediciones tomadas en el Distrito RUT fue de 0,3106 mientras que el valor máximo de DPM es de 3,3261 mm.

DPM (25-50 cm)

El diámetro ponderado medio a una profundidad del suelo entre 25 y 50 cm en el Distrito RUT correspondió aproximadamente a 1,252 mm y el 50% o menos de los valores de DPM fue de 1,1134 mm presentando una variación correspondiente al 0,5033 y un coeficiente de variación del 40,20% valor que se presenta debido a los mismos factores explicados anteriormente. (DPM 0-25 CM)

El DPM para una profundidad entre 25 a 50 cm presenta un valor mínimo de 0,5509 mm mientras que el valor máximo obtenido de DPM fue de 2,8765.

CC

Los valores de CC correspondieron aproximadamente a 31,08% y el 50% o menos de los valores de CC fueron de 30,29% presentando una variación entre sí del 7,449% y un coeficiente de variación del 23,97% debido a los diferentes tipos del suelo presentados en el Distrito RUT y las condiciones del mismo.

El valor de CC mínimo encontrado fue de 19,65% mientras que el valor máximo fue de 53,57 %.

PMP

Los valores de PMP correspondieron aproximadamente a 20,47% y el 50% o menos de los valores de PMP fueron de 21,06% presentando una variación entre sí del 6,44% y un coeficiente de variación del 31,46% debido a los diferentes tipos del suelo presentados en el Distrito RUT y las condiciones del mismo.

El valor de PMP mínimo encontrado fue de 4,84% mientras que el valor máximo fue de 38,66%.

Histogramas

Los histogramas correspondientes a las variables en estudio se encuentran en el Anexo II donde se puede apreciar de manera general que la densidad aparente, espacio poroso total, DPM (0-25 cm) y micro poros del suelo presentan una distribución normal o aproximadamente simétrica, y variables como índice de poros, DPM (25-50 cm), lámina de agua aprovechable presentan una no normalidad en los datos, presentando un comportamiento sesgado positivo, lo que indica una gran tendencia a valores bajos de dichas variables en la mayoría de las mediciones obtenidas.

5.2.2 Estadística de tendencia central por orden taxonómico

Propiedad	Orden	Media	Mediana	Varianza	Desviación	Mínimo	Máximo	Coficiente de variación	Curtosis
Da	Inceptisol	1,39	1,40	0,02	0,13	1,15	1,64	0,09	-0,82
	Molisol	1,51	1,53	0,03	0,16	1,06	1,77	0,11	1,99
	Vertisol	1,35	1,39	0,02	0,13	1,11	1,57	0,10	0,29
Micro	Inceptisol	42,85	44,15	53,22	7,29	25,61	54,30	0,17	-0,26
	Molisol	42,22	41,79	22,59	4,75	36,51	55,90	0,11	2,54
	Vertisol	45,48	45,19	56,59	7,52	34,08	58,22	0,17	-0,45
IP	Inceptisol	1,10	1,14	0,08	0,29	0,50	1,71	0,26	-0,45
	Molisol	1,03	1,03	0,06	0,24	0,76	1,80	0,23	4,93
	Vertisol	1,23	1,11	0,20	0,45	0,74	2,08	0,36	0,18
DPM25	Inceptisol	1,48	1,40	0,31	0,56	0,31	2,90	0,38	0,06
	Molisol	1,65	1,69	0,55	0,74	0,57	3,20	0,45	-0,43
	Vertisol	1,52	1,45	0,49	0,70	0,61	3,33	0,46	3,81
DPM50	Inceptisol	1,21	1,13	0,18	0,42	0,58	2,53	0,35	0,87
	Molisol	1,17	1,06	0,27	0,52	0,63	2,85	0,44	5,46
	Vertisol	1,38	1,11	0,51	0,71	0,70	2,88	0,52	1,44
LAA	Inceptisol	34,50	33,76	390,63	19,76	0,11	85,05	0,57	0,17
	Molisol	42,92	41,48	343,86	18,54	17,20	85,73	0,43	-0,14
	Vertisol	42,56	33,69	709,20	26,63	15,24	113,28	0,63	4,22
EPT	Inceptisol	51,41	53,35	53,01	7,28	33,35	63,03	0,14	0,06
	Molisol	50,19	50,79	26,98	5,19	43,09	64,29	0,10	1,62
	Vertisol	53,64	52,57	65,52	8,09	42,55	67,58	0,15	-0,52

5.3 Análisis para selección de método de interpolación

5.3.1 Pruebas de normalidad

Pruebas de normalidad						
PROPEIDAD	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Micro	0,068	84	0,2	0,986	84	0,469
IP	0,086	84	0,181	0,969	84	0,04
DPM 25	0,069	84	0,2	0,97	84	0,046
DPM 50	0,17	84	0,000	0,863	84	0,000
LAA	0,073	84	0,2	0,964	84	0,018
DA	0,04	84	0,2	0,994	84	0,967
EPT	0,091	84	0,083	0,98	84	0,207

Pruebas de normalidad							
Propiedad	Orden	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DAA	Inceptisol	0,068	53	0,2	0,98	53	0,512
	Molisol	0,099	19	0,2	0,944	19	0,31
	Vertisol	0,188	12	0,2	0,934	12	0,427
Micro	Inceptisol	0,124	53	0,042	0,951	53	0,029
	Molisol	0,179	19	0,109	0,899	19	0,046
	Vertisol	0,135	12	0,2	0,959	12	0,766
IP	Inceptisol	0,116	53	0,071	0,966	53	0,139
	Molisol	0,159	19	0,2	0,843	19	0,005
	Vertisol	0,256	12	0,029	0,856	12	0,044
DPM25	Inceptisol	0,081	53	0,2	0,979	53	0,462
	Molisol	0,093	19	0,2	0,968	19	0,744
	Vertisol	0,186	12	0,2	0,869	12	0,064
DPM50	Inceptisol	0,127	53	0,033	0,933	53	0,005
	Molisol	0,249	19	0,003	0,787	19	0,001
	Vertisol	0,274	12	0,013	0,777	12	0,005
LAA	Inceptisol	0,067	53	0,2	0,97	53	0,211
	Molisol	0,105	19	0,2	0,959	19	0,558
	Vertisol	0,277	12	0,012	0,805	12	0,011
EPT	Inceptisol	0,168	53	0,001	0,914	53	0,001
	Molisol	0,11	19	0,2	0,929	19	0,165
	Vertisol	0,185	12	0,2	0,93	12	0,384

5.3.2 GEO ESTADÍSTICA

Tabla 5. Analisis Geoestadístico para eleccion de metodos de interpolación

Propiedad	Lag Distance	uniform interval	Modelo	nugget variance (Co)	Structural variance (Co+c)	Range (A)	residual (SS)	r2	Proporcion (C/[Co+C])
MICROPOROS	12499,76	833,32	exponential	5,40000	46,42000	420,00000	220,00000	0,00400	0,88400
			linear	44,26136	48,28132	12059,67350	200,00000	0,09700	0,08300
			spherical	2,00000	46,41000	590,00000	220,00000	0,00400	0,95700
			Gaussian	7,30000	46,41000	467,65370	220,00000	0,00400	0,84300
IP	12499,76	833,32	exponential	0,01100	0,09400	30,00000	0,00130	0,00000	0,88300
			linear	0,09094	0,09637	12059,67350	0,00126	0,03000	0,05600
			spherical	0,00510	0,09420	510,00000	0,00130	0,00000	0,94600
			Gaussian	0,01630	0,09360	138,56410	0,00130	0,00000	0,82600
DPM25	12499,76	833,32	exponential	0,03000	0,37400	660,00000	0,01920	0,05600	0,92000
			linear	0,35993	0,38254	12059,67350	0,01960	0,03300	0,05900
			spherical	0,01000	0,37400	700,00000	0,01910	0,05600	0,97300
			Gaussian	0,05400	0,37400	606,21780	0,01910	0,05600	0,85600
DPM50	12499,76	833,32	exponential	0,01120	0,22340	420,00000	0,01890	0,00100	0,95000
			linear	0,22335	0,22335	12059,67350	0,01890	0,00000	0,00000
			spherical	0,00010	0,22320	580,00000	0,01890	0,00100	1,00000
			Gaussian	0,02840	0,22380	467,65370	0,01890	0,00100	0,87300
LAA	12499,76	833,32	exponential	75,00000	454,40000	30,00000	44598,00000	0,00000	0,83500
			linear	452,04743	456,51606	12059,67350	44571,00000	0,00100	0,01000
			spherical	56,00000	454,40000	510,00000	44598,00000	0,00000	0,87700
			Gaussian	102,00000	454,40000	138,56410	44598,00000	0,00000	0,77600
DA	12499,76	833,32	exponential	0,00125	0,02150	1500,00000	0,00005	0,57700	0,94200
			linear	0,02017	0,02143	12059,67350	0,00010	0,02000	0,05900
			spherical	0,00126	0,02142	1250,00000	0,00004	0,62300	0,94100
			Gaussian	0,00365	0,02140	1039,23050	0,00004	0,62300	0,82900
EPT	12499,76	833,32	exponential	5,70000	48,76000	360,00000	395,00000	0,00100	0,88300
			linear	45,19049	52,00322	12059,67350	334,00000	0,15500	0,13100
			spherical	2,70000	48,77000	570,00000	395,00000	0,00100	0,94500
			Gaussian	8,00000	48,76000	433,01270	396,00000	0,00100	0,83600

5.4 Resultados de interpolación por métodos seleccionados

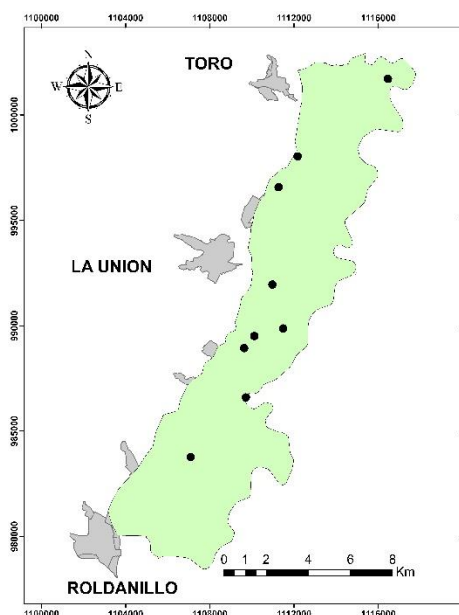
PROPIEDAD	METODO	Root-Mean-Square	Mean
EPT	IDW	6,9838	0,3866
	RBF	7,0191	0,3459
	GPI	7,1490	0,0270
LAA	IDW	22,1142	0,2759
	RBF	23,0578	0,0951
	GPI	20,5256	-0,0133
MICRO	IDW	6,7980	0,4124
	RBF	6,8222	0,3578
	GPI	7,0136	0,0277
IP	IDW	0,3095	0,0161
	RBF	0,3114	0,0148
	GPI	0,3141	0,0011
DMP25	IDW	0,6210	0,0073
	RBF	0,6374	0,0083
	GPI	0,6295	-0,0014
DMP50	IDW	0,4750	0,0208
	RBF	0,4808	0,0154
	GPI	0,5037	0,0003

PROPIEDAD	METODO	Root-Mean-Square	Mean	Root-Mean-Square standardized	Mean standardized
DA	Krging ordinary	0,15631731	-0,00846706	1,253324965	-0,03384921
DA	simple	0,14564989	-0,01184541	8,489258864	-0,46670263
DA	universal	0,15631731	-0,00846706	1,253324965	-0,03384921

5.5 Validacion de métodos de interpolación

5.5.1 Puntos para validación

Punto		
código	point x	point y
4B1590	1116459,887	1001711,348
3A0270	1112170,585	998032,925
3A0190	1111264,914	996573,570
1D378C	1110973,250	991949,155
1D4210	1111484,200	989870,743
1C2810	1110116,221	989511,102
1C2910	1109629,226	988936,662
2C4980	1109713,682	986594,407
1B1250	1107095,535	983762,553



5.5.2 resultados de validación

Propiedad	Determinístico	PCE	E
LAA	IDW	291,016365	6,3%
	GPI	286,470968	7,9%
	RBF	320,366859	4,8%
Micro	IDW	86,4339587	17,2%
	GPI	98,3210621	2,8%
	RBF	86,3399761	20,7%
EPT	IDW	86,3470093	7,5%
	GPI	95,0871839	-6,3%
	RBF	89,5555292	8,0%
IP	IDW	0,13316976	9,9%
	GPI	0,15269786	-6,7%
	RBF	0,13166633	14,0%
DPM 25	IDW	0,4820584	25,3%
	GPI	0,57242485	9,7%
	RBF	0,39220783	37,6%
DPM 50	IDW	0,34833065	9,7%
	GPI	0,36850007	0,2%
	RBF	0,33305766	15,8%
Da	IDW	0,01783519	22,4%
	GPI	0,02441518	-7,7%
	RBF	0,01292411	43,8%

Propiedad	Kriging	PCE	E
Da	ORDINARY	0,00978711	57,5%
	SIMPLE	0,01169281	49,5%

5.6 INTERPOLACIÓN

Los mapas correspondientes a las propiedades físicas del suelo evaluadas en el Distrito RUT se presentan a continuación, identificando las zonas críticas bajo un análisis individual según la clasificación teórica correspondiente a cada propiedad física del suelo.

5.6.1 Densidad aparente

El mapa de densidad aparente de la Figura 16, obtenido mediante el método de interpolación Kriging Ordinary indican que las zonas con densidad aparente adecuada se encuentran al sureste y en la zona central del Distrito RUT y corresponden al 34,34% del área total, además se puede observar que existen zonas con problemas de densidad aparente al noreste, suroeste y zona central del Distrito correspondiente al 46,14% del área total.

El área restante equivalente al 19,52% presenta valores de densidad aparente críticos en un rango de $1,5 \text{ gr/cm}^3$ y $1,7 \text{ gr/cm}^3$ ubicados principalmente al noroeste, suroeste y zona central este del Distrito.

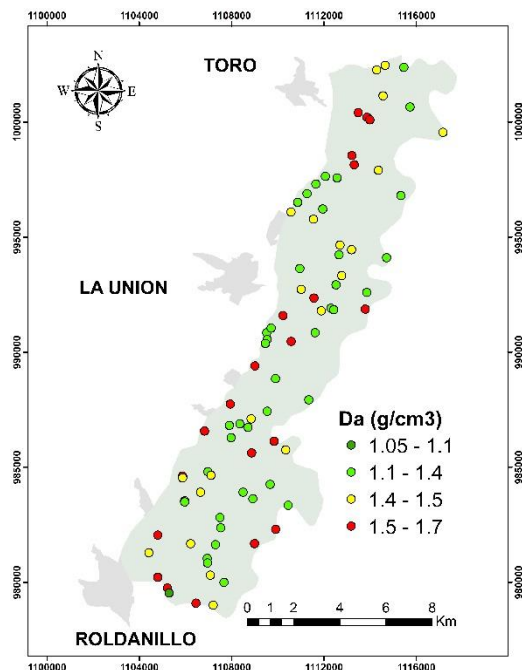


Figura 14. Mapa de densidad aparente por metodo de cilindro biselado

5.2.3 EPT

El mapa correspondiente al espacio poroso total (EPT) en los suelos del Distrito RUT obtenido por el método de interpolación Kriging Ordinary que se muestra en la Figura 17, se observa un área mínima sin un gran peso porcentual como zona crítica correspondiendo al 0,12% del área total en un rango entre 32% y 40% en la parte central del Distrito, adicionalmente se presentan zonas problemas en la parte central, noreste y suroeste del Distrito involucrando un área correspondiente al 36,09% del área total.

El 56,27% del área del Distrito RUT presenta problemática media en la zona noroeste, central y en mayor concentración en la parte norte del Distrito y el área restante correspondiente al 7,52% del área total presentan una adecuada porosidad del suelo involucrando parte del noroeste y sur del Distrito. El área porcentual para cada clasificación de EPT nos permite identificar que la mayor parte de los suelos en el Distrito RUT se encuentra con una porosidad baja y/o media correspondiendo al 92,48% del área total equivalente a 10194,0 ha de suelo.

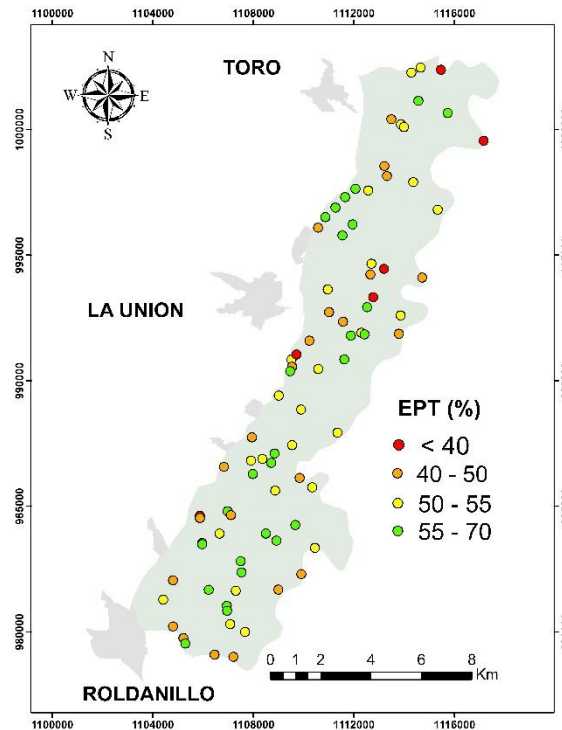


Figura 15. Mapa de espacio poroso total en los suelos del Distrito RUT

5.2.4 Micro poros

El mapa de la Figura 18 obtenido por interpolación Kriging Ordinary correspondiente al porcentaje de micro poros muestra de manera general que los suelos del Distrito RUT cuentan con un buen porcentaje de micro poros, involucrando el 72,67% del área total del Distrito, en zonas al norte, centro y sur del Distrito.

También se observan que el 26,6% del área total del Distrito se presentan valores medios en el porcentaje de micro poros en la zona sureste, suroeste y central del Distrito y un porcentaje de área mínimo del 0,72% con problemas críticos en los micro poros del suelo con valores entre 18% y 35% en la zona central y suroeste del Distrito

Podemos observar que la problemática va en aumento debido a que cada zona con una problemática media (valores entre 35% y 41%) tienen asociado un porcentaje mínimo con valores críticos de porcentaje de micro poros (contraste de color amarillo y rojo en zona central, suroeste y norte del Distrito)

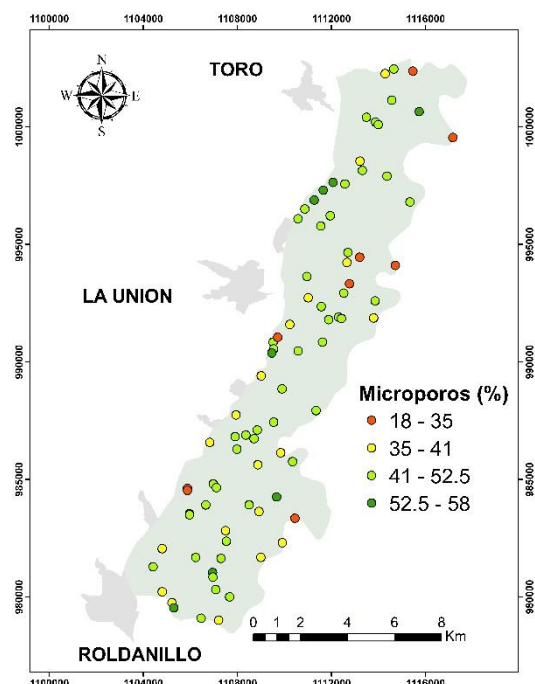


Figura 16. Mapa de micro poros presentes en los suelos del Distrito RUT

5.2.5 Índice de poros

El mapa correspondiente al índice de poros obtenido por el método de interpolación Kriging Ordinary que se muestra en la Figura 19, presenta el 91,58% del área total del Distrito (10095,14 ha) presentan un una problemática en dicha propiedad, con valores aproximados entre 0,89 y 1,38, adicionalmente el 7,09% del área del Distrito presenta valores críticos entre 0,55 y 0,89 y tan solo el 1,33% del área total (147,01 ha) cuentan con valores óptimos en la evaluación del índice de poros (1,38-1,91) identificando así una problemática en la mayor parte del Distrito.

Se debe recalcar que junto a la densidad aparente, el índice de poros es una variable que permite visualizar problemas de compactación del suelo debido a que a menores valores del índice de poros existe una mayor compactación del suelo, por tanto podemos plantear una problemática de compactación en el Distrito RUT a partir de dicha variable.

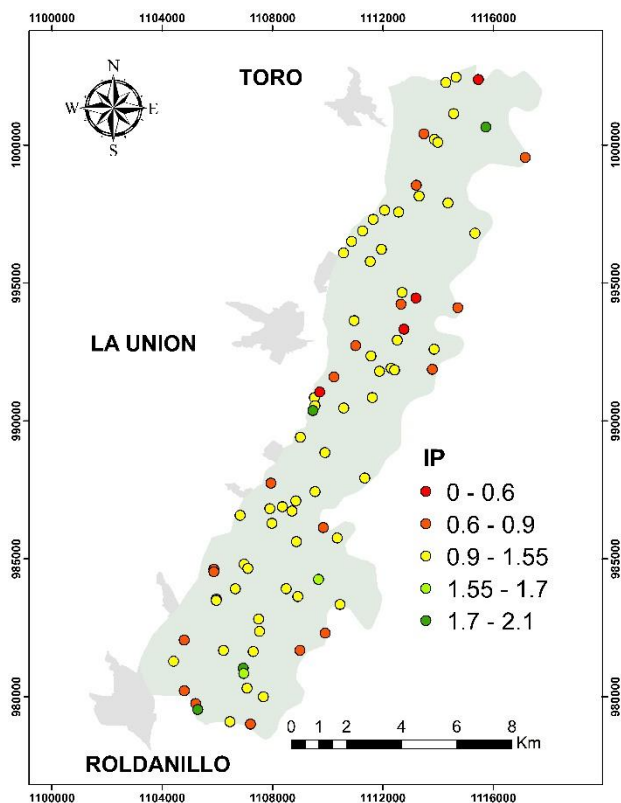


Figura 17. Mapa del Índice de poros de los suelos del Distrito RUT

5.2.6 DPM (0-25 cm)

El mapa de la Figura 20 correspondiente al diámetro ponderado medio (DPM) a una profundidad entre 0 cm y 25 cm obtenido con el método de interpolación Kriging Ordinary indica que los valores más críticos del DPM se encuentran en la zona central, suroeste y sureste del Distrito comprendiendo un 45,656% del área total y un 54,338% del área total con problemática media en zona norte, central y al sur del Distrito.

Se presentan dos extremos mínimos despreciables porcentualmente correspondientes al 0,004% del área total para valores críticos del DPM (0-0,5 mm) y 0,002% del área total para los valores máximos del DPM (3-5 mm).

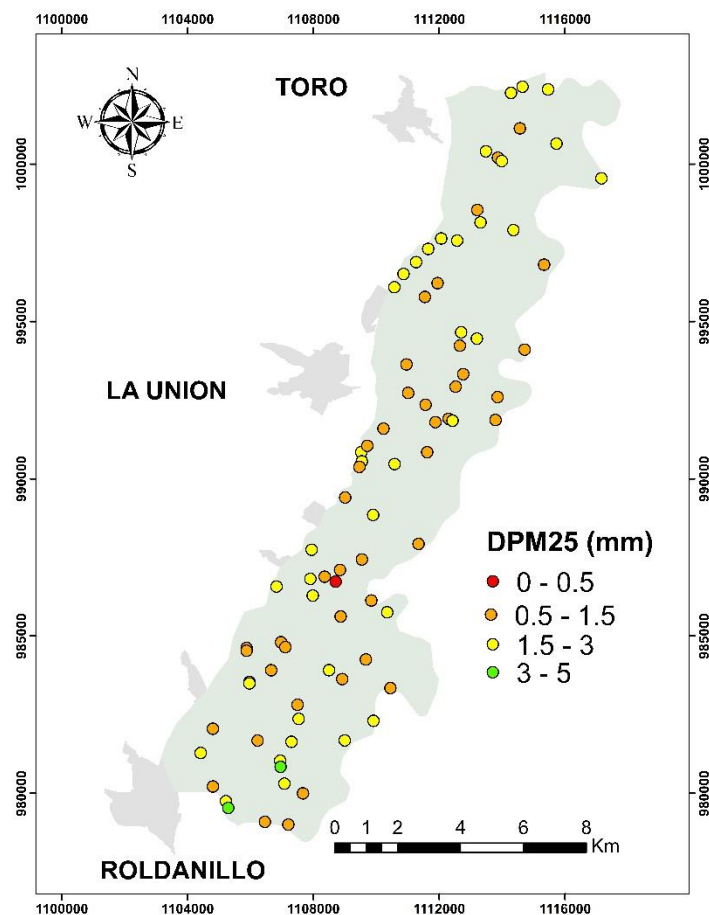


Figura 18. Mapa del DPM a una profundidad entre 0-25 cm del perfil del suelo

5.2.7 DPM (25-50 cm)

El mapa correspondiente al diámetro ponderado medio (DPM) a una profundidad entre 25cm y 50cm obtenido con el método de interpolación Kriging Ordinary que se observa en la Figura 21, presenta dos estados dominantes, crítico y medio. El 88,16% (9718,41 ha) del área total corresponde a valores de DPM entre 0,5 mm y 1,5 mm a lo largo de todo el Distrito RUT y el 11,84% restante del área total presentan valores de DPM entre 1,5 mm y 3,0 mm en suelos al sur, zona central y noreste del Distrito RUT.

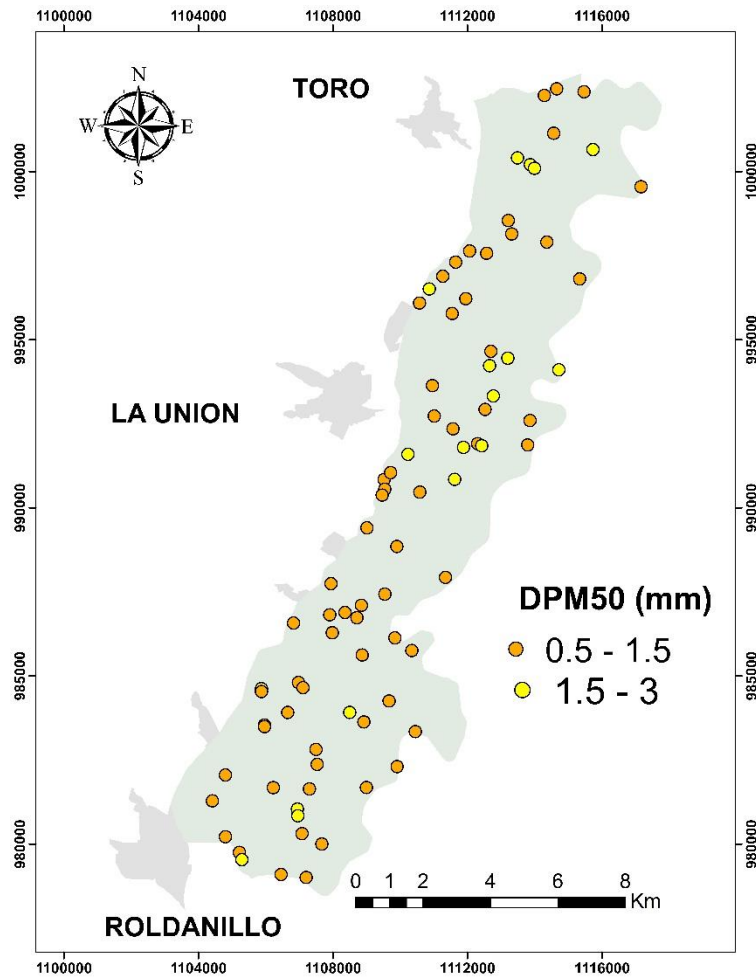


Figura 19. Mapa del DPM a una profundidad entre 25 y 50 cm del perfil del suelo

5.2.8 LAA

El mapa de la Figura 22 corresponde al obtenido para la lámina de agua aprovechable (LAA) a partir del método de interpolación Kriging Ordinary donde se observa una deficiencia en dicha propiedad en gran parte del Distrito.

Se obtiene un estado crítico en la zona central del Distrito correspondiente al 0,18% del área total con valores de LAA entre 0 mm y 12 mm, adicionalmente se tiene que el 7,99%

del área total cuenta con una problemática importante en la zona central del Distrito lo que lleva a concluir que la mayor zona afectada del distrito corresponde a la central.

No obstante el 52,54% del área total del Distrito se encuentra bajo una problemática media nuevamente afectando la zona central, sureste y noreste del mismo del Distrito identificando una problemática en el sector del Distrito al margen del rio cauca donde se ubica el canal marginal, dique de protección y estaciones de bombeo del Distrito.

El área restante correspondiente al 39,28% del área total se encuentra en condiciones adecuadas de LAA involucrando zonas al suroeste y noroeste del Distrito y algunos sectores de la zona central.

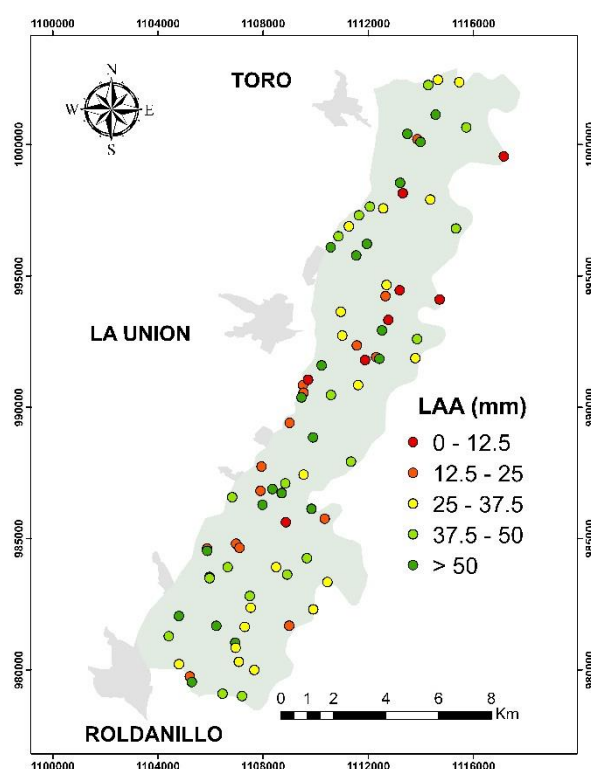


Figura 20. Mapa de lamina de agua aprovechable en los suelos del Distrito RUT

5.3 RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES FÍSICAS

El suelo contiene numerosos componentes que lo conforman biológica, química y físicamente, dichos componentes están relacionados de una u otra manera entre sí. Las propiedades físicas del suelo se ven directamente relacionadas unas con otras y por ende

es de suma importancia observar los comportamientos entre las propiedades físicas del suelo en zonas críticas del Distrito RUT y buscar una relación entre ellas.

5.3.3 LAA-Índice de poros –EPT-Micro poros

La relación existente entre las cuatro propiedades mencionadas se puede observar partir de dos análisis.

Realizando un análisis punto a punto de las cuatro propiedades mencionadas se encontró que para los valores más críticos de lámina de agua aprovechable (0-12mm) por lo menos una de las propiedades físicas del suelo (índice de poros, EPT, micro y macro poros y densidad aparente) presentan valores críticos o medios según la clasificación dada para cada propiedad. Analizando la Tabla 4 podemos concluir que para un EPT bajo, una densidad aparente alta y un índice de poros bajo se presentan problemas de compactación lo que trae como consecuencia una disminución en el espacio poroso total del suelo tendiendo a que los macro poros del suelo sean bajos y el espacio de retención de humedad sea mínimo por ende la lámina de agua aprovechable del suelo sea crítica. Caso contrario ocurre con el mayor valor de lámina de agua encontrado, al cual se le asocian por lo menos una de las tres propiedades mencionadas en valores ideales.

Tabla 6. Analisis por predio de propiedades fisicas del suelo y su afectacion sobre la lamina de agua aprovechable

Código del predio	Micro poros (%)	Macro poros (%)	Índice poros	LAA (mm)	Da tradicional (g/cm ³)	EPT (%)
4B1570	30,92	6,89	0,61	2,60	1,47	37,81
3B1540	44,38	5,33	0,99	9,57	1,51	49,72
4A0710	28,60	4,75	0,50	9,75	1,45	33,35
4A0940	30,78	9,51	0,67	1,23	1,37	40,29
4A0580	29,67	7,60	0,59	0,11	1,41	37,27
1C3410	57,10	10,48	2,08	113,28	1,16	67,58
1C2810	29,66	4,09	0,51	5,49	1,48	33,75
2C5280	39,63	10,81	1,02	3,16	1,58	50,44
1B1250	28,06	10,88	0,64	7,12	1,30	38,95

Observando los mapas de las Figuras 17, 18, 19 y 22 correspondientes a los mapas de EPT, micro poros del suelo, índice de poros y LAA, existe una zona problema en común al noreste del Distrito sobre el margen del río Cauca correspondiente a los puntos especificados en la Tabla 3 ratificando así la relación que se presenta entre las variables y como se ve afectada la lámina de agua aprovechable de un suelo cuando se presentan problemáticas en otras propiedades físicas del suelo. Se observa que en otras zonas del

Distrito donde existen problemáticas de lámina de agua (sureste del Distrito) también se presentan deficiencias en las otras propiedades analizadas, sin embargo no se toman como referencia general como la zona noreste del Distrito debido a que no se presenta una homogeneidad entre problemáticas en ese sector.

5.3.4 Densidad aparente- espacio poroso total

Analizando los mapas correspondientes al espacio poroso total (Figura 17) y la densidad del suelo (Figura 16). En zonas al sureste, central y el noroeste del Distrito se presentan los valores críticos de densidad aparente los cuales corresponden a las zonas donde se presentan valores medios (40% - 50%) de espacio poroso total lo cual nos permite observar la relación que se presenta entre ambas propiedades, de igual manera para las zonas con densidad aparente ideal al sur y noroeste del Distrito se presentan los porcentajes de espacio poroso ideales para el suelo.

En la zona noreste del Distrito donde no se presenta la anterior relación entre las dos propiedades, presentando problemática en el EPT pero no en la Da vale recalcar que, dicha zona corresponde a la de mayor problemática del Distrito teniendo en cuenta las problemáticas descritas en el ítem 5.5.1 por ende se considera una zona propensa a presentar problemas de densidad aparente y que la relación planteada anteriormente sea efectiva en este sector (densidades aparente medias en un rango de $1,4 \text{ g/cm}^3$ a $1,5 \text{ g/cm}^3$).

5.3.5 Relación entre DPM para una profundidad entre 0-25 cm y 25-50 cm

El mapa correspondiente al diámetro ponderado medio del Distrito RUT para dos profundidades analizadas se muestra en la Figura 20 y 21 donde podemos observar que existe una mayor problemática en los segundos 25 cm del suelo, sin embargo los primeros 25 muestran un comportamiento similar en algunos sectores en la zona sur y central del Distrito por tanto se puede suponer que la problemática va en aumento para los primeros 25 cm del suelo, no obstante se debe recalcar que según Olarte (1979) citado por Jaramillo (2002) para valores menores de 0,5 mm el suelo presenta una mala estructuración, valor que no se presenta en el Distrito RUT, por tanto podemos plantear que el suelo aun no presenta una mala estructuración, pero este tiende a presentarla, debido a que el 45,656% del área total del Distrito se encuentra valores entre 0,5 y 1,5 mm para los primeros 25 cm

del suelo y el 88,16% del área total se encuentra en el mismo rango de valores para una profundidad entre 25 a 50 cm.

5.4 RELACION CON OTRAS PROBLEMATICAS IDENTIFICADAS

Para el análisis integral de las problemáticas identificadas en el Distrito RUT se llevó a cabo un estudio de trabajos de grado anteriormente realizados a otros factores que afectan las propiedades del suelo tales como variables climatológicas, salinización, calidad de agua para riego y prácticas de fertilización, encontrando una mayor correlación con estudios correspondientes a degradación química de los suelos del RUT (salinización, sodicidad y suelos magnésicos), siendo esta el mayor factor de variación en las propiedades físicas del suelo a diferencia de los otros factores mencionados anteriormente (climatología, calidad de agua para riego, practica de fertilización).

5.4.3 *Relación entre zonas críticas identificadas y problemas de salinización*

Como se identificó anteriormente, la zona más crítica encontrada en Distrito RUT está ubicada al noreste del Distrito donde se identifican las mayores problemáticas por cada propiedad analizada, dicha zona se encuentra bajo suelos moderadamente salinos y altamente salinos para una profundidad entre 0 cm y 25 cm del perfil del suelo como se observa en el mapa de la Figura 23. Suelos muy ligeramente salinos corresponden a zonas donde las propiedades físicas del suelo analizadas tienden a presentar valores medios de cada propiedad por ende podemos observar la afectación que tiene sobre las propiedades físicas, problemas de salinidad en los suelos.

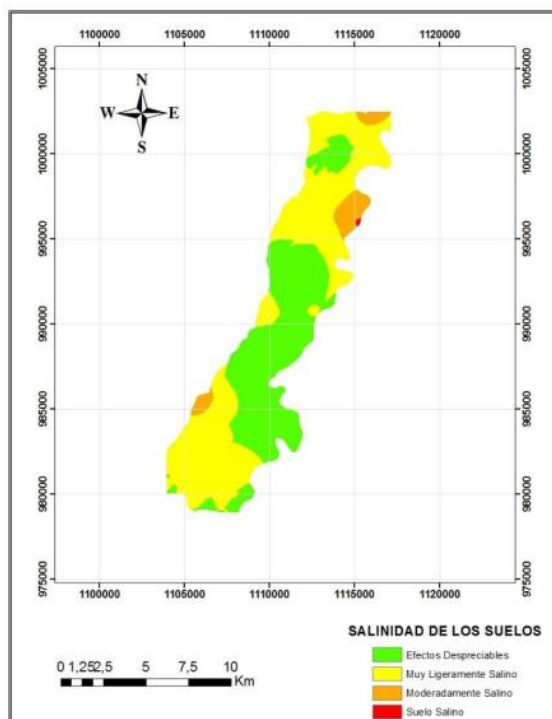


Figura 21. Mapa de salinidad de suelos a una profundidad entre 0-25 cm

Fuente. Cubillos y Hurtado (2015)

5.4.4 Relación entre zonas críticas identificadas y problemas de sodicida

Los suelos sódicos generan una estructura inestable en términos físicos, en general un exceso de sodio intercambiable no perjudica el desarrollo de las plantas por sus efectos químicos, sino por la degradación física generada, especialmente cuando los suelos tienen una estructura fina. La dispersión de las arcillas y la consiguiente destrucción de los agregados alteran su estructura de tal modo que los hace muy compactos y poco porosos, por lo que terminan siendo altamente impermeables al agua, analizando el mapa de la Figura 24, se puede sustentar lo anterior, donde podemos observar que en la zona sur del Distrito es la parte crítica en cuanto a sodicidad, zona la cual coincide con problemas medios de lámina de agua (Figura 22), haciendo referencia a la impermeabilización del suelo, las zonas con bajo porcentaje de micro poros del suelo (Figura 18), ratificando la poca porosidad del suelo (Figura 17) por sodicidad y pocos sectores coincidentes con valores

críticos de densidad aparente (Figura 16), haciendo referencia a la compactación que genera altos valores de sodio en el suelo.

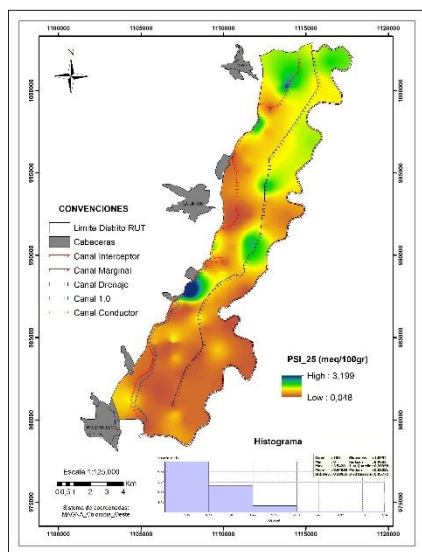


Figura 22. Mapa de sodicidad en el Distrito RUT para una profundidad de 0-25 cm

Fuente. López (2016)

5.4.5 Relación entre zonas críticas identificadas y problemas por suelos magnésicos

García (1994) citado por Arboleda (2009) plantea que el Mg^{+2} puede hacer variar la densidad aparente de un suelo al causar la dispersión de las arcillas y afectar el volumen del suelo. Las partículas dispersas se mueven y depositan en los poros del suelo disminuyendo su diámetro y ocluyéndolos, haciendo que la densidad aparente aumente. Observando la Figura 25 podemos identificar que en la zona noreste, sureste y la zona media del Distrito son las zonas críticas en contenido de magnesio en el suelo, coincidiendo con las zonas críticas de densidad aparente (Figura 16), ratificando así el planteamiento anterior y concluyendo que altos contenidos de magnesio en el suelo afectan propiedades físicas del suelo como la densidad aparente generando posiblemente problemas de compactación y afectación de otras propiedades físicas del suelo.

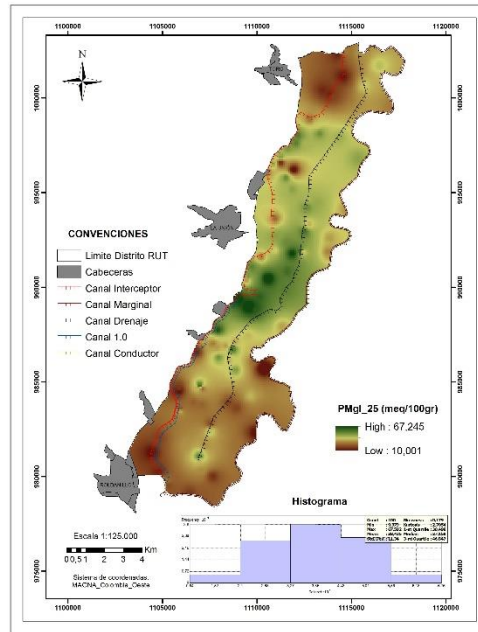


Figura 23. Mapa de contenido de magnesio en los suelos del Distrito RUT para una profundidad de 0-25 cm

Fuente. López (2016)

6 CONCLUSIONES

La espacialización de las propiedades físicas en el Distrito RUT permitió identificar que se presenta alta variabilidad de las propiedades físicas del suelo. La parte noreste del Distrito es la más afectada, presentando puntos críticos por propiedad física del suelo evaluada, sin embargo existen zonas del Distrito que de igual manera presentan deficiencias en sus propiedades físicas, dando a entender que la mayor parte del área totalidad del Distrito está presentando un proceso de degradación física del suelo. Dicho proceso puede ser incrementado por diferentes factores como la climatología, calidad de agua para riego, factores antrópicos y efectos de degradación química del suelo principalmente por salinidad y contenido de magnesio en el suelo.

Existe una clara correlación espacial entre las áreas afectadas por degradación química y las zonas afectadas físicamente. Observando, la zona noreste del Distrito donde se presentan suelos salinos y moderadamente salinos coinciden con la zona más deficiente en valores de propiedades físicas, de igual manera las zonas críticas diferentes a la zona noreste del Distrito, coinciden con las zonas donde se presentan suelos con un alto contenido de sodio y magnesio, siendo estas sales perjudiciales para la estructura del suelo, porosidad total y generando procesos de compactación del suelo que llevan a una mala aireación así como una baja retención de humedad del suelo.

La zonificación de propiedades físicas del suelo presentadas en este trabajo representan una herramienta de planificación que puede ser usada para orientar las futuras acciones de identificación detallada de zonas críticas, emprendimiento de proyectos de mejoramiento de suelos y en general orientación de producción en armonía con el recurso suelo.

7 RECOMENDACIONES

- Se sugiere usar los presentes resultados como guía para densificar los muestreos en los lugares identificados como críticos y diagnosticar en detalle, a nivel predial, los problemas de degradación física.
- Es conveniente realizar un análisis de estos resultados contra el uso actual del suelo, el cual cambia cada semestre en el Distrito RUT y generar recomendaciones de prácticas culturales acordes con el estado actual del suelo.
- Se recomienda realizar un nuevo diagnostico a un periodo de tiempo de 5 años para observar cómo ha evolucionado la problemática actual, si se presenta un crecimiento o una disminución de la misma y así mismo plantear nuevos manejos del suelo y agua en el Distrito de riego RUT.
- Es importante realizar prácticas agrícolas que ayuden al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo en las zonas críticas del Distrito de riego RUT, en búsqueda de omitir procesos de compactación del suelo, mal drenaje, poca aireación del suelo y demás factores que generen deficiencia en la producción agrícola y pérdida del recurso suelo por procesos de degradación química o física, para ello existe la necesidad de generar capacitaciones enfocadas a la realización de prácticas agrícolas adecuadas para pequeños y medianos agricultores que contribuyan a la conservación del suelo.
- Se debe generar un uso adecuado y eficiente del agua en los procesos de irrigación que se llevan acabo en el Distrito RUT, debido a que el agua es un factor importante en la conservación o deterioro del recurso suelo.
- Se recomienda realizar estudios similares en otras áreas del conocimiento, como por ejemplo, propiedades químicas y biológicas del suelo, clima, nivel freático, entre otras, para lograr un análisis integrado de la situación y generar lineamientos de uso del suelo y agua en el Distrito de riego RUT.

8 BIBLIOGRAFÍA

AGER INGENIEROS. Ingeniería rural y civil. 2003. Los sistemas de información geográfica, características y aplicaciones generales. 2-3 p.

BAQUERO, M. 2011. Estudio de los efectos troposféricos en la precisión de mediciones GPS en el suroccidente colombiano. Universidad del Valle. Cali Colombia.

CASANOVA, E. 1991. Introducción a la ciencia del suelo universidad central de Venezuela facultad de agronomía consejo de desarrollo científico y humanístico. 97p, 113p.

CASTELLANOS, J. 2008. Guía para la interpretación del análisis de suelo y agua. INTAGRI.

COBERTERA, E. 1993. Edafología aplicada: Suelos, producción agraria, planificación territorial e impacto ambiental. Madrid. 64p.

COMUNIDADES EUROPEAS. 2009. Agricultura sostenible y conservación de los suelos, Procesos de degradación del suelo. Ficha Informativa N°4.

CUBILLOS, D; HURTADO, C. 2015. Diagnóstico de la salinidad de los suelos en el Distrito de riego RUT, Valle del Cauca. Trabajo de grado, universidad del valle.

DUARTE, B. 2010. Dinámica histórica de los derechos de agua en el Valle del Cauca-Colombia. Tesis de maestría, Universidad de Wageningen, Holanda. 37p.

ECHEVERRI, A. 2014. Modelo para la identificación del riesgo de salinización de suelos asociado a la calidad del agua de riego. Caso de estudio: Distrito de riego RUT, Valle del Cauca, Colombia. 42p.

FAO. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, el significado de la porosidad del suelo. Roma. 18-19p.

FAO. 2007. Portal de suelos de la FAO, levantamiento de suelos, propiedades del suelo, propiedades físicas. Recurso electrónico disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.

GALLARDO, A. 2006. Geoestadística. Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente.

GALLARDO, A; MAESTRE, F. 2008. Metodos Geoestadisticos para el análisis de datos ecológicos especialmente explicitos. Capítulo 6.

IGAC-CVC. 2004

JARAMILLO, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo, Universidad Nacional de Colombia, facultad de ciencias, Medellín. 186, 195, 109-112 p.

JUAREZ, M.; SANCHEZ, J; SANCHEZ A. 2006. Química del suelo y medio ambiente. Universidad de alicante. 589p, 596-597p.

LOBO, D; PULIDO, M. 2007. Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. Universidad central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología.

López, C. 2016. Distribución espacial de las propiedades químicas en los suelos del Distrito de riego RUT. Tesis (Maestría).Universidad Nacional sede Palmira. Colombia

Márquez, C.O.; V. J. Garcia; C. A. Cambardella; R. C. Schultz; T. M. Isenhardt. 2004. AggregateSize Stability Distribution and Soil Stability. Soil Sci. Soc. Am. J. 68(3): 725 - 735.

Máser LTDA (2015). Productos para estudio de suelos. Recurso electrónico disponible en www.maser.com.co/producto.php?idProducto=846&color=33&categorias_id=116

MARTINEZ, E. 2008. Estudio de propiedades hídricas del suelo mediante medidores de actividad de agua en la zona regable de terra cha. Lugo. USC. 59p.

MERINO, E. 2007. Análisis de suelo y consejos de abonado. Valladolid, España.

MURILLO, D et al. 2002. Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. 63p.

NACIONES UNIDAS NUEVA YORK. 2000. Manual de sistemas de información geográfica y cartografía digital.

OLIVER, M.A. and WEBSTER, R. 2013. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging.

PORTA, J.; LOPEZ-ACEVEDO M.; ROQUERO, C. 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid. 261-268p.

REYES, J. VÁSQUEZ, R. TREMOLS, A (2005). Introducción a la agroquímica. Editorial Universidad Autónoma de Puebla. México. 82p.

UNAM. 2005. Manual de procedimientos analíticos, laboratorio de física de suelos, departamento de edafología. México. 8p.

U.N.L.P. 2014. Apunte de edafología, curso edafología, departamento de ambiente y recursos naturales, facultad de ciencias agrarias y forestales. 9p.

URRUTIA, N. 2005. Una visión a la problemática del Distrito de riego roldanillo- la unión-toro: RUT. Cali. Universidad del valle. 4p.

URRUTIA, N. 2011. Evento internacional del agua 2011: ecosistemas y sociedad, seminario: inundaciones, escasez de agua y ecosistemas, impacto ola invernal 2010-2011 Distrito de riego RUT. Cali. EIDENAR. 6-8p.

URRUTIA, N.; DOSSMAN, C. (2007). Una visión moderna para el manejo del Distrito de Riego y Drenaje RUT. La Habana, Cuba. 17p

VALENZUELA, I.; TORRENTE, A. 2013. Ciencia del suelo: Principios básicos/ Sociedad colombiana de la ciencia del suelo/ Hernan Burbano, Francisco Silva (Editores). Capitulo III. 90p.

VILLATORO, M. et al. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de PH, CA, CICE Y P del suelo. 96-97p.

ANEXOS

ANEXOS I

**Valores de las propiedades físicas
evaluadas en el Distrito RUT por
predio para 100 puntos de
muestreo**

Tabla 7. Resultado de propiedades físicas en los suelos del Distrito RUT

Propiedades físicas en los suelos del Distrito RUT para 100 puntos muestreados													
código del predio	Coordenadas		ALTURA (m.s.n.m)	Da (g/cm3)	Macro poros (%)	Micro poros (%)	EPT	Índice de poros	DPM 0-25 cm (mm)	DPM 25-50 cm (mm)	CC (%)	PMP (%)	LAA (mm)
	NORTE	ESTE											
5A4170	04°36'57.0"	076°02'51.5"	937	1,42	0,11	0,40	0,51	1,06	1,50	0,90	28,21	15,89	43,600
3B2150	04°37'03.8"	076°02'39.5"	938	1,41	0,07	0,46	0,53	1,11	1,96	1,33	32,46	22,89	33,738
4B1590	04°36'38.8"	076°01'40.9"	938	1,48	0,05	0,49	0,53	1,14	2,82	1,65	32,98	24,76	30,326
4B1870	04°37'00.6"	076°02'13.3"	940	1,35	0,10	0,28	0,37	0,60	1,68	1,06	20,46	12,84	25,753
5A4150	04°36'20.5"	076°02'42.4"	926	1,49	0,10	0,45	0,55	1,24	1,36	1,06	30,15	9,27	77,832
5A4270	04°35'56.9"	076°03'17.7"	928	1,64	0,04	0,42	0,46	0,86	1,77	1,56	25,69	4,84	85,726
3B2050	04°36'04.6"	076°02'04.9"	933	1,36	0,10	0,53	0,63	1,70	1,82	2,02	39,07	27,27	40,037
5A3990	04°35'49.9"	076°03'05.0"	926	1,53	0,06	0,45	0,51	1,03	1,23	1,87	29,21	23,02	23,744
4B1570	04°35'28.8"	076°01'18.3"	930	1,47	0,07	0,31	0,38	0,61	1,84	1,05	21,10	20,39	2,600
3B1520	04°35'46.3"	076°03'01.3"	933	1,62	0,10	0,41	0,51	1,06	2,87	1,56	25,46	11,57	56,278
3B157	04°35'07.1"	076°03'39.3"	934	1,55	0,06	0,41	0,46	0,86	1,11	0,59	26,20		101,429
3B1550	04°34'56.4"	076°03'26.3"	934	1,56	0,05	0,40	0,44	0,80	0,57	0,63	25,51	9,28	63,167
2D9070	04°31'18.8"	076°03'08.0"	930	1,59	0,07	0,38	0,45	0,82	1,17	1,35	24,10	16,90	28,677
3B1540	04°34'42.9"	076°03'23.1"	925	1,51	0,05	0,44	0,50	0,99	1,66	0,79	29,46	26,92	9,566
4A1490	04°34'35.6"	076°02'49.3"	929	1,50	0,07	0,45	0,53	1,11	1,94	1,42	30,15	20,63	35,695
3A0270	04°34'39.8"	076°04'00.3"	939	1,35	0,08	0,52	0,60	1,49	2,14	1,35	38,58	22,81	53,211
3A0280	04°34'26.7"	076°04'03.8"	926	1,24	0,05	0,54	0,59	1,43	1,94	1,22	43,44	30,12	41,131
3A0840	04°34'24.1"	076°03'47.4"	935	1,36	0,09	0,45	0,53	1,14	2,71	0,89	32,86	24,77	27,517
3A1190	04°33'59.3"	076°03'17.5"	926	1,40	0,05	0,48	0,53	1,12	1,46	1,15	34,28	21,79	43,796
4A0530	04°33'26.0"	076°02'20.5"	927	1,46	0,12	0,44	0,56	1,26	1,50	0,78	30,38	15,63	53,672
3A0240	04°34'02.3"	076°04'29.9"	923	1,22	0,05	0,54	0,60	1,48	1,84	1,42	44,67	34,78	30,051
3A0250	04°34'15.9"	076°04'17.1"	925	1,23	0,05	0,54	0,59	1,41	2,12	0,88	43,73	28,16	47,925
3A0670	04°33'40.5"	076°04'07.4"	931	1,30	0,07	0,49	0,56	1,26	1,35	1,09	37,41	12,89	79,712
3A0190	04°33'52.1"	076°04'29.7"	923	1,08	0,05	0,58	0,63	1,67	2,58	2,03	53,57	38,66	40,090
3A0170	04°33'50.0"	076°04'42.8"	928	1,27	0,06	0,51	0,57	1,33	2,66	2,24	39,76	26,30	42,851
5A3770	04°33'36.3"	076°04'52.0"	932	1,50	0,06	0,42	0,48	0,92	2,23	0,86	28,23	14,52	51,319

3A0550	04°33'06.2"	076°04'10.8"	928	1,25	0,11	0,26	0,37	0,59	1,44	0,97	21,06	19,36	5,301
3A0120	04°33'05.8"	076°04'19.9"	928	1,50	0,10	0,40	0,50	0,99	1,59	1,58	26,38	25,72	2,483
3A0490	04°32'49.1"	076°03'43.5"	927	1,42	0,09	0,44	0,54	1,15	2,11	1,03	31,25	23,50	27,522
5A360	04°32'25.9"	076°04'56.9"	932	1,45	0,08	0,49	0,57	1,33	0,86	2,03	33,73		122,690
4A0720	04°32'36.1"	076°03'44.8"	921	1,33	0,07	0,37	0,44	0,77	1,23	2,53	27,41	22,33	16,932
4A0710	04°32'42.5"	076°03'27.1"	924	1,45	0,05	0,29	0,33	0,50	2,50	1,75	22,41	19,72	9,754
4A0940	04°32'31.1"	076°02'37.7"	939	1,37	0,10	0,31	0,40	0,67	1,32	1,70	22,55	22,19	1,229
3A0040	04°32'16.4"	076°04'39.9"	939	1,24	0,12	0,42	0,55	1,20	1,25	1,10	34,13	24,30	30,576
4A0580	04°32'05.8"	076°03'41.2"	932	1,41	0,08	0,30	0,37	0,59	1,01	1,67	21,06	21,09	-0,106
2D9110	04°31'42.2"	076°03'05.6"	936	1,40	0,09	0,45	0,54	1,18	1,36	1,07	32,12	20,20	41,692
1D366A	04°31'47.1"	076°04'38.1"	941	1,45	0,07	0,39	0,47	0,87	1,31	0,70	27,05	19,36	27,930
1D3690	04°31'20.1"	076°03'56.5"	930	1,40	0,07	0,47	0,55	1,21	0,94	0,74	33,87	28,68	18,194
2D8990	04°31'53.3"	076°03'48.9"	928	1,28	0,06	0,52	0,58	1,37	0,93	1,06	40,63	19,19	68,801
1D378C	04°31'21.7"	076°04'39.6"	942	1,58	0,12	0,31	0,43	0,76	0,63	0,55	19,65	12,18	29,434
1D3560	04°31'34.5"	076°04'20.2"	936	1,51	0,05	0,42	0,47	0,90	1,48	1,07	27,90	22,98	18,598
2D8720	04°31'18.3"	076°03'52.3"	923	1,29	0,06	0,50	0,56	1,27	2,14	1,89	38,69	22,61	51,978
1D3610	04°31'10.3"	076°05'03.6"	931	1,57	0,06	0,36	0,43	0,74	0,68	1,57	23,00	5,84	67,294
1D3850	04°31'16.6"	076°04'10.0"	929	1,49	0,11	0,45	0,56	1,27	1,39	1,80	30,13	29,11	3,797
1C3390	04°30'45.7"	076°05'26.5"	926	1,38	0,05	0,48	0,53	1,11	1,79	1,33	34,57	28,81	19,881
1D3630	04°30'52.4"	076°05'20.1"	936	1,18	0,08	0,26	0,34	0,51	1,05	0,85	25,33	21,63	10,952
1D4230	04°30'45.3"	076°04'18.4"	929	1,32	0,07	0,50	0,57	1,32	1,33	1,51	37,72	28,79	29,550
1C3350	04°30'36.0"	076°05'25.8"	925	1,39	0,06	0,42	0,48	0,93	1,65	1,09	30,29	25,92	15,238
1C3420	04°30'33.3"	076°04'52.0"	918	1,60	0,09	0,45	0,53	1,14	1,52	1,39	27,86	17,74	40,519
1C3410	04°30'30.0"	076°05'28.4"	932	1,16	0,10	0,57	0,68	2,08	1,14	1,05	49,43	10,20	113,281
1D4210	04°30'14.0"	076°04'22.7"	930	1,45	0,09	0,40	0,49	0,97	2,17	2,27	27,95	23,40	16,476
1C2810	04°30'02.3"	076°05'07.1"	927	1,48	0,04	0,30	0,34	0,51	2,39	1,86	19,99	18,51	5,491
1C2320	04°29'58.9"	076°05'43.1"	917	1,77	0,14	0,37	0,52	1,06	0,93	1,09	21,18	16,45	20,924
1C2880	04°29'40.7"	076°05'14.3"	926	1,27	0,04	0,49	0,53	1,14	2,90	1,31	38,98	22,72	51,567
1C2910	04°29'43.2"	076°05'23.0"	931	1,47	0,08	0,46	0,54	1,18	1,55	1,58	31,37	22,11	34,116
2D7200	04°29'10.7"	076°04'27.3"	921	1,35	0,10	0,44	0,54	1,20	1,41	0,83	32,59	19,47	44,396
1C2120	04°29'05.1"	076°06'17.7"	935	1,59	0,07	0,37	0,43	0,77	2,28	1,10	27,30	22,97	17,204
2C6300	04°28'54.5"	076°05'25.9"	930	1,36	0,07	0,46	0,53	1,11	0,71	0,85	33,36	24,64	29,736
1C2270	4°28'41.4"	76°06'26.4"	929	1,43	0,10	0,46	0,56	1,28	2,41	1,99	31,92	29,51	8,606

2C5650	04°28'43.6"	076°05'48.8"	935	1,47	0,08	0,48	0,56	1,27	1,45	0,84	32,60	19,08	49,793
2C4980	04°28'27.5"	076°05'20.6"	935	1,60	0,04	0,39	0,43	0,76	0,67	0,60	24,35	15,07	37,110
1B1760	04°28'36.5"	076°06'04.4"	937	1,30	0,10	0,44	0,53	1,15	0,91	1,12	33,62	16,97	54,247
2C5620	4°28'31.8"	76°05'52.8"	938	1,33	0,06	0,50	0,56	1,29	0,31	0,94	37,92	22,73	50,504
1B1670	4°28'34.8"	76°06'19"	941	1,39	0,08	0,42	0,50	1,01	1,70	0,89	30,20	24,90	18,420
1B190B	04°28'17.1"	76°06'16.7"	929	1,19	0,14	0,43	0,57	1,30	1,90	0,82	35,76	17,10	55,655
1C3020	4°28'26.5"	76°06'54.2"	931	1,59	0,09	0,39	0,48	0,92	1,69	1,10	24,77	15,26	37,684
2C5590	04°28'12.8"	76°05'58.1"	938	1,36	0,08	0,49	0,57	1,31	0,91	0,95	35,82	34,13	5,759
2C5040	04°28'12.3"	076°05'16.1"	928	1,61	0,02	0,41	0,43	0,76	0,66	0,83	25,39	12,96	49,993
1B1810	03°15.496'	76°32.618'	913	1,15	0,22	0,38	0,60	1,51	1,25	0,73	33,12	19,85	38,100
1B1610	04°28.12'	76°05.971'	928	1,46	0,11	0,41	0,53	1,11	1,78	1,42	28,19	24,55	13,289
2C5280	04°27'55.5"	076°05'47.8"	934	1,58	0,11	0,40	0,50	1,02	1,17	1,15	25,10	25,90	-3,157
1B189A	04°27'23.4"	076°07'25.1"	929	1,52	0,08	0,32	0,39	0,65	1,19	1,66	20,93	15,20	21,828
1B1790	04°27'29.2"	076°06'49.5"	938	1,40	0,12	0,44	0,56	1,28	1,22	0,80	31,20	25,15	21,218
1B1280	04°27.524'	76°06.325'	951	1,38	0,11	0,46	0,57	1,33	2,03	1,75	33,38	24,49	30,740
2B4500	04°27'11.0"	076°05'21.9"	935	1,25	0,08	0,53	0,62	1,60	1,08	0,84	42,48	28,53	43,732
1B110A	04°27'20.6"	076°07'25.2"	930	1,43	0,11	0,34	0,45	0,82	0,61	0,72	23,81	8,84	53,575
1B1770	04°27'26.5"	076°06'55.2"	928	1,36	0,09	0,45	0,54	1,16	1,13	1,25	32,91	29,68	10,967
1B128A	04°27'24.3"	076°06'45.1"	928	1,46	0,04	0,45	0,50	0,99	0,73	1,13	30,96	24,71	22,852
2B2070	04°26'41.8"	076°04'56.9"	931	1,20	0,19	0,32	0,52	1,07	0,62	1,25	26,80	16,04	32,414
5A1050	04°27.037'	76°07.798'	953	1,49	0,09	0,42	0,51	1,05	0,60	0,82	28,44	17,53	40,675
1B1080	4°26'47.9"	76°07'22.1"	929	1,44	0,08	0,45	0,53	1,15	1,31	1,06	31,20	16,24	53,975
1B1070	04°26'46.8"	076°07'22.4"	943	1,32	0,09	0,47	0,56	1,25	2,06	0,93	35,39	22,84	41,481
1B1250	4°26'55.5"	76°06'45.3"	942	1,30	0,11	0,28	0,39	0,64	1,63	1,46	21,57	19,38	7,124
2A2450	4°26'50.6"	76°05'46.2"	935	1,17	0,18	0,37	0,56	1,25	0,86	1,13	31,95	17,20	43,156
2A1350	04°26'07.9"	076°05'14.2"	937	1,64	0,09	0,37	0,46	0,85	1,95	0,69	22,32	14,08	33,764
5A2410	04°26.021'	76°08.596'	948	1,74	0,06	0,37	0,43	0,76	0,95	0,65	21,07	7,44	59,383
2A2050	04°24'20.1"	076°06'42.0"	933	1,49	0,06	0,37	0,43	0,76	1,11	0,68	24,76	11,42	49,695
2A2390	04°26'09.4"	076°06'31.4"	931	1,25	0,13	0,44	0,57	1,32	1,61	1,18	35,19	25,97	28,923
1A0770	04°25'47.6"	076°07'14.0"	934	1,41	0,08	0,51	0,59	1,45	1,10	1,41	36,02	11,90	85,046
2A1000	04°25'45.9"	076°06'38.9"	940	1,39	0,08	0,43	0,52	1,08	1,93	1,46	31,23	23,88	25,526
5A2040	04°25.646'	76°08.838'	954	1,63	0,06	0,40	0,46	0,86	0,61	1,15	24,49	15,82	35,325
1A0650	04°25'26.9"	076°06'50.4"	925	1,11	0,09	0,58	0,67	2,01	1,61	2,74	52,49	34,16	50,829

2A0980	04°25'47.5"	076°05'43.9"	934	1,55	0,06	0,40	0,46	0,84	1,84	1,38	25,91	20,09	22,514
5A1910	04°25'34.8"	76°08'12.4"	929	1,46	0,10	0,42	0,52	1,10	1,96	0,93	28,67	18,31	37,759
2A0770	04°25'20.2"	076°06'50.3"	930	1,33	0,10	0,52	0,62	1,60	3,33	2,88	39,03	30,14	29,637
1A0010	04°24'45"	76°07'46.7"	936	1,60	0,08	0,37	0,45	0,81	2,39	1,40	23,15	17,05	24,346
2A0780	04°25'02.4"	076°06'46.1"	932	1,41	0,09	0,46	0,55	1,22	1,56	1,11	32,77	22,78	35,111
2A0700	04°24'52.6"	076°06'27.0"	932	1,35	0,06	0,45	0,51	1,03	1,35	0,91	33,07	23,09	33,647
1A0950	04°24'37.5"	76°07'44.2"	936	1,06	0,08	0,56	0,64	1,80	3,20	2,85	52,60	27,93	65,539
2A0350	04°24'23.2"	076°07'06.7"	928	1,56	0,06	0,42	0,48	0,93	0,98	0,57	27,07	16,99	39,322

ANEXOS II

Histogramas por propiedad evaluada en el Distrito RUT

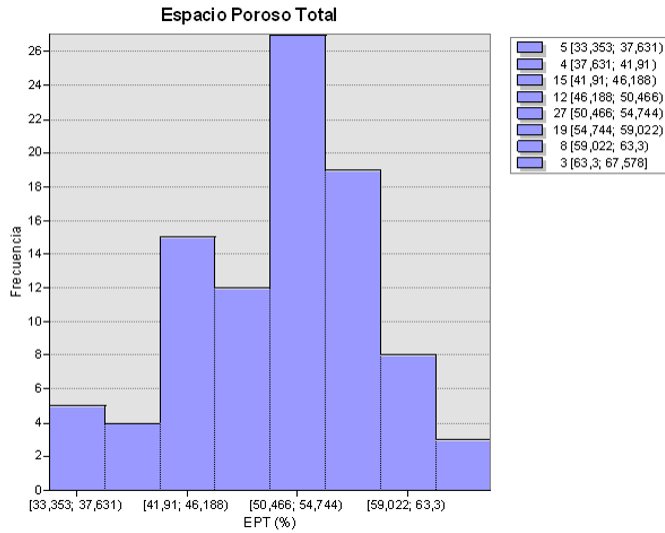


Figura 25. Histograma EPT

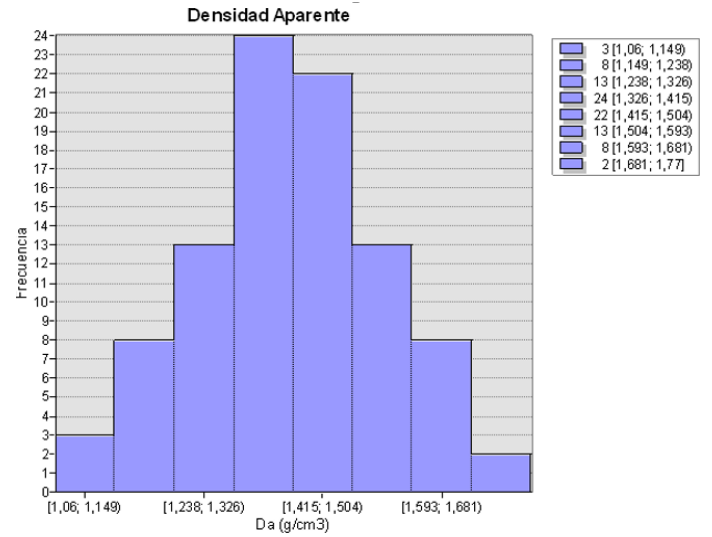


Figura 24. Histograma Densidad Aparente

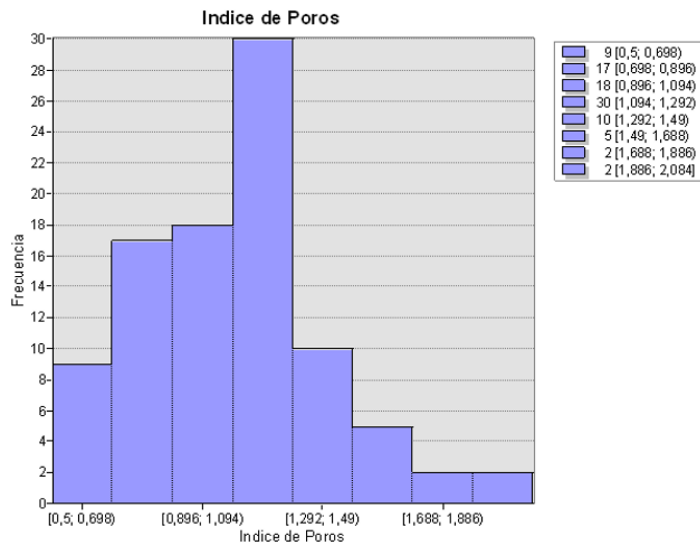


Figura 27. Histograma Indice de Poros

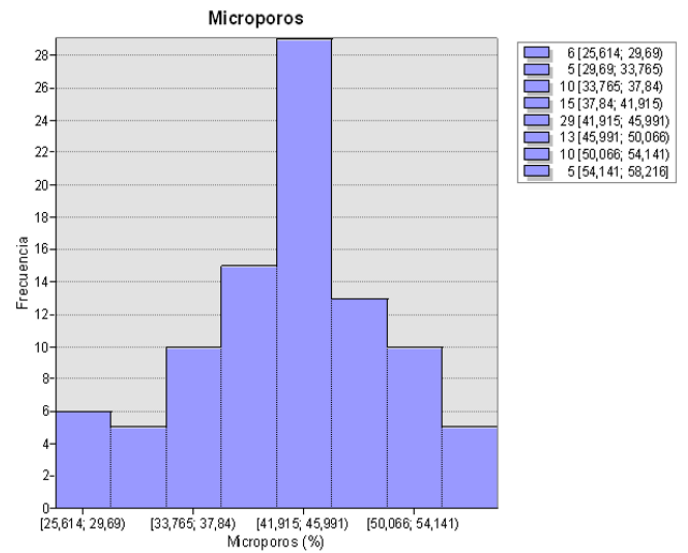


Figura 26. Histograma Micro Poros

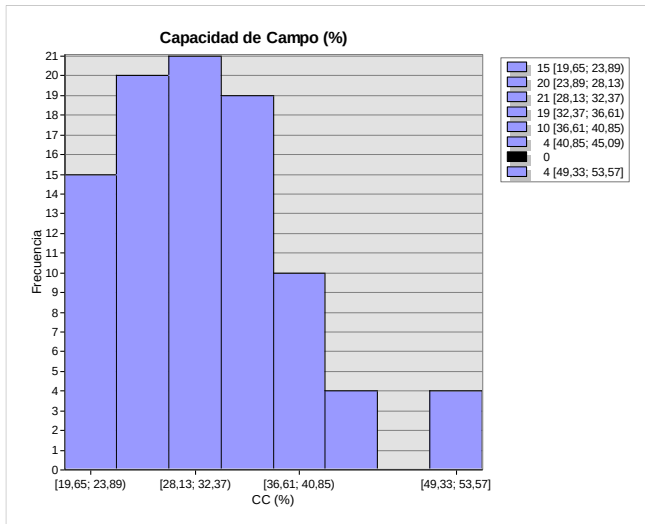


Figura 29. Histograma Capacidad de Campo

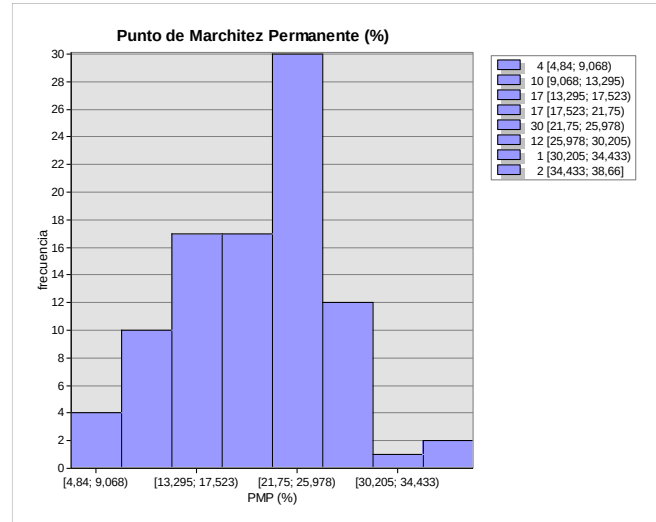


Figura 28. Histograma Punto de Marchitez Permanente

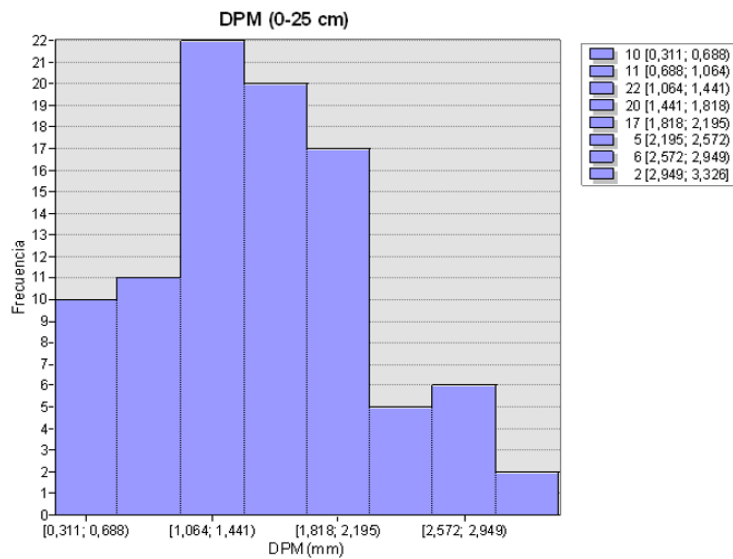


Figura 31. Histograma Diametro Ponderado Medio 0-25 cm

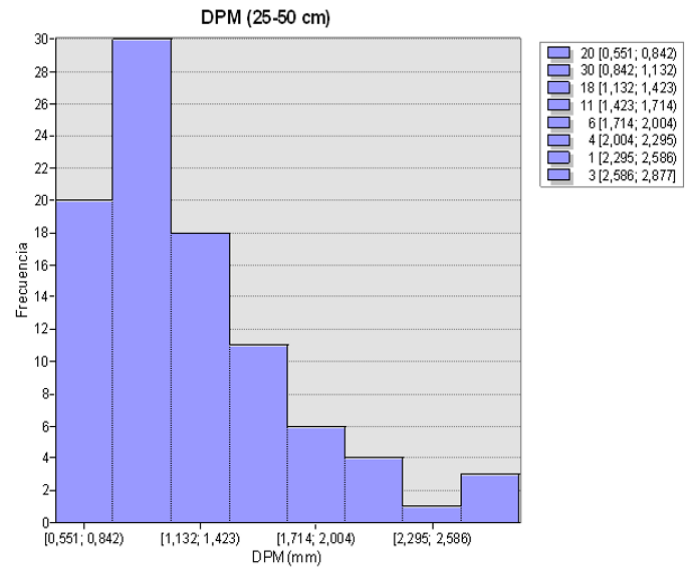


Figura 30. Histograma Diametro Ponderado Medio 25-50 cm

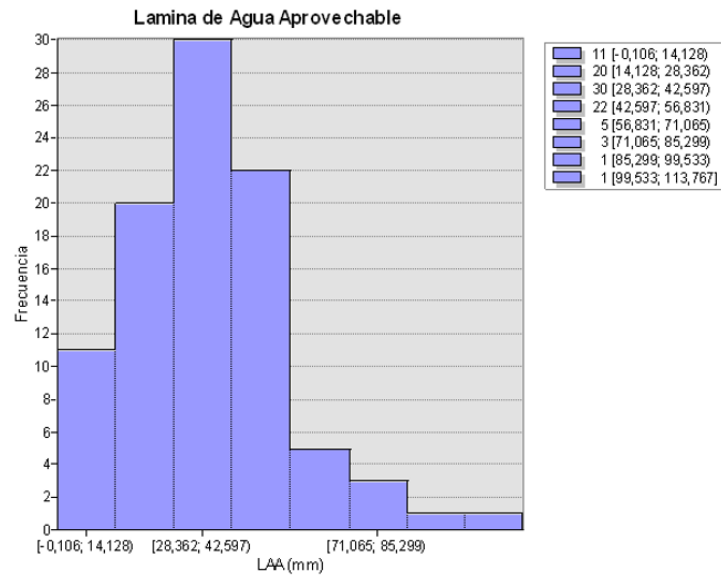


Figura 32. Histograma Lamina de Agua Aprovechable