



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Determinación de las Propiedades Hidrológicas del  
Suelo en la Reserva Natural Flor del Bosque, Puebla.**

**T E S I S**

Para obtener el título de:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

Presenta:

**LUCERO ESCAMILLA VITERVO**

Directora de tesis:

**DRA. JANETTE ARRIOLA MORALES**

Codirector de tesis:

**DR. DANIEL CRUZ GONZÁLEZ**

Puebla, Puebla Febrero, 2024.

## **Agradecimientos**

A la Dra. Janette Arriola Morales por la orientación, atención a mis consultas, su paciencia y guía en esta tesis, sin sus consejos no lo hubiese logrado.

A la memoria de mis padres Abelino Escamilla y Delfina Vitervo, por ser mi mayor ejemplo a seguir adelante a pesar de las circunstancias, siempre creyeron en mí, sus consejos, todo el amor que me brindaron, por darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, sin ustedes no lo hubiera logrado, ocupan un lugar muy especial en mi corazón.

Gracias mami por darme todo lo que necesitaba, por ser mi amiga y compañera, gracias por haber confiado en mí siempre.

Gracias papi porque estuviste junto a mí las noches que me desvelaba haciendo trabajos, este es un logro que hubiese querido compartir contigo, hace poco tiempo te fuiste y te llevo siempre presente.

A mis hermanos Iris, Claudia, Erwin, Nereida, Yuyu, Eli, Rosa, Laura y Darely por su paciencia, su apoyo incondicional, por ser mi guía en todo momento. A mi hermana Claudia te agradezco por enseñarme a creer en mí y motivarme a hacer las cosas de la mejor manera, la inspiración que me generas, gracias por los regaños que merecía y que no entendía y por siempre estar cuando te necesito.

Gracias a la vida y a mí por este triunfo.

## INDICE

INTRODUCCIÓN.....	5
JUSTIFICACIÓN .....	7
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1. ANTECEDENTES.....	8
1.1 El Suelo .....	8
1.2 Formación y características.....	8
1.3 Factores Formadores del Suelo.....	10
1.4 Funciones o servicios que ofrece el suelo.....	11
1.4.1 Función reguladora, agua del suelo.....	12
1.4.2 Movimiento del agua en el suelo.....	14
1.4.3 Estado energético del agua (Potencial de agua) .....	18
1.4.4 Potencial mátrico .....	20
1.4.5 Potencial osmótico.....	21
1.4.6 Conductividad hidráulica .....	21
1.5 Hidrología del suelo.....	23
1.6 Clasificación Hidrológica de los Suelos según USDA.....	24
1.7 Conceptos Básicos Hidrológicos.....	25
1.8 Tipos de Agua presentes en los Suelos .....	27
1.8.1 Disponibilidad del agua en el suelo .....	27
1.8.2 Solución de suelo .....	29
1.9 Propiedades Relacionadas con Hidroedafología.....	29
1.9.1 Materiales clásticos que componen el esqueleto del suelo.....	29
1.9.2 Textura .....	31
1.9.3 Contenido de grava.....	32
1.9.4 Permeabilidad del suelo .....	33
1.9.5 Estructura.....	33
1.9.6 Agregados .....	33
1.9.7 Poros, huecos y densidad aparente.....	34

1.9.8	Factores que afectan la densidad aparente y la porosidad.....	36
1.9.9	Materia orgánica.....	37
1.9.10	Salinidad.....	38
1.9.11	Temperatura del suelo.....	39
1.9.12	Gases en el suelo.....	40
1.10	Software de Simulación.....	42
1.10.1	Soil water characteristics.....	42
1.10.2	Voxler V4.....	51
2.	METODOLOGÍA.....	52
2.1	Área de Estudio, Parque Ecológico Recreativo “General Lázaro Cárdenas” Flor del Bosque.....	52
2.1.1	Antecedentes del área.....	52
2.1.2	Localización.....	52
2.1.3	Tipos de suelo.....	54
2.1.4	Tipo de vegetación.....	54
2.1.5	Fauna.....	55
2.1.6	Clima.....	56
2.1.7	Hidrología.....	56
2.1.8	Hidrología subterránea.....	57
2.2	Localización del sitio.....	58
2.3	Muestreo y Análisis Físico.....	62
2.4	Simulación.....	64
3.	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	67
4.	CONCLUSIONES.....	79
5.	REFERENCIAS.....	82
6.	ANEXO 1.....	89

# INTRODUCCIÓN

Las áreas naturales protegidas son instrumentos efectivos para conservar ecosistemas, permitir la adaptación de la biodiversidad y enfrentar los efectos del cambio climático, de acuerdo al artículo 44 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, las Áreas Naturales Protegidas son zonas que no han sido considerablemente alteradas por actividades antropogénicas donde permite la conservación de la biodiversidad. Actualmente la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas administra 203 Áreas Naturales Protegidas (Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas, 2023).

Puebla tiene 2 Parques Estatales y 3 Reservas Estatales entre las cuales encontramos a Flor del Bosque como una de las reservas. Flor del Bosque proporciona regulación del clima a nivel regional, garantiza una fuente de recursos hídricos, protege y asegura el hábitat para las especies en peligro de extinción o amenazadas, además de generar un área natural para la conservación, recreación e investigación en beneficio de las personas, funge como corredor de conservación y fuente de oxígeno, área de recarga de mantos freáticos y captura de carbono. (Gobierno del Estado de Puebla, 2022).

Actualmente la zona se encuentra amenazada por el crecimiento poblacional, desarrollo de asentamientos irregulares y construcción informal de la zona norte y sur de la ciudad de Puebla. El desgaste de la zona implica contaminación como las descargas de aguas residuales sin tratamiento, en esta región fluyen cauces que alimentan al Río Alseseca, el cual el canal pasa por parques industriales y empresas dedicadas al proceso textil, químicos, etc., que pueden afectar gravemente los ecosistemas y erosión del suelo, debido al conjunto de estos componentes como la tala, pastoreo sin control, la retención

del agua se ve dañada, acelera la evaporación al no poder retener humedad lo que lleva a una menor capacidad de absorción, por ello es necesario estudiarla, conservarla, restaurarla para prevenir su destrucción irreversible.

En los últimos años se han establecido actividades que permiten la investigación científica y control del ambiente, gracias a ello se ha podido caracterizar la zona, monitoreando el grado de deterioro, en esta investigación se presentan los resultados del estudio de las propiedades hidroedafológicas en la Reserva Estatal Flor del Bosque mediante el simulador Soil Water Characteristic, para contribuir a la identificación de factores que pueden alterar el movimiento del agua, este estudio beneficiaran a la zona a tener un estudio integral acerca de las características del suelo.

# **JUSTIFICACIÓN**

Esta tesis ayudará a una evaluación hidroedafológica del suelo del Parque Estatal Flor del Bosque ya que es importante la continua investigación acerca de lo que está en nuestro entorno, cada día la mancha demográfica se va extendiendo por lo que las áreas naturales se ven afectadas por este fenómeno y es importante evaluar las modificaciones que tiene en el tiempo para tener información actualizada y enriquecer el conocimiento de los presentes.

## **OBJETIVO GENERAL**

Simular, analizar e interpretar el movimiento del agua en el suelo de la Reserva Natural Flor del Bosque mediante el simulador Soil Water Characteristic.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Identificar y recopilar la información (propiedades) a través de las tesis, "Evaluación de la fertilidad de una Ladera Sur de la Reserva Parque Estatal Flor del Bosque Puebla" y "Caracterización Físicoquímica de una Ladera Norte Bien Conservada en el Parque Estatal Flor del Bosque, Puebla" que contribuyen al movimiento del agua del suelo.
2. Calcular mediante una simulación por computadora a través del programa Soil Water Characteristic, los datos hidroedafológicos.
3. Analizar e interpretar los resultados de la simulación.
4. Describir el movimiento del agua en el suelo de la Reserva Natural Flor del Bosque.

## **ANTECEDENTES**

### **1. ANTECEDENTES**

#### **1.1 El Suelo**

El suelo está compuesto por diferentes elementos ya sean minerales, materia orgánica, microorganismos, agua y gases, estos fueron formados gracias a procesos biogeoquímicos y físicos.

Consiste en horizontes formados por los ya mencionados, producto final del tiempo combinado con el clima y topografía dando como resultado sus características: la textura, estructura, color, propiedades químicas biológicas y físicas (FAO, 2023).

#### **1.2 Formación y características**

Su formación nace con la desintegración de la roca madre a través del rompimiento ocasionado por las lluvias, vientos y exposición al sol a su vez de la actividad mecánico-biológica de las raíces de las plantas. Las cianobacterias y líquenes son los primeros colonizadores del sustrato rocoso, estos liberan ácido carbónico el cual disuelve la roca madre poco a poco, se calcula que para tener un centímetro deben transcurrir entre 100 y 400 años, lo cual hace que el suelo sea considerado como un recurso no renovable (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2019).

La característica de cada suelo depende de diferentes circunstancias, una de las más importantes son el tipo de roca que los origino, la antigüedad, relieve, clima, vegetación y animales que viven en las también modificaciones causadas por humanos. La dimensión de las partículas minerales establece sus propiedades físicas: textura, estructura, capacidad de drenaje de agua, aireación, etc. Los suelos arenosos son sueltos de granulo grande el agua se infiltra rápidamente, tienen poco almacenamiento

## ANTECEDENTES

de nutrientes aprovechables para las plantas. Los suelos limosos, son de gránulo de tamaño intermedio, son pesados y pocos nutrientes. Los suelos arcillosos, son formados por partículas muy pequeñas. Pesados, no drenan ni se secan fácilmente, contienen buena reserva de nutrientes y al secarse estos se endurecen y forman terrones. Son fértiles por la buena reserva que contienen, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

Los suelos francos es una combinación de arena, limo y arcilla y son fértiles. Un suelo con una formación equilibrada de cada mineral será un suelo agrícola fácil de trabajar y con buenas provisiones de nutrientes. Mantiene la humedad a pesar de drenar libremente.

Cuando los poros del suelo son pequeños, incrementa la retención de agua y el encharcamiento. La materia orgánica permite que el agua se impregne e infiltre lentamente, logrando que las raíces la aprovechen mejor también permite limitar la pérdida de nutrientes y facilita que sean captados por las plantas.

Las propiedades químicas del suelo dependerán de distintos minerales y sustancias. El contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio deberán ser abundantes y equilibrados. Respecto a la materia orgánica, contiene carbono, oxígeno e hidrógeno, etc. (FAO, 2013).

Los suelos se nombran y clasifican conforme a las propiedades físicas y químicas de sus horizontes. Entonces su taxonomía emplea propiedades como son el color, textura, estructura, entre otras a dos metros de profundidad de la superficie.

## ANTECEDENTES

### 1.3 Factores Formadores del Suelo

- Material parental: algunos se forman a partir de la erosión de rocas y tienen la misma química que las originales. Comúnmente se forman a partir de materiales que llegan desde otros lugares.
- Sedimentos: a través de los ríos varían las diferentes texturas, esto dependerá si la corriente va lenta o rápida. Las aguas rápidas dejarán grava, rocas y arena en cambio el agua lenta permite texturas finas (arcilla y limo).
- Clima: la temperatura y humedad son factores de erosión y lixiviación. El viento influirá en la distribución de la arena. La porción, intensidad y tipo de precipitación en la formación del suelo, las alteraciones de las estaciones junto con la temperatura afectan la humedad, actividad biológica, velocidad de reacciones químicas y tipos de vegetación.
- Topografía: la pendiente altera la humedad y temperatura, las pendientes más prominentes orientadas al sol serán más cálidas, los suelos elevados pueden erosionarse fácilmente, los suelos bajos son más profundos y de colores oscuros.
- Factores biológicos: plantas, animales, microorganismos y seres humanos contribuyen en la formación del suelo ya sea desde la formación de madrigueras y poros, las raíces abren camino a través de las capas y los microorganismos ayudan en el intercambio químico entre raíces y el suelo. La vegetación de cada suelo dependerá del clima, topografía y factores biológicos asimismo de la densidad, humedad, temperatura, etc. La materia orgánica surge de la descomposición de hojas de las plantas.

## **ANTECEDENTES**

- Tiempo: los suelos presentan características que reflejan el proceso de formación, una inundación, un material reciente no presentaran características de su desarrollo pues la superficie anterior y los horizontes quedan enterrados entonces las superficies de tierras antiguas tendrán las características de su desarrollo (USDA, 2022).

### **1.4 Funciones o servicios que ofrece el suelo**

La carta de Suelos dice que “Los suelos son un recurso clave que abre posibilidades, fundamental para generar multitud de bienes y servicios esenciales para los ecosistemas y el bienestar humano” (FAO, 2015 citado en Lorenz, 2015).

En el año 1936, se firma el primer Acta de Conservación del Suelo en Estados Unidos (United States Congress 1936), y se acepta que los suelos son un recurso limitado y deberían ser manejados responsablemente. El presidente de aquel entonces Roosevelt, expresó “La historia de cada Nación se escribe eventualmente en la forma en que se cuida su suelo”.

Las principales funciones de suelos:

1. Función biológica: sitio de vegetación y hábitat de organismos.
2. Función reguladora: balance de agua del paisaje.
3. Función filtro, buffer y transformador.
4. Función de memoria de la historia natural y cultural.
5. Funciones como materiales para el uso agrícola, forestal, para la construcción, etc.

## **ANTECEDENTES**

Funciones biológicas, soporte de vegetación: las plantas son seres vivos que necesitan elementos básicos como son: agua, suelo, nutrientes y luz.

El suelo es sostén para la vegetación en los ecosistemas terrestres, por lo tanto, de todos los cultivos que son la base de nuestros alimentos (Siebe, 2021).

Para que las plantas terrestres prosperen, la raíz debe absorber agua del suelo.

La precipitación es la fuente última, pero su naturaleza intermitente, con intervalos secos de duraciones variables, hace que la precipitación pasada se almacene en los sustratos esenciales para las plantas. Agua profunda del suelo recargada por profundidad la infiltración en períodos más húmedos pasados y el agua subterránea del valle alimentada por la convergencia de las tierras altas, pueden proporcionar suministros vitales cuando la lluvia falla.

### ***1.4.1 Función reguladora, agua del suelo***

El agua que disponemos aproximadamente en el mundo es de 1386 millones de  $Km^3$  y solo 2.5% es agua dulce y de esta proporción la mayor parte se encuentra congelada en los glaciares y regiones montañosas (68.7%), otra parte se encuentra en acuíferos (29.9%) y el 0.26% en lagos y ríos (Shiklomanov, 1998 citado en Díaz, Bravo, Alatorre, & Sánchez, 2013).

La vegetación regula los ciclos del agua, energía y carbono de la Tierra. Hacer frente a las sequías es uno de los grandes retos para la vegetación por eso hay evidencia de que cambia la absorción de agua para el suelo más profundo también las aguas subterráneas.

## ANTECEDENTES

Para las plantas hay cuatro tipos de fuentes de agua:

1. Precipitación en el mes actual
2. Precipitación almacenada en los suelos o rocas
3. Precipitación almacenada en aguas subterráneas
4. Agua subterránea caída a través del río- agua subterránea hacia tierras bajas.

Pero nos enfocaremos en los suelos como:

Una porción de los ciclos naturales, particularmente del agua y nutrientes. como medio de filtro, buffer y transformador (Blume H, 1990 citado en Lorenz, 2015).

Es encargado de filtrar el agua de lluvia y conservarla para que esté disponible para las plantas, también retiene el líquido en el espacio donde se desarrollan las raíces, así lo almacena para las plantas y microorganismos que habitan en ese sitio cuando no está lloviendo.

El agua se mueve en el suelo con frecuencia desde la parte superficial hacia la profundidad una vez que este saturada. Cuando los canales estén saturados, el flujo de agua viaja a través de las rutas ya humedecidas ya que el agua fluye hacia las regiones donde se han llenado los poros más grandes (Lorenz, 2015).

Demasiada agua también provoca un escurrimiento excesivo o una percolación profunda. Como resultado, se pierde agua valiosa junto con nutrientes y productos químicos, que pueden filtrarse en el agua subterránea.

## ANTECEDENTES

### ***1.4.2 Movimiento del agua en el suelo***

El agua disponible en el suelo depende de cuanta lluvia permanece en él, después de la escorrentía, evaporación y drenaje. Dependerá de la lluvia infiltrada para reabastecer la capacidad de retención de agua, recarga de aguas subterráneas y satisfacer las necesidades de transpiración de cultivos, así como de disolver minerales, transportar iones, coloides y metales orgánicos complejos.

Como primer paso tenemos la infiltración medida en unidades de longitud por unidad de tiempo, proceso donde el agua del suelo se mueve arriba de la superficie y depende de varios factores uno de ellos es la permeabilidad del suelo, la textura, tamaños de los poros, presencia de arcillas expansivas, contenido de materia orgánica hidrófoba que repele el agua y provoca que el agua se estanque en la superficie, luego la percolación se mueve a través del suelo, vertical y lateralmente. La infiltración se ve afectada por el tipo de suelo y la profundidad del nivel freático. También la temperatura del suelo provoca una disminución debido a una mayor viscosidad del agua a bajas temperaturas, la infiltración en suelos congelados es insignificante.

La tasa de infiltración y percolación disminuyen después de la humectación inicial debido a:

- Minerales arcillosos que se hinchan cuando se mojan y coloides entran en suspensión, obstruyendo los poros al paso que se infiltran.
- Costras superficiales de baja permeabilidad.
- Retención de aire en el suelo (Jury et al, 1991 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

## ANTECEDENTES

Cuando el agua entra al suelo se produce la percolación o distribución del agua ya sea en condiciones saturadas o no saturadas. Bajo condiciones saturadas  $J_{Sat}$  Flujo vertical en estado estacionario,  $Z$  profundidad en el perfil del suelo y puede ser descrito por la ley de Darcy:

$$J_{Sat} = \frac{K_{sat} H}{Z}$$

Donde:

$K_{Sat}$  Conductividad hidráulica del suelo y  $H$  diferencia de carga hidráulica.

La carga hidráulica será la distancia entre la superficie superior del nivel freático y profundidad  $z$  en el suelo (Amoozegar y Warrick, 1986 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

El agua fluye de mayor potencial hídrico total ( $y_{tw}$ ) hacia áreas de menor  $y_w$  en suelos saturados, la carga hidráulica es la fuerza impulsora del flujo descendente.

La conductividad hidráulica bajo condiciones de flujo saturado dependerá de la porosidad y distribución del tamaño del poro, si es mayor será más rápido, en suelos arenosos contrario que un suelo de textura fina. Pocas veces las condiciones se ajustan a la Ley de Darcy por la heterogeneidad y las condiciones de estado estacionario y casi nunca suceden en el campo donde se está realizando la percolación y evaporación, esta ecuación para el flujo saturado proporciona información de las variables que controlan el flujo de agua en los suelos.

El flujo saturado depende de la conductividad hidráulica y fuerza impulsora, cuando el suelo no está saturado los poros de agua son accesibles para el flujo de agua

## ANTECEDENTES

y la conductividad hidráulica disminuye, a medida que disminuye el contenido de agua y potencial matricial. Los poros más grandes drenan y se llenan de aire primero, entonces la conductividad disminuye primero a medida que el contenido de agua disminuye.

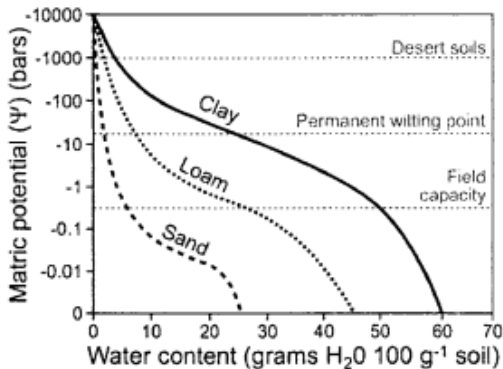
En condiciones no saturadas, donde  $\psi_m$  domina el potencial hídrico, el agua fluye desde regiones de mayor contenido de agua ( $-\psi_m$ ) a regiones de potencial matricial más bajo, de áreas húmedas a secas.

El drenaje gravitatorio puede ocurrir en condiciones no saturadas cuando el potencial matricial es mayor que  $-0.3$  bar (capacidad de campo), el flujo no saturado puede evaporarse a medida que el agua se redistribuye. Donde hay cambios bruscos de textura la tasa de percolación puede variar notablemente, cuando suelos altamente porosos y de grano fino se superponen a capas de textura gruesas, el flujo de agua a través de la capa de grano fino es insuficiente para desplazar el aire de los poros más grandes.

Para eliminar agua del suelo se requiere aportes de energía, gravedad, secado en horno o succión a medida que el suelo se seca y drena. Primero se elimina el agua de los poros dilatados (mayor potencial matricial), se estima que la primera capa de agua adsorbida tiene un potencial hídrico de  $-8000$  bares, mientras que las capas exteriores de películas de agua adsorbidas tienen potencial mátrico oscilando entre  $-0.3$  y  $-0.1$ , dependiendo de la textura del suelo. El drenaje de un suelo saturado bajo la influencia de la gravedad elimina el agua de los poros dilatados como se observa en la figura 2, en el que la fuerza descendente de la gravedad es más fuerte que las fuerzas adhesivas entre las partículas del suelo y moléculas de agua vecinas.

## ANTECEDENTES

El potencial hídrico medido después de las paradas de drenaje suele ser de alrededor de  $-0.3$  bares de succión. El contenido de agua de un suelo después de que cesa el drenaje gravitacional, llamado capacidad de campo, a menudo se equipara con el contenido de agua cuando  $\psi_w = -0.3$  bar (Schaetzl & Anderson, 2005).



**Figura 1.** Curva Característica del agua. Figura reproducida de (Schaetzl & Anderson, 2005)

**Nota.** Como se puede ver en la figura, el contenido del agua a capacidad de campo es mayor en suelos arcillosos, debido a su mayor superficie, fuerzas mátricas más fuertes y menos en arenas. Otro punto de referencia importante sobre el potencial hídrico es el punto de marchitez, que es el potencial hídrico por debajo que las plantas no pueden extraer agua del suelo.

La succión de la vegetación para extraer agua del suelo será de 15 veces la presión atmosférica, a 15 bar el agua que sigue en el suelo será almacenada en poros menores a 0.0002 mm y es llamada punto de marchitez permanente del suelo. El agua inmovilizada entre la capacidad de campo y punto permanente de marchitez se llama capacidad disponible de agua.

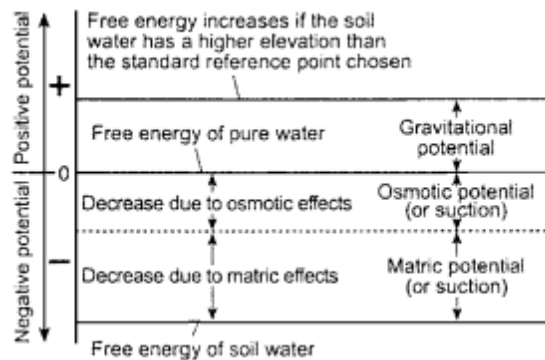
La cantidad límite de agua que puede retener el suelo va a variar según la textura, contenido de materia orgánica, profundidad de raíces y estructura. La materia orgánica

## ANTECEDENTES

puede retener cerca de 20 veces su peso, suelos francosos tienen capacidad disponible de agua más alta, suelos arcillosos tienen un nivel medio y los suelos con arena gruesa un nivel bajo.

### 1.4.3 Estado energético del agua (Potencial de agua)

La energía que está libre será la capacidad positiva cuando puede hacer un trabajo y negativa cuando requiere fuerza para extraer agua del suelo, este valor aumentará cuando su valor se vuelva más negativo. El estado energético predice el comportamiento del movimiento del agua, los tipos de energía importantes son: la energía potencial (la que posee un cuerpo en su posición), energía gravitacional (la que posee en función del campo gravitacional), energía cinética (movimiento lento en la circulación del agua, es despreciable), entre otras. Estas energías pueden mover o permanecer en reposo, el agua del suelo se mueve de las zonas de más alto potencial a las de valor más bajo. Para el suelo existen dos energías importantes el potencial y gravitacional. Las fuerzas que retienen el agua del suelo se llama potencial matricial, es negativo y responsable de las fuerzas de retención del agua, después está el potencial gravitacional, este es positivo y desplaza el agua hacia capas más profundas.



**Figura 2.** Estado Energético del Agua. Figura reproducida de (Schaetzl & Anderson, 2005).

## ANTECEDENTES

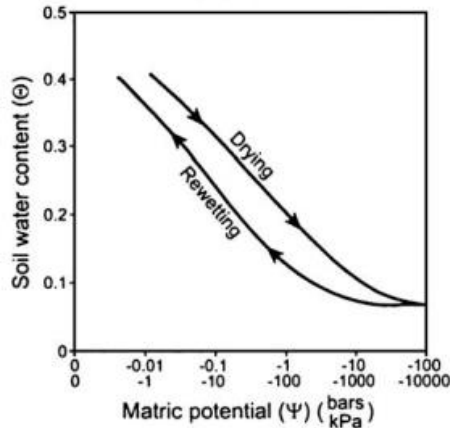
El agua esta retenida en el suelo por 3 fuerzas: adhesión, cohesión y adsorción iónica. La adhesión forma una película de moléculas en la superficie, la cohesión añade más moléculas a la capa existente, los contraiones adsorbidos por la carga eléctrica superficial atraen una presión osmótica en las moléculas de agua cercanas. La suma de estas tres fuerzas genera presión capilar, tensión o succión capilar normalmente es negativo, entonces como depende de la matriz y no del soluto a excepción de suelos salinos, llamada succión mátrica de humedad del suelo. La succión mátrica es una función del contenido hídrico y la representación de esta relación origina las curvas características de humedad del suelo, "curvas de retención hídrica" que expresa la relación entre la cantidad de agua que contiene el suelo y su estado energético.

Los suelos arenosos tienen poros grandes, que se vacían sin requerir trabajo, quedando el agua residual retenida en la superficie de las partículas formando una película adherida, que para ser removida requiere mayor trabajo y este cambio de la succión provoca una desviación en la curva. Los suelos francos y arcillosos tienen curvas de retención más suaves, sin desviaciones progresivas. Estos comportamientos se deben a la distribución del tamaño de los poros y los efectos osmóticos. En las texturas más finas, las variaciones del tamaño de los poros son más importantes que en las texturas gruesas.

Existen otros factores que determinan la relación del potencial matricial, como la textura, la densidad aparente, la temperatura y presión. La estructura y los factores que establecen los fenómenos de histéresis, determinan que, para el mismo suelo, existan dos curvas de retención hídrica, una cuando el suelo se humedece y otro cuando se seca. Para una misma tensión mátrica, un suelo retiene mayor cantidad de agua si se

## ANTECEDENTES

está secando que si se está mojando como se observa en la figura 3. La histéresis se basa en la interconexión entre poros de distinto diámetro unidos mediante poros pequeños (Schaetzl & Anderson, 2005).



**Figura 3.** Efecto de histéresis. Figura reproducida de (Schaetzl & Anderson, 2005).

**Nota.** El contenido de agua en el suelo a un mismo potencial matricial varía dependiendo si el suelo está seco o húmedo, cuando el suelo se seca produce un incremento de la tensión matricial, cuando se humedece se produce un descenso.

### 1.4.4 Potencial mátrico

La energía con la cual se encuentra retenida el agua dentro del suelo es llamada potencial matricial, generalmente no se da en áreas no salinas, el potencial total del agua es la suma del potencial matricial, generado por las partículas sólidas del suelo (matriz), potencial osmótico y el potencial gravitacional. Este potencial refleja el estado hídrico del suelo, cuanto más bajo más negativo (retiene el agua impidiendo el drenaje y mayor es la fuerza con la cual el suelo retiene agua. La succión aumenta al mismo tiempo que se seca el suelo, más negativo es su potencial matricial y más es la presión para extraer agua, en suelos saturados su valor es nulo. Los poros grandes fácilmente se vacían, los

## **ANTECEDENTES**

suelos con textura gruesa son vaciados con poca fuerza, el suelo con textura fina debido a su tamaño pequeño requiere de mayor succión, mayor fuerza y energía (Espinoza, 2018).

### ***1.4.5 Potencial osmótico***

La difusión de agua a través de una membrana semipermeable (ósmosis), este flujo ocurre gracias a una presión diferencial llamada presión osmótica. El agua del suelo es una solución salina, con una presión osmótica que depende del número de moléculas del soluto. Este potencial indica el valor absoluto de la presión osmótica de la solución, considerada una presión negativa, una succión o tensión.

Existen muchos métodos para determinarla, pero generalmente se utiliza el extracto de saturación. La concentración total de las sales de un medio determina el potencial osmótico (Espinoza, 2018).

### ***1.4.6 Conductividad hidráulica***

Es la velocidad con la que el agua se mueve a través del suelo, depende de la porosidad, una baja conductividad se debe a la baja porosidad, pocos poros grandes y poca interconectividad entre ellos, en suelos gruesos se presenta un valor alto, aunque tengan baja porosidad esto se debe a la tensión aplicada cuando alguna de las dos varia, disminuye al aumentar la tensión matricial pues los macro poros se van haciendo pequeños conforme se incrementa la succión (Flores & Alcalá, 2010).

En la tabla 1 se encuentran los valores de conductividad hidráulica en suelos a diferentes texturas y en la tabla 2 la interpretación de los rangos de acuerdo al Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

## ANTECEDENTES

**Tabla 1.** Valores de Conductividad Hidráulica en Suelos con Diferente Textura. (Flores & Alcalá, 2010).

Clase textural	Ks (cm h <sup>-1</sup> )
Arena	21
Arena migajosa	6.11
Franco arenoso	2.59
Franco arcilloso arenoso	0.43
Franco	1.32
Franco limoso	0.68
Franco arcilloso	0.23
Arcilla arenosa	0.12
Franco arcillo limoso	0.15
Arcillo limoso	0.09
Arcilla	0.06

**Tabla 2.** Rangos de Conductividad Hidráulica Según USDA. (Flores & Alcalá, 2010).

Interpretación	Conductividad hidráulica cm h <sup>-1</sup>
Muy baja	< 0.0036
Baja	0.0036 a < 0.036
Moderadamente baja	0.036 a < 0.360
Moderadamente alta	0.360 a < 3.60
Alta	3.60 a < 36.0
Muy alta	≥ 36.0

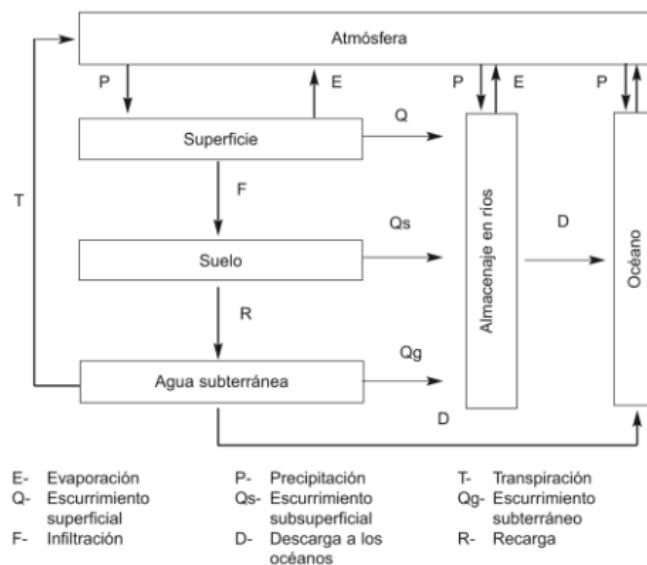
Nota. Los valores bajos son debidos a la baja porosidad, pocos poros grandes y pobre interconectividad, también influye la elevada presencia de arcillas expandibles, los suelos de textura gruesa presentan valores altos a pesar de su baja porosidad.

## ANTECEDENTES

### 1.5 Hidrología del suelo

La hidrología proporciona datos para diseñar, planear y operar estructuras hidráulicas. Por ejemplo, para determinar el volumen de cierta corriente para el abastecimiento de agua potable, riego, generación eléctrica, para construir obras como puentes, sistemas de drenaje, carreteras, aeropuertos, alcantarillas, etc.

El ciclo hidrológico son los cambios que experimenta el agua en la naturaleza, este está en continuo cambio, periodos de satisfacción, secos e inundaciones. La figura 4 muestra las diferentes formas y estados en que se presenta el agua (Villón, 2004).



**Figura 4.** Ciclo Hidrológico. Representación cualitativa. Figura reproducida de Hidrología Villón, 2004.

**Nota.** La descripción puede comenzar en cualquier punto, el agua sobre la superficie (ríos, lagos y mares) se evapora por la radiación solar y el viento. El vapor se condensa y forman nubes que ocasiona precipitaciones, esta agua vuelve a evaporarse o se infiltra por plantas o suelo fluyendo hasta corrientes llegando a océanos, lagos, ríos satisfaciendo la humedad del suelo y abasteciendo depósitos subterráneos, el agua que queda en la superficie regresa a la atmósfera por transpiración (Villón, 2004).

## **ANTECEDENTES**

El manejo del suelo puede afectar la escorrentía, la evaporación y la humedad disponible para las plantas. Comprender el régimen hídrico es vital para interpretar su desarrollo y una adecuada gestión.

El drenaje es un componente importante, se refiere a la rapidez y eliminación del agua agregada al suelo, la frecuencia y duración de periodos en el que el suelo no está saturado. El drenaje interno se ve afectado por la permeabilidad y relaciones del nivel freático, externamente es en gran parte es una función de configuración de la pendiente.

Los suelos mojados tienen un nivel freático alto o cuando son lentamente permeables retienen grandes cantidades de agua. Cuando se encuentran en climas secos, la mayoría son secos excepto los que se encuentran a lo largo de los arroyos o playas. Los humedales se producen por altas lluvias y condiciones frescas, la topografía plana minimiza el escurrimiento favoreciendo el desarrollo de áreas de suelos húmedos, mientras que la ondulada promueve el desarrollo de humedales dentro de depresiones y valles (Simonson & Boersman, 1972 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

### **1.6 Clasificación Hidrológica de los Suelos según USDA**

El USDA Ordena los suelos en 4 categorías (A, B, C y D) tomando en cuenta características físicas como textura, humedad, profundidad, restricciones que impiden el movimiento del agua, etc.

- Suelos A: tienen un bajo potencial de escorrentía, una tasa alta de infiltración. Estos consisten en arenas o gravas profundas o excesivamente drenados y alta transmisión de agua.

## ANTECEDENTES

- Suelos B: medianamente baja potencial de escorrentía, estos suelos tienen infiltración moderada cuando los suelos están muy húmedos, medianamente profundos, drenados, suelos con textura un poco fina o gruesa.
- Suelos C: suelos con moderadamente alto potencial de escorrentía, infiltración lenta cuando están muy húmedos debido a las sales, estos suelos tienen un estrato que impide el movimiento de agua hacia abajo, texturas moderadamente finas, pobremente drenados o medianamente drenados con estratos de permeabilidad lenta o muy lenta, están a poca profundidad entre 50-100 cm, incluye suelos en subgrupos álbicos.
- Suelos D: tienen alto potencial de escorrentía, infiltración muy lenta cuando están muy húmedos debido a sales y suelos poco profundos sobre el material casi impermeable, son suelos arcillosos con alto potencial de expansión, nivel freático alto, tienen estrato arcilloso superficial, alta tasa de transmisión de agua muy lenta, incluye vertisoles, etc. (USDA, 2016).

### 1.7 Conceptos Básicos Hidrológicos

- **Cuenca hidrológica:** unidad para la gestión de recursos hídricos, esta cavidad almacena agua de la lluvia que se desplaza hacia una corriente principal y llega a un punto común de salida. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).
- **Evaporación:** proceso donde el agua líquida es transformada en vapor de agua. La energía necesaria para alterar el estado de las moléculas de agua a vapor es la radiación solar o temperatura ambiental.

## ANTECEDENTES

- **Precipitación:** es el agua que cae en la superficie de la tierra ya sea líquida o sólida provocada por un cambio en la temperatura o presión (Ordoñez , 2011).
- **Balance Hidrológico:** análisis de la estructura y funcionamiento de las cuencas superficiales y subterráneas, cuerpos de agua y ríos, primordial para la gestión del agua.
- **Condensación:** el vapor de agua caliente asciende a través de la atmósfera terrestre. Tan pronto como el vapor de agua se eleva, el aire fresco de la atmósfera hace que se condense en agua líquida, produciendo nubes.
- **Infiltración:** proceso donde el agua de la superficie entra en el suelo. La infiltración lenta apunta a una compactación del suelo e incluye encharcamientos o erosión superficial, una infiltración elevada logra producir una lixiviación de nutrientes.
- **Escorrentía:** agua líquida que se desplaza cuesta abajo por la superficie de los terrenos, es el principal agente de erosión y transporte de sedimentos.
- **Circulación subterránea:** producida a favor de la gravedad.  
Primero: se da en la zona vadosa, en rocas como las calizas y tiene circulación pendiente abajo.  
Segundo: ocurre en los acuíferos en forma de agua intersticial que van llenando los poros de las rocas gracias a fenómenos como la presión y capilaridad.
- **Fusión:** producido cuando la nieve pasa a estado líquido.
- **Solidificación:** cuando la temperatura baja por debajo de 0°C el vapor de agua o agua se congelan (Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento, 2020).

## ANTECEDENTES

### 1.8 Tipos de Agua presentes en los Suelos

El agua del suelo está compuesta por tres fracciones:

- Higroscópica: es el agua absorbida de la humedad del aire, esta agua no es utilizable para las plantas pues las raíces no tienen la suficiente fuerza para extraer esta agua, la cantidad dependerá de la textura, composición mineral y contenido de materia orgánica. Cuando hay alto contenido de materia orgánica y arcilla el suelo capta mayor agua higroscópica.
- Capilar: es el agua disponible que ocupan los microporos, gracias a la tensión superficial del agua se mantienen en el suelo y es utilizable para las plantas, esta es la reserva hídrica del suelo.
- Gravitacional: fracción de agua que ocupan los macroporos de 10 micras, la fuerza de gravedad provoca que se infiltre a las capas más profundas. Si se encuentra en el estrato reticular puede ser utilizado por las plantas (Universidad de San Carlos de Guatemala, 2020).

#### ***1.8.1 Disponibilidad del agua en el suelo***

**Punto de saturación.** Cantidad máxima de agua que un suelo puede contener, es afectado por el contenido de arcilla y materia orgánica, los suelos con textura gruesa alcanzan este punto más rápido que los de textura fina ya que estos tienen poros más grandes que se saturan rápidamente.

**Capacidad de campo (C. C.).** Máxima cantidad de agua en el suelo que puede retener contra la fuerza de gravedad luego de ser saturado libre de drenabilidad después de 24 o 48 horas de la lluvia o riego, el punto corresponde a una succión de 1/3 bar.

## ANTECEDENTES

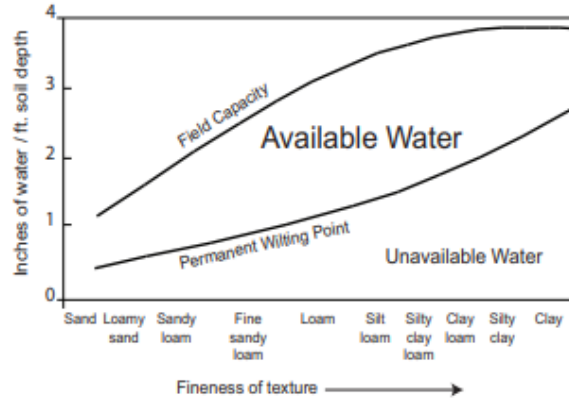
Como máximo las plantas deben succionar hasta 15 bares. El potencial total del agua del suelo estará dado por la sumatoria del potencial matricial y potencial osmótico (FAO, 2013).

**Punto de marchitez permanente (P. M. P.).** Representa el límite inferior para que las plantas puedan extraer agua del suelo, después de los 15 bares de succión, el agua almacenada se denomina como punto de marchitez. Cuando llegan a este punto las plantas pierden la capacidad de succión también la turgencia lo que lo lleva a su marchitez. El potencial total del agua del suelo estará dado por la sumatoria del potencial matricial y potencial osmótico (FAO, 2023).

**Capacidad de retención de agua útil.** Esta característica determina el tiempo el cual las plantas pueden tolerar el periodo seco, esta cantidad de agua retenida puede ser absorbida por las plantas, la diferencia de los valores de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento será la retención de agua disponible.

**Agua disponible.** Es el agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento esta agua es accesible o aprovechable para las plantas, la C. C muestra el límite superior 100% de humedad (los poros del suelo están llenos), el P. M. P. es el límite inferior 0% los poros están vacíos, los suelos de textura fina tienen límites más extensos de agua disponible que los de textura gruesa.

## ANTECEDENTES



**Figura 5.** *Relación entre Humedad y Textura del Suelo.* Figura reproducida del (USDA, 2008).

### **1.8.2 Solución de suelo**

La fase líquida en el suelo es muy importante ya que está en contacto directo con las raíces de las plantas, esta fase está en los poros conocida como solución del suelo o agua disponible.

Esta fase es un sistema dinámico y complejo pues refleja el impacto global de todos los componentes bióticos y abióticos. El volumen está directamente relacionado con la composición y concentración ya que si cambia afectara la concentración de los iones (Menguel y Kirby, 2001 citado en Schaeztl & Anderson, 2005).

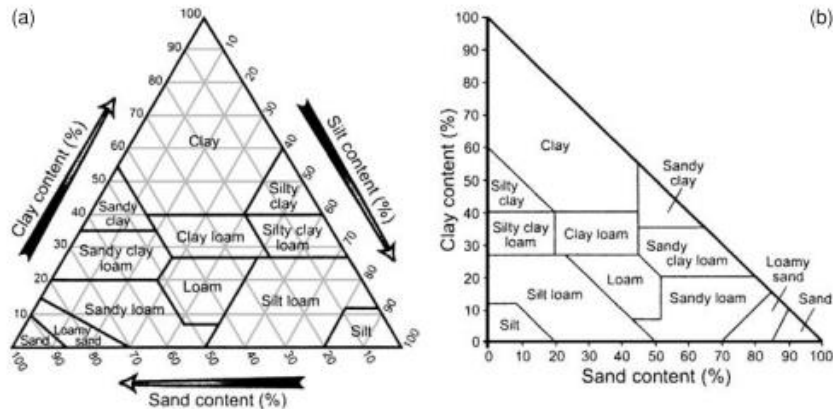
## **1.9 Propiedades Relacionadas con Hidroedafología**

### **1.9.1 Materiales clásticos que componen el esqueleto del suelo.**

Textura: Comúnmente, las partículas minerales en el suelo se dividen en dos fracciones: tierra fina (< 2 mm) y otra más gruesa. La tierra fina se divide según su tamaño, en arena, limo y arcilla. La textura del suelo se refiere a las proporciones de estas.

## ANTECEDENTES

Si se conocen los porcentajes de dos de estas fracciones se podrá saber la clase de tipo textural a la que pertenece el suelo, lo que llevo a Elghamry y Elashkar a desarrollar un triángulo textural parecido al de la figura 6 (Elghamry & Elashkar, 1962 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).



**Figura 6.** Triángulo Textural del Suelo, Basadas en la USDA. Figura reproducida de Soils Genesis and Geomorphology, Schaetzl & Anderson, 2005.

**Nota.** A) triángulo tradicional B) triángulo basado en Elghamry y Elashkar, el triángulo b) es un gráfico XY en un sistema de plano cartesiano, las texturas se determinan con el trazado de las dos variables.

La textura y el contenido de partes gruesas son importantes pues afectan la forma del suelo tal sabemos que el suelo hidrológico opera como una fuente de purificación y suministro.

Flujo saturado, cuando en el suelo hay presencia de grandes cantidades de arenas o fragmentos más grandes el agua se mueve rápidamente ya que tienen poros más grandes donde pueden pasar libremente y hay poca superficie donde puede quedarse almacenada (Brakensiek y Rawls, 1994 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

## ANTECEDENTES

### 1.9.2 Textura

En suelos de textura fina, los poros son más pequeños, por ende, el agua queda retenida provocando una baja permeabilidad. No dejemos de lado el área superficial pues este tiene un papel importante como retener agua, cationes, aniones y nutrientes que dan el color al suelo

Los fragmentos ayudan a resistir la compactación y erosión, los suelos con más cantidad de fragmentos gruesos tienden a tener densidades bajas.

Conforme a USDA poseemos las siguientes clases de partículas menores a 2 mm de diámetro.

Arena:

- Muy gruesa: 1 mm >, < 2 mm
- Gruesa: 0.5 mm >, < 1 mm
- Media: 0.25 mm >, < 0.5 mm
- Fina: 0.10 mm >, < 0.25 mm
- Muy fina: 0.05 >, < 0.10

Limo: 0.002 mm >, < 0.05 mm

Arcilla: < 0.002 mm

Estas características se agrupan en 4 clases que poseen características similares:

**Texturas arcillosas:** suelos plásticos y difíciles de trabajar, retienen gran cantidad de agua y nutrientes debido a la microporosidad y elevada capacidad de intercambio catiónico y baja permeabilidad.

## ANTECEDENTES

**Texturas arenosas:** conocidos como ligeros por su escasa plasticidad y facilidad de trabajo. Excelente aireación debido a las partículas de gran tamaño que facilitan su aireación, la acumulación de materia orgánica es mínima y el lavado de los elementos minerales es elevado.

**Texturas limosas:** contiene propiedades coloidales, formando suelos que se apelmazan con facilidad impidiendo la aireación y circulación de agua.

**Texturas francas:** tienen mayor equilibrio entre sus componentes (Gisbet, Ibáñez, & Moreno, 2010).

Cuando predominan las arenas, el suelo presenta baja capacidad para retener agua debido a que presenta poros grandes por lo que tienen alta filtración y un excelente drenaje.

Cuando la cantidad de arcilla, limo y arena es proporcional, tendrá una porosidad equilibrada lo que permite una buena aireación y drenaje, estos tienen una buena capacidad para retener agua.

Cuando presentan mayores texturas finas (limo y arcilla) tienen alta capacidad de retención de agua, pero se compactan con alta humedad y tienen poros pequeños.

### ***1.9.3 Contenido de grava***

Cuando los suelos tienen más del 50% de las partículas con tamaño mayor que 4.75 mm y como arena cuando el 50% de las partículas son de menor tamaño, no retienen agua del suelo ni conducen movimiento de agua (SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, 2003).

## **ANTECEDENTES**

### ***1.9.4 Permeabilidad del suelo***

Tiene relación con la velocidad que penetra el agua en este, si después de la compactación un suelo de grano grueso tiene poros grandes continuos su permeabilidad es alta, en los suelos de granos finos tienen poros pequeños el agua penetrará lentamente y la permeabilidad será baja (FAO, 2016).

### ***1.9.5 Estructura***

“Es una de las características más importantes pues influye en el movimiento del agua y retención hídrica, el drenaje, la aireación, la penetración de las raíces, el ciclo de nutrientes, etc.” (Hernández, Bojórquez, Morell, & Cabrera, 2010).

La estructura se refiere a la disposición de los elementos primarios, partículas del suelo, por ejemplo, arena, limo, arcilla, en agregados naturales llamados peds. Los horizontes tienen sus propias estructuras únicas, dependiendo de la cantidad de materia orgánica y actividad biótica, textura, etc.

### ***1.9.6 Agregados***

Una característica principal de los agregados es que tienen una fuerte cohesión la cual evita que se rompan, estos pueden ser fluidos secretados por la fauna (saliva u orina), también el humus actúa como un pegamento en los horizontes A, de esta manera los agregados se mantienen compactos (Sutton et al, 1976 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

Las sales, el hierro, aluminio y otras sustancias solubles también pueden actuar como aglutinantes.

## ANTECEDENTES

### ***1.9.7 Poros, huecos y densidad aparente***

Los contenidos de muchos suelos están vacíos, estos son llenados ya sea de aire o agua, un suelo bien aireado contiene hasta 2/3 de espacio vacío, a estos vacíos se les llama porosidad, si un suelo se compacta, los vacíos se reducen de tamaño y número.

La biota es uno de los principales elementos que mantienen la porosidad, especialmente la fauna macroscópica, estos animalitos dejan bioporos en el suelo. También los agregados ayudan a mantener una alta porosidad estos espacios tienden a disminuir con la profundidad (Dexter, 1978 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

Los científicos agrupan los poros en dos categorías principales: macroporos y microporos, poros de tamaño intermedio se denominan mesoporos. No existe un límite de tamaño acordado, pero muchos aceptan que los macroporos son más grandes de 0.075 mm (75  $\mu\text{m}$ ) y los microporos son menos de 30  $\mu\text{m}$  (Kay & Angers, 2000 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

Los gases y líquidos se mueven más rápido por los poros de mayor tamaño, estos macroporos son formados comúnmente por las raíces, biota (gusanos, termitas, etc.) y peds (agregados). Los macroporos transportan agua y aire, drenan rápidamente si se llena con agua después de un evento de infiltración. Los microporos, retienen agua por largos periodos de tiempo, por la tensión superficial estos tienden a ser el principal tipo de poro en suelos arcillosos (Edwards et al, 1988 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

Las altas permeabilidades del suelo se basan en el tamaño de poro y la interconexión. Por ejemplo, los suelos arcillosos tienen altas cantidades de espacios porosos, son permeables muy lentamente ya que los poros son demasiado pequeños

## ANTECEDENTES

para conducir agua y gases a un ritmo más rápido. La permeabilidad se mide como longitud por unidad de tiempo (cm de agua /h). La tasa varía en función de la dirección del flujo, por ejemplo, la permeabilidad vertical puede ser más rápida que horizontal, así como en función de contenido de agua/ gas (saturada vs no saturada) (Manrique & Jones, 1991 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

La densidad aparente es un indicador de compactación y porosidad, este afecta la infiltración, la capacidad de agua disponible, aireación, profundidad de enraizamiento, disponibilidad de nutrientes y actividad de microorganismos en el suelo. Y se define como la relación entre la masa o peso del suelo seco al horno por unidad de volumen en el campo, este refleja la compactación (el contenido total de poros por lo tanto la circulación de aire y agua). La capacidad de agua disponible se reduce cuando se compacta el suelo. Los suelos sueltos, bien agregados, porosos y con alto contenido de materia orgánica tienen menor densidad aparente, los suelos arenosos tienen densidades aparentes altas porque tienen menos espacio poroso que los suelos limosos o arcillosos. Las densidades aumentan a medida que aumenta la profundidad ya que son más compactos y tienen menor espacio poroso contiene menos materia orgánica y menor penetración radicular. En la tabla 3 se observan los valores para las densidades aparentes según la textura del suelo.

## ANTECEDENTES

**Tabla 3.** *Relación entre la Densidad Aparente del Suelo y el Crecimiento de las Raíces según la Textura del Suelo. (USDA, 2019)*

Textura del suelo	Densidad aparente ideal para el crecimiento de las plantas (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad aparente que afecta el crecimiento de las raíces (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad aparente que restringe la raíz del crecimiento (g/cm <sup>3</sup> )
Arena, arena arcillosa	<1.60	1.69	>1.80
Franco arenoso, franco	<1.40	1.63	>1.80
Limoso	<1.40	1.60	>1.75
Franco limoso, franco arcilloso limoso	<1.40	1.55	>1.65
Arcilla arenosa, arcilla limosa, franco arcilloso	<1.10	1.49	>1.58
Arcilloso	<1.10	1.39	>1.47

### **1.9.8 Factores que afectan la densidad aparente y la porosidad**

Cuando la densidad aparente aumenta se incrementa la compactación en consecuencia afecta la retención de humedad. Los suelos altos en materia orgánica tienden a tener densidades aparentes más bajas (Adams et al, 1973 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

Los suelos arcillosos y limosos tienden a tener densidades aparentes bajas estos suelos tienen muchos microporos, lo que ayuda a explicar sus bajas densidades aparentes, mientras que los suelos con texturas franco-arenosas y franco-arcillo-arenosas son más propensos a la compactación por lo que tienen densidades altas pues la arcilla y el limo llenan los grandes vacíos entre los granos de arena (Heinonen et al, 1960 citado en Schaetzl & Anderson, 2005).

## **ANTECEDENTES**

### ***1.9.9 Materia orgánica***

Son las sustancias orgánicas color pardo y negrozco, resultado de la descomposición de materias orgánicas de origen vegetal, conteniendo el 5% de nitrógeno (Gros & Domínguez, 1992 citado en Julca, 2006)

Durante su evolución se distinguen dos fases: la humidificación y mineralización.

Humidificación: los microorganismos actúan sobre la materia orgánica desde el momento en que tocan el suelo, sede de una intensa actividad microbiana, se estima que es el 20 - 25% del humus total y tiene una función importante ligado a la mejor de la estructura.

Mineralización: esta fase es lenta, el humus que contiene recibe la acción de microorganismos los cuales lo destruyen liberando minerales que después absorberán las plantas. La primera etapa es la amonificación que pasa del N orgánico a amonio y la nitrificación que pasa del amonio a nitrato.

La cantidad de humus en el suelo depende de varios factores como la incorporación de nuevos restos orgánicos, la velocidad de oxidación química y biológica, velocidad de descomposición, textura, aireación, humedad y cambios climáticos (Gros & Domínguez, 1992 citado en Julca, 2006).

Teniendo efectos sobre propiedades físicas del suelo, forma agregados y da estabilidad estructural uniéndose a arcillas, favorece la penetración del agua y retención, disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso. También tiene efectos en las propiedades químicas, aumenta la capacidad de cambio del suelo, reserva de nutrientes para la vida vegetal y capacidad tampón que favorece los abonos minerales y facilita la

## ANTECEDENTES

absorción a través de las raicillas. Los efectos en las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, desarrollo de la cubierta vegetal, estimula el crecimiento de plantas (Graetz, 1997 citado en Julca, 2006).

En la tabla 4 se observan los rangos de valores de materia orgánica en suelos minerales y volcánicos.

**Tabla 4.** Valores de Materia Orgánica en suelos minerales y volcánicos. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).

Clase	Materia orgánica (%) suelos volcánicos	Suelos no volcánicos (%)
Muy bajo	<4	<0.5
Bajo	4.1 – 6	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11 – 16	3.6 – 6
Muy alto	>16.1	> 6

### 1.9.10 Salinidad

Las sales presentes en los suelos provienen de la meteorización de las rocas, las sales que participan en los suelos salinos son: Ca, Mg, Na, K, Cl, S, y C con menor proporción N y Be. Las sales una vez formadas, son transportadas por agua que las lleva al mar o depósitos.

Cuanto mayor es la concentración salina, mayor es su efecto perjudicial, las sales nocivas tienen mayor solubilidad. Cuando hay mayor sal en el agua del suelo las plantas tienen que usar más energía para absorber el agua, razón por la cual llega al punto de marchitamiento rápidamente. Las sales más importantes son: sulfato de magnesio,

## ANTECEDENTES

sulfato sódico y cloruro sódico. Una forma de expresar la cantidad de sales disueltas en un volumen de solución es en gramo/litro, otra forma de expresar la salinidad de una solución es por medio de su conductividad eléctrica (C. E). Lo recomendable sería medir la salinidad a capacidad de campo y el punto de marchitez, lo cual se conocerían los límites entre los cuales oscila la salinidad del suelo y para completar la información sería conveniente conocer la porosidad, capacidad de campo y punto de marchitez (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 2004).

La tabla 5 contiene los efectos de salinidad en relación a los valores de conductividad eléctrica.

**Tabla 5.** *Valores de Conductividad Eléctrica. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002).*

Efectos	CE ds m <sup>-1</sup> a 25°C
Efectos despreciables de la salinidad	<1
Muy ligeramente salino	1.1 – 2
Moderadamente salino	2.1 – 4
Suelo salino	4.1 – 8
Fuertemente salino	8.1 – 16
Muy fuertemente salino	>16

### **1.9.11      *Temperatura del suelo***

Conocer los datos de las temperaturas son importantes para estimar las tasas de evaporación, meteorización de minerales, procesos de congelación- descongelación y desarrollo de heladas dentro de los suelos. Un aumento de 10°C provoca la duplicación en las tasas de muchos procesos biológicos y bioquímicos. La temperatura está

## **ANTECEDENTES**

directamente relacionada por la velocidad a la que se intercambia calor del suelo y la superficie.

La reflexión depende de la humedad del suelo pues los suelos húmedos son más oscuros, esto evita la reflexión y aumenta la absorción de energía por lo tanto su temperatura depende de la proporción de agua, aire y sólidos (Schaetzl & Anderson, 2005).

### **1.9.12 Gases en el suelo**

La fuente principal de gases en el suelo es la atmósfera, estos se difunden desde la atmósfera hacia el suelo y viceversa, la composición de gas del suelo es similar a la de la superficie, en el suelo la concentración es más baja porque la respiración microbiana y de las raíces provocan que el  $\text{CO}_2$  del suelo disminuyan, así como el  $\text{O}_2$  que normalmente es más bajo en el suelo. Estos gases se mueven por medio de difusión, pueden disolverse en el agua a través de películas de agua y poros llenos de agua, este tipo de difusión es lenta, por lo que el transporte principal es en fase gaseosa.

Esta difusión se rige por la ley de Fick que especifica que la difusión depende de la concentración del gradiente entre dos puntos y del coeficiente de difusión del gas. Este último puede ser bastante bajo, dado que el suelo es un medio en el que las moléculas de gas tienen que viajar a través de poros estrechos y por caminos tortuosos. Así, el coeficiente efectivo de difusión de un gas en el suelo es retardado por un factor conocido como el factor de tortuosidad del gas, que se determina experimentalmente, pero depende de la textura del suelo y distribución del tamaño de poro en el relleno de gas, los suelos de textura fina con poros pequeños tienen intercambio de gases más limitado

## ANTECEDENTES

con el aire, especialmente cuando está húmedo. Así, en suelos cálidos, arcillosos y húmedos, las concentraciones de  $\text{CO}_2$  puede superar el 5 % en volumen, en contraste con alrededor del 0,035% de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Por el contrario, el  $\text{CO}_2$  se produce como se consume oxígeno, por lo que el  $\text{O}_2$  disminuye en condiciones en las que aumenta el  $\text{CO}_2$  en suelos arcilloso, en condiciones anaeróbicas es posible para que las concentraciones de  $\text{O}_2$  caigan a casi cero como  $\text{CO}_2$  las concentraciones suben a más del 5%. En suelos arenosos secos, la atmósfera del suelo está más cerca del equilibrio con la atmósfera, por lo que el oxígeno en los poros del suelo se reemplaza rápidamente mediante la difusión según lo consuman las raíces y microorganismos. Las altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  en los suelos crean alcalinidad en la solución del suelo, precipitación de minerales carbonatados, y ayudan en el desarrollo de horizontes Bk.

El agotamiento de Oxígeno debajo de la superficie del suelo puede conducir a la reducción química en el suelo, mientras que las condiciones oxidantes promueven la disolución de  $\text{Fe}^{2+}$  minerales  $\text{Mn}^{2+}$  y la formación de hierro (y manganeso) óxidos. Aunque el vapor de agua es un gas, el movimiento de vapor de agua en los suelos es diferente al flujo de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ . El transporte de vapor de agua depende de los gradientes en la temperatura del aire del suelo,  $\left(\frac{drv}{dt}\right)$  así como el gradiente de temperatura de la fase sólida. Además, los poros llenos de agua son accesibles al flujo de vapor de agua, porque el vapor de agua se puede condensar en un lado de un recipiente de agua.

En general, el vapor de agua fluye desde áreas de temperatura más baja a zonas de temperatura más alta, donde la humedad relativa es menor. Por lo tanto, durante el día, cuando la superficie del suelo está caliente y el agua se evapora de la superficie, el vapor de agua fluye hacia arriba en el suelo hacia la superficie más seca. En la noche,

## **ANTECEDENTES**

el flujo de vapor puede ser hacia abajo (si la superficie del suelo se enfría lo suficiente), o puede continuar fluyendo hacia arriba, si la humedad relativa sigue siendo más baja en la superficie (Schaetzl & Anderson, 2005).

### **1.10 Software de Simulación**

Existen algunos programas que permiten predecir el comportamiento del agua al interior del suelo algunos de estos son:

#### **1.10.1 *Soil water characteristics***

Disponible de forma gratuita en la página web de la USDA, diseñada por los autores del departamento, el Dr. Keith E. Saxton y Dr. Walter Rawls.

Es utilizada para predecir la tensión del agua en el suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua en función de variables como: la textura del suelo, contenido de grava, compactación, salinidad y materia orgánica. Al usar los valores, es importante tener en cuenta que son aproximaciones. Las aproximaciones de textura cambian de acuerdo a una de las cuatro variables: materia orgánica, salinidad, grava y densidad (compactación). La materia orgánica se evaluó con la ecuación de correlaciones de textura.

Las ecuaciones aplicadas se describen en la tabla 6 y en la tabla 7 se encuentran las definiciones de los símbolos utilizados.

## ANTECEDENTES

**Tabla 6.** Ecuaciones para estimaciones de las características del agua en el suelo. Fuente (Vázquez, 2015)

Variable	Ecuación	R <sup>2</sup> / Se	Eq. No.
<i>Regresiones de humedad</i>			
$\Theta_{1500}$	$\Theta_{1500} = \Theta_{1500t} + 0.14 * \Theta_{1500t} - 0.02$ $\Theta_{1500t} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM + 0.005(S * OM) - 0.013(C * OM) + 0.068(S * C) + 0.031$	0.86/ 0.02	1
$\Theta_{33}$	$\Theta_{33} = \Theta_{33t} + 1.283 * \Theta_{33t}^2 - 0.374 * \Theta_{33t} - 0.015$ $\Theta_{33t} = -0.251S + 0.195C + 0.011OM + 0.006(S * OM) - 0.027(C * OM) + 0.452(S * C) + 0.299$	0.63/ 0.05	2
$\Theta(S-33)$	$\Theta(S-33) = \Theta(S-33)t + 0.636 * \Theta(S-33)t - 0.107$ $\Theta(S-33)t = 0.278S + 0.034C + 0.022OM - 0.018(S * OM) - 0.027(C * OM) - 0.584(S * C) + 0.078$	0.36/ 0.06	3
$\Psi_e$	$\Psi_e = \Psi_{et} + 0.02\Psi_{et}^2 - 0.113\Psi_{et} - 0.70$ $\Psi_{et} = -21.67S - 27.93C - 81.97\Theta(S-33) + 71.12(S * \Theta(S-33)) + 8.29(C * \Theta(S-33)) + 14.05(S * C) + 27.16$	0.78/ 2.9	4
$\Theta_S$	$\Theta_S = \Theta_{33} + \Theta(S-33) - 0.097S + 0.043$	0.29/ 0.04	5
$\rho_N$	$\rho_N = (1 - \Theta_S) * 2.65$		6
<i>Ajustes de densidad</i>			
$\rho_{DF}$	$\rho_{DF} = \rho_N * DF$		7
$\Theta_S - DF$	$\Theta_S - DF = 1 - (\rho_{DF} / 2.65)$		8
$\Theta_{33} - DF$	$\Theta_{33} - DF = \Theta_{33} - 0.2(\Theta_S - (\Theta_S - DF))$		9
$\Theta(S-33) - DF$	$\Theta(S-33) - DF = \Theta_S - DF - \Theta_{33} - DF$		10
<i>Tensión Humedad</i>			
$\Psi_{1500-33}$	$\Psi_{\Theta} = A(\Theta) - B$		11
$\Psi_{33} - \Psi_e$	$\Psi_{\Theta} = 33.0 - [(\Theta - \Theta_{33}) (33.0 - \Psi_e / (\Theta_S - \Theta_{33}))]$		12
$\Theta_{\Psi_e-0}$	$\Theta = \Theta_S$		13
A	$A = \exp [\ln(33) + B \ln(\Theta_{33})]$		14
B	$B = [\ln(1500) - \ln(33)] / [\ln(\Theta_{33}) - \ln(\Theta_{1500})]$		15

## ANTECEDENTES

Variable	Ecuación	R <sup>2</sup> / Se	Eq. No.
<i>Humedad- conductividad</i>			
KS	$KS = 1930 (\Theta S - \Theta 33) (3 - \lambda)$		16
K $\Theta$	$K\Theta = KS(\Theta/\Theta S) (3 + 2/\lambda)$		17
$\lambda$	$\lambda = 1 / B$		18
<i>Efectos de grava</i>			
Rv	$Rv = (\alpha * R_w) / [1 - R_w(1 - \alpha)]$		19
$\rho B$	$\rho B = \rho N(1 - Rv) + (Rv * 2.65)$		20
PAWB	$PAWB = PAW * (1 - Rv)$		21
Kb/KS	$Kb/KS = (1 - R_w) / [1 - R_w (1 - 3\alpha/2)]$		22
<i>Efectos de la salinidad</i>			
	$\Psi O = 36 * EC$		23
$\Psi O \Theta$	$\Psi O \Theta = (\Theta S / \Theta) * (36 * EC)$		24

**Tabla 7.** Definiciones de símbolos de ecuaciones. Fuente (Vázquez, 2015).

Símbolo	Definición
SAT	Saturación (0 kPa humedad), %v
FC	Capacidad de campo (33 kPa humedad), %v
WP	Punto de marchitamiento (1500 kPa humedad), %v
PAW	Agua disponible para la planta (33-1500 kPa humedad), %v
DF	Factor de densidad (0.9-1.3)
$\Theta \Psi$	Contenido de humedad a tensión $\Psi$ , %v
$\Theta 1500t$	1500 kPa humedad, primera solución, %v
$\Theta 1500$	1500 kPa humedad, densidad normal, %v
$\Theta 33t$	33 kPa humedad primera solución, %v
$\Theta 33$	33 kPa humedad, densidad normal, %v
$\Theta 33-DF$	33 kPa humedad, densidad ajustada, %v

## ANTECEDENTES

Símbolo	Definición
$\Theta(S-33) t$	0-33 kPa humedad, primera solución, %v
$\Theta(S-33)$	0-33 kPa humedad, %v
$\Theta S$	0 kPa humedad (saturada), densidad normal, %v
$\Theta S-DF$	0 kPa humedad, densidad ajustada %v
$\Psi \Theta$	Tensión a la humedad $\Theta$ , kPa
$\Psi e$	Tensión en la entrada de aire (presión de burbujeo), kPa
KS	Conductividad saturada, mm/hr
$K\Theta$	Conductividad insaturada en humedad, $\Theta$ , mm/hr
$\rho N$	Densidad normal, g/cc
$\rho DF$	Densidad ajustada, g/cc
$\lambda$	Pendiente de la curva logarítmica tensión- humedad
Rv	Fracción de volumen de grava (decimal), g/cc
Rw	Fracción en peso de grava (decimal), g/g
$\rho B$	Densidad aparente del suelo con grava, %v
PAWB	Agua disponible para las plantas con grava, %v
Kb	Conductividad saturada del suelo a granel, mm/hr
EC	Conductancia eléctrica de un extracto del suelo saturado S/m (Deci-siemen/meter (dS/m) = mili-mho/cm).
$\Psi O$	Potencial osmótico, kPa
$\Psi O\Theta$	Potencial osmótico a $\Theta < \Theta S$ , kPa

### Comandos del menú del programa

#### FILE:

New: permite iniciar nuevamente.

Save As: permite guardar las entradas y salidas de una solución en un archivo de texto.

## ANTECEDENTES

Save Chart: permite guardar el grafico de las curvas de contenido hídrico, tensión, conductividad. Los gráficos de cada solución deben guardarse por separado.

Save Image: permite guardar el triángulo textural en un archivo separado.

Print: imprime el texto de los inputs y outputs de todas las soluciones abiertas de la misma forma que en el archivo de texto. También pueden imprimirse cada gráfico y triángulo textural.

Exit: permite salir y cerrar del programa.

## OPTIONS:

Units: concede definir el sistema de unidades (Métrico o inglés), así como las unidades de entrada para % gravas: gravimétrica o volumétrica (% volumen).

Chart Range: permite seleccionar el rango de la escala de tensión del gráfico, Contenido Hídrico Tensión de 1 a -50 kPa o en todo el rango de 0 a-1500 kPa.

Soil Equations: concede al usuario elegir usar las ecuaciones de la versión (1986) o las ecuaciones (2006).

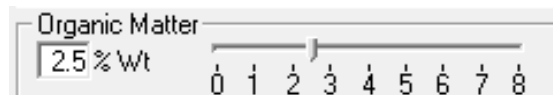
WINDOW: permite seleccionar soluciones abiertas y una vista a disposición en mosaicos verticales, horizontales o en cascada.

HELP: contiene descripciones de las ecuaciones del programa.

## ANTECEDENTES

### Efecto de la Materia Orgánica (M. O.)

El incremento de la MO produce un aumento de la capacidad de retención de agua y de la conductividad, como resultado de su influencia en la agregación del suelo y asociado a la distribución de poros.

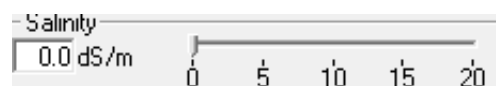


**Figura 7.** Control de Variación del % de MO. Figura Adaptada de Vázquez, 2015.

**Nota.** El % de MO puede modificarse con el control.

### Efecto de la Salinidad

La salinidad del suelo indica cuando el agua del suelo contiene sales a una concentración que puede perjudicar a los cultivos esto es debido al incremento del potencial osmótico y/o de la toxicidad de ciertos iones. El potencial osmótico más el potencial mátrico aumenta la energía requerida para la absorción de agua en todos los niveles de la curva de retención de humedad y reduce el agua útil por hacerla menos disponible. Además, la salinidad afecta los procesos hidrológicos de infiltración y distribución por medio de cambios químicos que alteran la estructura y la agregación.

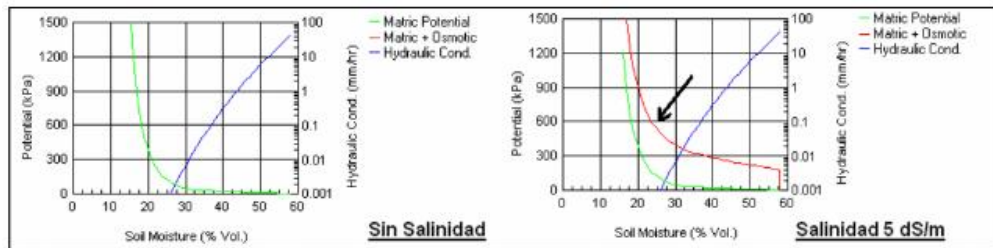


**Figura 8.** Control de Variación de Salinidad. Figura adaptada de Vázquez, 2015.

**Nota.** El programa permite modificar la salinidad como se observa en la figura.

## ANTECEDENTES

El programa gráfico permite observar el efecto de la salinidad en las curvas de potencial mátrico + osmótico. Una salinidad “cero” su potencial osmótico será de cero y en consecuencia las curvas de potencial mátrico y osmótico se “superponen”. A medida que se corre el cursor de la salinidad hacia la derecha, puede observarse como se incrementa la curva de potencial osmótico + mátrico.

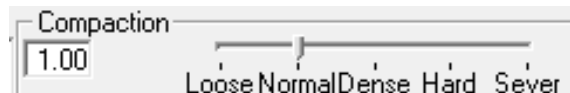


**Figura 9.** Incremento del Potencial de Agua por Aumento del Potencial Osmótico por Salinidad.

Figura adaptada de Vázquez, 2015.

## Efecto de la compactación

Es la “densificación” del suelo. Comprimiendo los espacios porosos, para acomodar las estimaciones de humedad en suelos con variaciones conocidas respecto de la densidad normal.



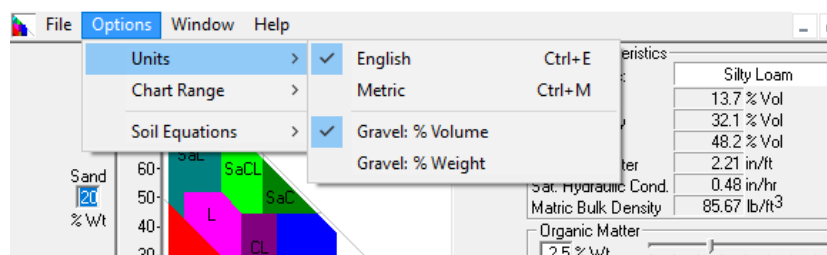
**Figura 10.** Control de variación de compactación. Figura adaptada de Vázquez, 2015.

**Nota.** El aumento de la compactación afecta el volumen de poros entre capacidad de campo (CC o Field Capacity) y saturación (Saturation).

## ANTECEDENTES

### Efecto del contenido de gravas

En suelos agrícolas pueden estar presentes partículas de gravas (> 2 mm) y rocas pequeñas. Su presencia disminuye la matriz del suelo donde el agua puede ser almacenada o conducida, incrementando la densidad aparente y disminuyendo el contenido de agua útil disponible para los cultivos. La proporción de gravas puede expresarse como % del volumen o cómo % de peso.



**Figura 11.** %volumen o del peso cálculo del % de agua útil y del contenido hídrico actual de una muestra. Figura adaptada de Vázquez, 2015.

Si se conoce la textura de la muestra (% de arena y % de arcilla) se puede utilizar soil water characteristics para estimar los puntos de P. M. P y C. C. y el volumen máximo de agua útil. Asimismo, puede estimarse la densidad aparente para convertir en % humedad gravimétrica en % humedad volumétrica e incluso ajustar dicha estimación por contenido de M. O y por grado de compactación en suelos labreados o bajo siembra directa (Vázquez, 2015).

**Capacidad de Campo C. C.** Es el contenido hídrico en (%V), que se aproxima al contenido de agua de un suelo saturado luego de haber drenado libremente a una tensión de 33 kPa, no es afectada por la salinidad ni gravas (Vázquez, 2015).

## ANTECEDENTES

**Capacidad de retención de agua útil o agua disponible.** Es la cantidad de agua expresada en cm/cm que una planta puede extraer del suelo a capacidad de campo, calculada como  $C. C. (\%) - P. M. P. (\%V) * \text{profundidad del suelo (cm)}$  (Vázquez, 2015).

**Punto de marchitez permanente P. M. P.** Es el contenido de agua (%V), donde las plantas no son capaces de extraer agua del suelo. Depende de la textura, no es afectada por la salinidad y contenido de grava (Vázquez, 2015).

**Conductividad hidráulica.** Es la capacidad del agua para desplazarse dentro del suelo conducida por el potencial mátrico y gravitacional (cm/s) dependiente de la textura del suelo y del contenido hídrico (Vázquez, 2015).

**Saturación.** Resulta cuando el volumen total de poros se encuentra lleno de agua. Depende de la textura del suelo no es afectada por la salinidad ni gravas (Vázquez, 2015).

Representa la máxima capacidad de almacenamiento de agua en un suelo, ocupa todo el espacio poroso y su potencial mátrico = 0 y el potencial total será función del potencial osmótico, dada por la salinidad de la solución del suelo.

**Tensión.** El potencial mátrico, donde el agua del suelo es retenida dentro de pequeños espacios de las partículas del suelo por fuerzas capilares, este valor dependerá de la textura y el contenido de humedad (Vázquez, 2015).

**Salinidad.** Son los compuestos químicos disueltos en el agua del suelo, normalmente son sales las cuales agregan presión osmótica (Potencial osmótico) al potencial mátrico del suelo, afecta la extracción de agua de las plantas producida por

## ANTECEDENTES

osmosis a través de las membranas de las raíces, es medida como conductividad eléctrica en una solución de suelo saturado (dS/m) (Vázquez, 2015).

**Densidad aparente.** Es el coeficiente de masa de suelo dividido su volumen, el programa estima  $(1 - \text{SAT}) * 2.65$  (Vázquez, 2015).

### **1.10.2 Voxler V4**

Otro simulador es Voxler V4 donde registra su número de serie en línea en [www.GoldenSoftware.com](http://www.GoldenSoftware.com). El registro le da derecho a soporte técnico gratuito, actualizaciones menores gratuitas y precios de actualización en futuros lanzamientos de Voxler. El número de serie es necesario cuando ejecuta Voxler por primera vez, se pone en contacto con el soporte técnico o compra actualizaciones de Voxler.

Modela datos en todas las dimensiones con las amplias herramientas de modelado 3D de Voxler, es fácil visualizar datos de múltiples componentes para modelos geológicos y geofísicos, columnas de contaminación, nubes de puntos, modelos de pozos o de depósitos de yacimientos.

Voxler está diseñado para mostrar datos XYZC, donde C es una variable en cada ubicación X, Y y Z se pueden crear resultados gráficos para modelos tridimensionales. Los datos meteorológicos, la microscopía de alta resolución, los campos de flujo y el modelado de aguas subterráneas también son fuentes de datos volumétricos (Software Científico, 2020).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de Estudio, Parque Ecológico Recreativo “General Lázaro Cárdenas” Flor del Bosque.

#### ***2.1.1 Antecedentes del área***

El 24 de diciembre de 1985 es publicado en el periódico oficial del estado la declaratoria de utilidad pública y beneficio social para la creación del Parque Ecológico Recreativo “General Lázaro Cárdenas” en el predio llamado Flor del Bosque del municipio de Amozoc, los objetivos del programa es el de mejorar e incrementar lugares de atracción recreativa con fines turísticos, así como conservar las zonas boscosas en la periferia de la Ciudad de Puebla.

El Parque Ecológico Recreativo General Lázaro Cárdenas Flor del Bosque fue inaugurado el 24 de enero de 1987 y el 8 de abril de 1994 se declara como Reserva Ecológica, El Parque Ecológico Recreativo General Lázaro Cárdenas Flor del Bosque (Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

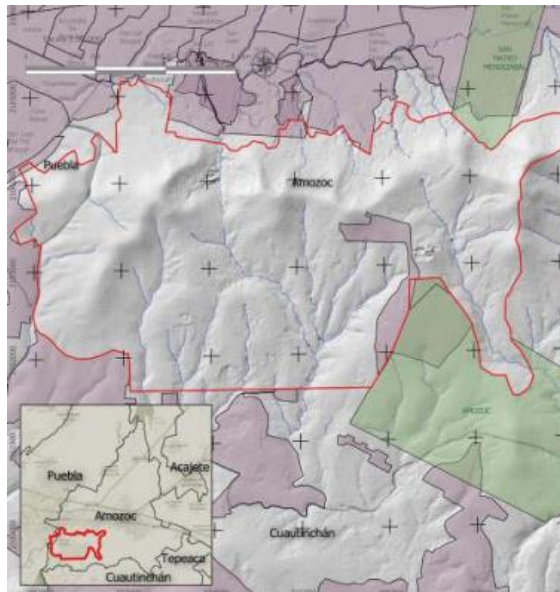
#### ***2.1.2 Localización***

El Parque está en el área metropolitana de Puebla, en el centro y poniente, incluyendo parcialmente los municipios de Amozoc y Puebla como se observa en la figura 12. Esta área abarca 15.0715 Km. Y una superficie de 1507.15 hectáreas, de las cuales el 96.19% es superficie de Amozoc y el 3.81% Puebla, situada en las coordenadas UTM WGA 84.

## METODOLOGÍA

Limita con al norte con colonias como: Ampliación San Juan 3ra sección, San Pedro, Linda Vista, Agua Santa II, Tepetate, San Martín, Santa Rosa, Fraccionamiento Bosques de Cuauhyocan, Arenal 2da sección. Noreste: San Mateo Mendizábal 2da Sección, La Ánimas (Ex Rancho las Ánimas), La Ocotera, La Nueva España, Ejidos Amozoc y San Mateo, Cabecera municipal de Amozoc y San Bartolo Chachapa. Este: Potonqui (Los Rojas) y Ejido Amozoc. Sur: Santa Cruz Alpuyecá, Ejido Amozoc, Guadalupe Victoria y Quintas. Sureste: Haras Ciudad Ecológica, Bosques de Chapultepec, Galaxia La Calera, Haras de Bosque y Fundadores del Ejido colonia Chapultepec. Oeste: Francisco Javier Clavijero, San Juan Flor del Bosque, Paraíso, Casa Blanca y Periférico Ecológico (Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

En la figura 12 se pueden observar los municipios con los que colinda.



**Figura 12.** Colindancias de Flor del Bosque. Figura reproducida de (Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

## **METODOLOGÍA**

### ***2.1.3 Tipos de suelo***

Es una combinación de suelos en la zona: Litosol + Feozem Háplico + Cambisol Eútrico fase Dúrica.

Litsoles son suelos poco profundos que están sobre roca, gravillosos y pedregosos, comunes en regiones montañosas. Los Feozem Háplico suelos con presencia de humedad, horizonte superficial oscuro y rico en humus son suelos con horizonte A mólico, con alto nivel de carbono orgánico finos o gruesos solubles, este suelo no es rígido cuando se seca, cuenta con un grado de saturación por arriba del 50% en los 125 cm superiores y tienen alta saturación con bases. Los cambisoles arenosos, suelos maduros, bien desarrollados, estos suelos acumulan los coloides provenientes de la lixiviación del horizonte A, las texturas que presentan son intermedias muy distintas a las rocas y otros materiales de partida.

La letra D corresponde de a la fase Dúrica, es una capa cementada por sílice entre los 50 y 100 cm de profundidad, no es soluble en agua y es rígido (FAO-UNESCO, 2003 citado en Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

### ***2.1.4 Tipo de vegetación***

Uno de los principales ecosistemas que se localizan son bosques de encinos o encinares, arbustos con áreas con predominancia de especies características de matorral espinoso.

La flora existente es del Matorral Xerófilo con variantes del matorral Espinoso. Se caracterizan por tener especies como suculentas, plantas con hojas arrosetadas y platas

## METODOLOGÍA

afiladas (Rzedowski, 1972 citado en Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

### **2.1.5 Fauna**

Reptiles y anfibios: La ciudad de Puebla cuenta con 247 especies registradas, 82 anfibios y 165 reptiles pertenecientes a 35 familias, de estas especies el 4% son endémicas (CONABIO, 2011 citado en Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

En el sitio se reconocieron 5 especies de anfibios de 4 familias *Bufo* (*Bufo* pionero), *Eleutherodactylidae* (rana fisgona), *Hylidae* (rana verde mexicana), *Ranidae* (rana manchada) y *Scaphiopodidae* (sapo de espuelas mexicano); para los reptiles se definieron 19 especies distribuidas en 6 familias *Anguillidae* (escorpión, lagarto escorpión texano), *Colubridae* (toluqueña rayada, culebra) *Kinosternidae* (casquito de burro, tortugas de agua, tortuga de río, tortuga pecho quebrado mexicana), *Phrynosomatidae* (camaleón, chintete de mezquite, lagartija escamosa de mezquite), *Tiidae* (huico) y *Viperidae* (víbora de cascabel).

Aves: se cuentan con 595 especies pertenecientes a 67 familias, colocando al estado como el cuarto lugar con el 55% de la riqueza nacional (CONABIO, 2011 citado en Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

En el sitio de estudio se reconocieron 123 especies distribuidas en 39 familias, se cuentan con aves como *Parulidae* (chipe corona naranja, pavito alas negras, mascarita matorralera, reinita de nashville), *Passerellidae* (gorrion, rascador moteado, junco ojos

## **METODOLOGÍA**

de lumbre, rascador viejito) e *Icteridae* (zanate mexicano, tordo ojos rojos, calandriatunera, etc.).

Mamíferos: En Puebla se informan 161 especies distribuidas en 23 familias (CONABIO, 2011 citado en Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

Ejemplo de estos son: zorro gris, coyote, venados, tlacuache, armadillo, gato montés, conejo, tejo, cacomixtle, mapache, murcielago, ardillas, ratas y ratones.

### **2.1.6 Clima**

Templado subhúmedo: lluvias en verano de humedad media, la temperatura anual mayor entre 12°C y 18°C, el mes más frío entre -3°C y 18°C, el mes más caliente es de 22°C, con una precipitación del mes más seco de 40 mm, el periodo de noviembre a abril, se considera de sequía (debajo de los 60 mm), presenta una precipitación pluvial con un rango promedio de 800 a 1000 mm y el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5 mm, de mayo a octubre se concentra la mayor cantidad de precipitación anual (García, 1990 citado en Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

### **2.1.7 Hidrología**

Este polígono se encuentra en la parte noroeste de la cuenca del Río Atoyac, en la cuenca hidrográfica Río Balsas, entre las subcuencas de Chapulco y Tlaltempan Santa Catarina (INEGI et al, 2007 citado en Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

## **METODOLOGÍA**

La cuenca del río Atoyac cuenta con un drenaje tipo detrítico, formado por corrientes perennes e intermitentes de los ríos que alimentan esta cuenca tenemos a río Zahuapan y Xochiac.

El origen del río Atoyac viene de los deshielos del volcán Iztaccíhuatl, recibe este nombre al conectar con los ríos Tlahuapan y Turín. Asimismo, es el río más importante del Estado.

### ***2.1.8 Hidrología subterránea***

La cuenca del río Alto Atoyac une a Alto Atoyac y Valle de Puebla, en menor cantidad Tecolutla, Emiliano Zapata, Soltepec, Texcoco, Chalco- Amecameca, Valle de Tecamachalco, Ixcaquixtla y Atlixco- Izúcar de Matamoros. Muestra por lo menos 3 niveles de extracción: nivel superior hasta los 50 m al sur de Zacatelco, nivel intermedio entre 70 y 200 m y tercer nivel tiene más de 250 m, localizado entre rocas volcánicas (basaltos, tobas y andesitas).

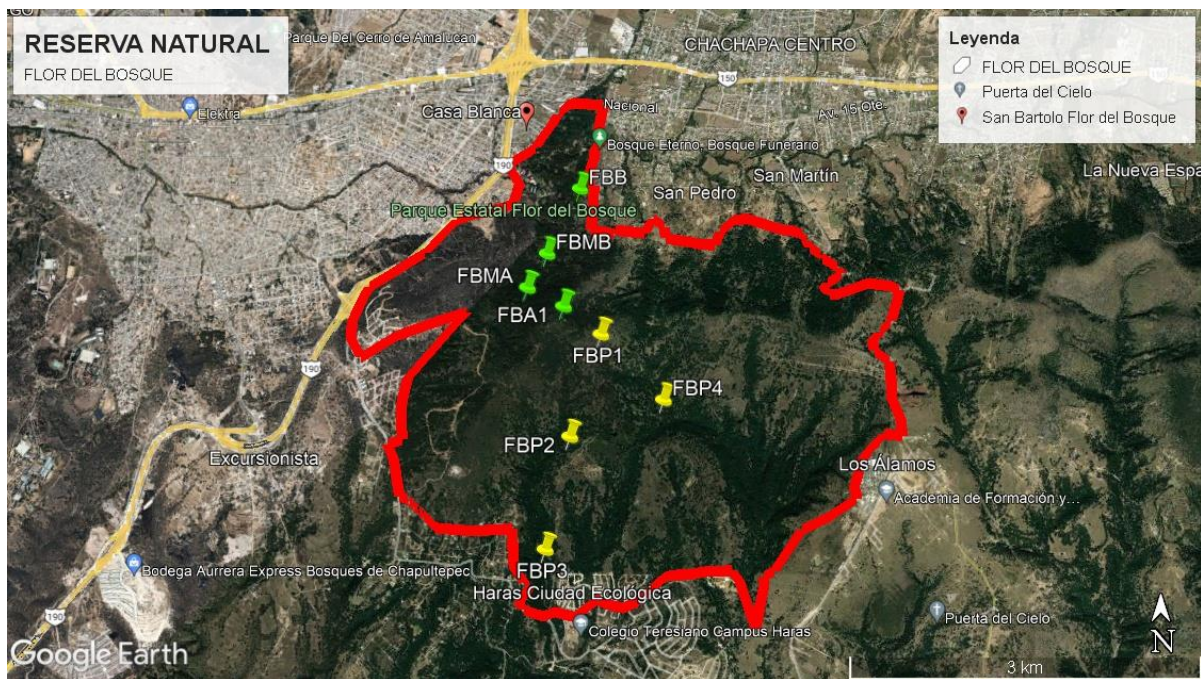
En la superficie ocupada por “Flor del Bosque” se encuentran dos submicrocuencas, la primera abarca el río Alseseca al norte y al este el del Cerro Grande, se desarrollan corrientes de primer orden y desembocan en escurrimientos de tercer orden. La segunda submicrocuenca se origina en la parte del cerro Grande y la Meseta la Lobera, los escurrimientos dentro de esta área forman causes de primer y segundo orden.

En la superficie de “Flor de Bosque” se distribuyen 10 jagüeyes, 8 localizados en la Reserva y dos más en sus alrededores (Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, 2020).

## METODOLOGÍA

### 2.2 Localización del sitio

La zona de estudio para la presente tesis es el Parque Flor del Bosque en el cual se tomaron 8 coordenadas de las tesis de Monty Seon Mikal Browne y Arturo Durán Apodaca, 4 puntos de Monty Mikal y 4 puntos de Arturo Durán. Estos puntos indican las coordenadas del sitio, se introdujeron en la herramienta Google Earth para apreciar mejor el área de estudio (Durán, 2011; Mikal, 2010).



**Figura 13.** Área de estudio, Flor del Bosque.

**Nota.** En la imagen se aprecia el área de estudio, conocido como Parque Ecológico Recreativo “General Lázaro Cárdenas” en el predio Flor del Bosque del municipio de Amozoc, las tachuelas indican las coordenadas de los puntos de muestreo a través del bosque.

## METODOLOGÍA

Datos: Se realizó una tabla con cuatro coordenadas tomadas de la tesis de Mikal, en la cual precisa que se tomaron considerando la diferencia de altitud que existe en la ladera norte del cerro evitando zonas modificadas por acciones antropogénicas como se observa en la tabla 8.

**Tabla 8.** Datos del sitio de muestreo de la tesis "Evaluación de la fertilidad de una Ladera Sur de la Reserva Parque Estatal Flor del Bosque Puebla". (Mikal, 2010).

Nombre de muestra	Coordenadas		Profundidad (cm)	Abreviación de Nombre
Flor del Bosque Punto 1,1	593737	2103529	0-25	FBP11
Flor del Bosque Punto 1,2	593737	2103529	25-40	FBP12
Flor del Bosque Punto 2,1	593470	2102644	0-8	FBP21
Flor del Bosque Punto 2,2	593470	2102644	8-19	FBP22
Flor del Bosque Punto 2,3	593470	2102644	19-33	FBP23
Flor del Bosque Punto 2,4	593470	2102644	>33	FBP24
Flor del Bosque Punto 3,1	593261	2101672.2	0-20	FBP31
Flor del Bosque Punto 3,2	593261	2101672.2	20-50	FBP32
Flor del Bosque Punto 3,3	593261	2101672.2	50-90	FBP33
Flor del Bosque Punto 3,4	593261	2101672.2	90-110	FBP34
Flor del Bosque Punto 3,5	593261	2101672.2	110-130	FBP35
Flor del Bosque Punto 4,1	594286	2102967	0-20	FBP41
Flor del Bosque Punto 4,2	594286	2102967	20-40	FBP42

Lo mismo se realizó con las cuatro 4 coordenadas de la ladera sur (Durán) él determina que estos puntos fueron seleccionados como los más representativos, tomó en cuenta el relieve, accesibilidad y que las zonas no estuvieran alteradas por actividad humana, siendo recolectadas a diferentes horizontes como se observa en la tabla 9.

## METODOLOGÍA

**Tabla 9.** Datos del sitio de muestreo de la tesis “Evaluación de la fertilidad de una Ladera Norte de la Reserva Parque Estatal Flor del Bosque Puebla”. (Durán, 2011).

Nombre de muestra	Coordenadas		Profundidad (cm)	Abreviación de Nombre
Flor del Bosque Alto 1	593410	2103764	0-10	FBA1
Flor del Bosque Alto 2	593410	2103764	10-15	FBA2
Flor del Bosque Alto 3	593410	2103764	15-45	FBA3
Flor del Bosque Medio Alto 1	593089	2103938	0-7	FBMA1
Flor del Bosque Medio Alto 2	593089	2103938	7-22	FBMA2
Flor del Bosque Medio Alto 3	593089	2103938	22-32	FBMA3
Flor del Bosque Medio Alto 4	593089	2103938	32-42	FBMA4
Flor del Bosque Medio Alto 5	593089	2103938	>42	FBMA5
Flor del Bosque Medio Bajo 1	593254	2104253	0-8	FBMB1
Flor del Bosque Medio Bajo 2	593254	2104253	8-21	FBMB2
Flor del Bosque Medio Bajo 3	593254	2104253	21-28	FBMB3
Flor del Bosque Medio Bajo 4	593254	2104253	28-38	FBMB4
Flor del Bosque Medio Bajo 5	593254	2104253	>38	FBMB5
Flor del Bosque Bajo 1	593540	2104863	0-3	FBB1
Flor del Bosque Bajo 2	593540	2104863	3-35	FBB2
Flor del Bosque Bajo 3	593540	2104863	35-51	FBB3

La tabla 10 resume las ocho coordenadas del sitio de trabajo de las dos tesis antes mencionadas.

## METODOLOGÍA

**Tabla 10.** *Coordenadas del área de muestreo. (Durán, 2011; Mikal, 2010).*

Abreviación de Nombre	Coordenadas		Altitud	Ladera
	X	Y		
FBP11	593737	2103529	2400	SUR
FBP12				
FBP21	593470	2102644	2324	
FBP22				
FBP23				
FBP24				
FBP31	593261	2101672.2	2251	
FBP32				
FBP33				
FBP34				
FBP35				
FBP41	594286	2102967	2318	
FBP42				
FBA1	593410	2103764	2400	
FBA2				
FBA3				
FBMA1	593089	2103938	2375	NORTE
FBMA2				
FBMA3				
FBMA4				
FBMA5				
FBMB1	593254	2104253	2288	
FBMB2				
FBMB3				
FBMB4				
FBMB5				
FBB1	593540	2104863	2172	
FBB2				
FBB3				

## METODOLOGÍA

### 2.3 Muestreo y Análisis Físico

Localizadas las coordenadas Mikal y Durán acudieron al sitio para recolectar muestras, prepararon las muestras de acuerdo a la NOM-021-RECNAT 2000, AS-01 trasladaron la muestra al laboratorio evitando humedad, luz, etc. Lo llevaron a recepción y registro revisando datos correctos, posteriormente se realizó un acondicionamiento y preparación de las muestras: secado, molienda y tamizado para así realizar los análisis necesarios. La tabla 11 nos muestra las determinaciones que fueron utilizadas.

**Tabla 11.** *Análisis realizados para determinar propiedades físicas y químicas en Flor del Bosque.* (Durán, 2011; Mikal, 2010).

Propiedades físicas	Determinaciones utilizadas
%Arena	
%Limo	Análisis granulométrico, método AS-09
%Arcilla	Bouyoucos
Propiedades químicas	Determinaciones utilizadas
Materia orgánica	Método AS-07 de Walkley y Black
Conductividad eléctrica (SALINIDAD)	Método AS-18

Los resultados desarrollados en un laboratorio con revisiones y aprobación de estos se muestran en la tabla 12, son un extenso conjunto de datos de laboratorio, consta de ocho coordenadas (puntos) a diferentes profundidades con un total de 29 muestras, los datos de las muestras contienen porcentajes de arena, arcilla, materia orgánica y salinidad (C. E.) que son las variables principales que afectan el movimiento y destitución del agua en el suelo y que utilizaremos como datos de entrada al software Soil Water Characteristics.

## METODOLOGÍA

**Tabla 12.** Resultados de las propiedades físicas y químicas de las coordenadas de Flor del Bosque. (Durán, 2011; Mikal, 2010).

Ladera	Nombre de muestra	DATOS DE ENTRADA				Clase	Materia Orgánica (%)	Conductividad eléctrica (salinidad) (dS/m a 25°C)
		Arena %	Arcilla %	Textura				
				Limo %				
SUR	FBP11	33.50	21.80	44.7	Franco	11.1	0.41	
	FBP12	16.70	55.40	27.9	Arcillosa	3.1	0.51	
	FBP21	38.10	18.20	43.7	Franco	4.5	1.04	
	FBP22	53.40	25.40	21.2	Franco	4.4	0.51	
	FBP23	62.90	15.40	19.8	Franco arenoso	0.9	0.52	
	FBP24	68.10	31.80	0.10	Franco arcillo arenoso	1.5	0.26	
	FBP31	64.80	15.40	19.8	Franco arenoso	3.1	0.38	
	FBP32	25.00	38.20	36.8	Franco arcilloso	2.5	0.48	
	FBP33	19.00	34.60	46	Franco arcillo limoso	2.4	1.76	
	FBP34	27.20	34.60	38.2	Franco arcilloso	1.4	0.84	
	FBP35	25.00	8.20	66.6	Franco limoso	1.6	1.23	
	FBP41	22.50	15.40	62.1	Franco limoso	15.7	0.78	
FBP42	13.40	35.40	51.2	Franco arcillo limoso	3.9	0.35		
NORTE	FBA1	33.698	63.222	3.08	Arcillosa	20.1	2.05	
	FBA2	15.563	74.797	9.64	Arcillosa	5.6	0.86	
	FBA3	6.503	85.137	8.36	Arcillosa	0	0.68	
	FBMA1	39.893	56.467	3.64	Arcillosa	6.1	0.8	
	FBMA2	44.013	53.627	2.36	Arcillosa	5.3	0.29	
	FBMA3	28.758	68.162	3.08	Arcillosa	5.2	0.55	
	FBMA4	29.908	65.732	4.36	Arcillosa	1.2	0.28	
	FBMA5	27.108	68.532	4.36	Arcillosa	1.1	0.35	
FBMB1	32.878	64.762	2.36	Arcillosa	6	1.12		

## METODOLOGÍA

Nombre de muestra	TEXTURA			Clase	Materia Orgánica (%)	Conductividad eléctrica (salinidad) (dS/m a 25°C)
	Arena %	Arcilla %	Limo %			
FBMB2	33.993	63.807	2.2	Arcillosa	2.3	0.18
FBMB3	22.054	74.866	3.08	Arcillosa	1.8	0.27
FBMB4	30.993	64.807	4.2	Arcillosa	4.3	0.08
FBMB5	32.003	63.797	4.2	Arcillosa	1.4	0.15
FBB1	28.077	69.563	2.36	Arcillosa	20.1	1.01
FBB2	14.689	78.231	7.08	Arcillosa	4.5	0.19
FBB3	28.633	66.287	5.08	Arcillosa	2.4	0.37

### 2.4 Simulación

El programa requiere las variables de entrada para posteriormente calcular los datos de salida. Las variables de entrada son el contenido (% gravimétrico) de arena (Sand) y arcilla (Clay) en los ejes del triángulo textural.

La selección de texturas en el triángulo del software se introduce a lo largo del triángulo o el puntero y nos dará estimaciones sobre el contenido de agua del suelo (humedad), potencial osmótico, potencial mátrico (tensión) y la conductividad. Las estimaciones de textura cambian por una de las cuatro variables seleccionadas en las barras deslizantes: materia orgánica, salinidad, grava y densidad (compactación).

Las unidades de los valores de salida se pueden cambiar de acuerdo al sistema inglés o métrico en el menú opciones. El gráfico debajo del triángulo de textura nos muestra los resultados para los valores dados en las opciones de entrada (Humedad-

## METODOLOGÍA

Tensión-Conductividad). En la figura 14 se puede observar donde podemos encontrar las variables requeridas por el programa.

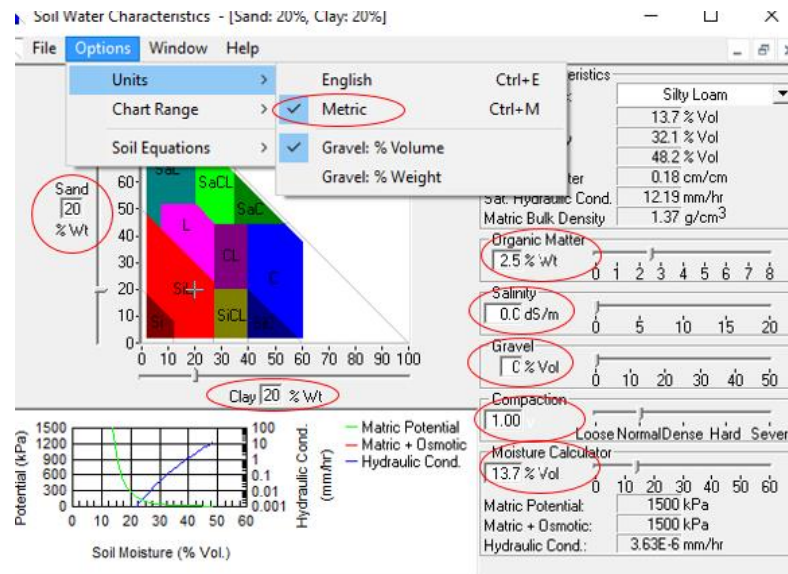


Figura 14. Interfaz Gráfica del programa.

Utilizando los datos obtenidos de los análisis físicos y químicos de las tesis antes mencionadas se realizó la simulación con el programa Soil Water Characteristics, los valores de salida están en unidades métrico y % en volumen, se insertaron datos de arena y arcilla que son datos que tienen un efecto dominante en el agua del suelo, también se incluye en el programa variables como materia orgánica, compactación, grava y salinidad, sin embargo, no disponemos de datos de compactación y grava, pero incluimos materia orgánica y salinidad para formar un pronóstico integral.

Cabe mencionar que en algunas determinaciones tenemos más del 60% de arcilla y 8% de materia orgánica, pero no puede simularse más allá de estos valores, dado que las ecuaciones utilizadas para elaborar este software abarcan los datos analizados en

## METODOLOGÍA

este rango. Para todas las determinaciones se introducen los porcentajes de arena (sand), arcilla (clay), materia orgánica (organic matter) y salinidad (salinity) como se muestra en la figura 15, ejemplo de la determinación 1.

33% de arena, 21% de arcilla, 11% de materia orgánica y 0.4 de salinidad.

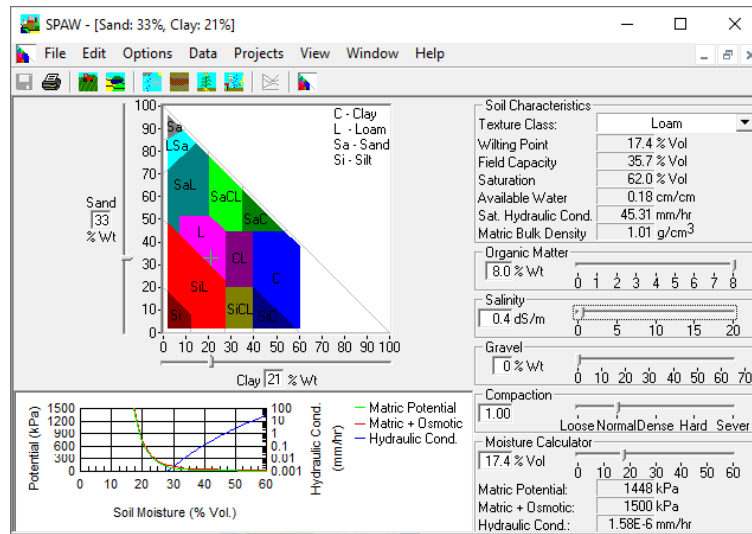


Figura 15. Simulación del punto FBP11.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

### 3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los resultados obtenidos después de la simulación se pueden observar en la tabla 13.

El software simula los valores de agua disponible en cm/cm, los cuales se convirtieron a porcentaje y finalmente con los datos de la simulación se realizaron las gráficas.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

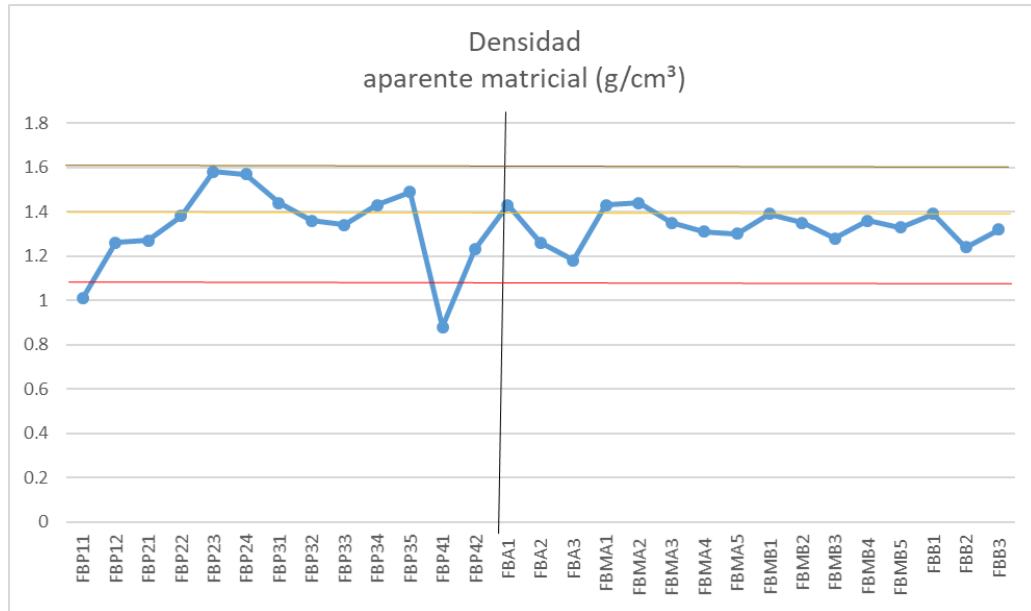
Tabla 13. Resultados de la simulación determinadas por el software Soil Water Characteristics.

DATOS DE SALIDA										
Nombre de la muestra	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (%)	Saturación (%)	Agua disponible %	Conductividad hidráulica saturada (cm/h)	Densidad aparente matricial (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad %	Potencial mátrico kPa	Potencial osmótico + mátrico kPa	Conductividad hidráulica mm/h
FBP11	17.4	35.7	62	18	45.3	1.01	17.4	1448	1500	1.58E-06
FBP12	32.2	43.6	52.5	11	1.65	1.26	32.2	1470	1500	1.83E-06
FBP21	14.1	29.9	51.9	16	27.91	1.27	14.1	1368	1500	1.41E-06
FBP22	17.8	29.9	48	12	14.62	1.38	17.8	1450	1500	3.87E-07
FBP23	9.6	19	40.5	9	25.22	1.58	13.8	203	258	5.59E-06
FBP24	18.9	27.4	40.7	8	5.51	1.57	19.5	1074	1094	1.83E-07
FBP31	11.5	21.5	45.7	10	34.55	1.44	13.8	487	532	4.97E-07
FBP32	23.4	37.5	48.8	14	3.66	1.36	23.4	1464	1500	3.04E-06
FBP33	21.4	36.7	49.3	15	5.19	1.34	21.4	1359	1500	4.49E-06
FBP34	21	35.2	46.2	14	3.45	1.43	21.2	1321	1384	4.13E-06
FBP35	7.1	25.7	43.6	19	20.37	1.49	13.7	195	336	9.68E-04
FBP41	14.5	36.8	67	22	71.83	0.88	14.5	1371	1500	3.54E-06
FBP42	22	38.3	53.5	16	8.82	1.23	22	1469	1500	3.42E-06
FBA1	35.5	43.6	46	8	0.03	1.43	35.5	1404	1500	1.21E-06
FBA2	34.5	43.2	52.5	9	1.79	1.26	38.8	1253	1300	5.32E-07
FBA3	35	47	55.4	12	1.39	1.18	35	1461	1500	2.61E-06

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Nombre de la muestra	Punto de marchitez (%)	Capacidad de campo (%)	Saturación (%)	Agua disponible %	Conductividad hidráulica saturada (cm/h)	Densidad aparente matricial (g/cm <sup>3</sup> )	Humedad %	Potencial mátrico kPa	Potencial osmótico + mátrico kPa	Conductividad hidráulica mm/h
FBMA1	33.8	43.8	46.2	10	0.04	1.43	33.8	1461	1500	1.50E-06
FBMA2	32.4	43	45.6	11	0.04	1.44	32.4	1485	1500	1.66E-06
FBMA3	35.2	44.6	48.9	9	0.19	1.35	35.3	1419	1446	2.06E-06
FBMA4	35.4	47	50.6	12	0.11	1.31	35.4	1486	1500	2.75E-06
FBMA5	35.3	47	51.1	12	0.16	1.3	35.3	1482	1500	3.04E-06
FBMB1	35.4	44.5	47.4	9	0.06	1.39	35.4	1445	1499	1.60E-06
FBMB2	35.5	46.6	49.2	11	0.04	1.35	35.5	1491	1500	1.77E-06
FBMB3	35.1	46.3	51.8	11	0.4	1.28	35.1	1486	1500	2.84E-06
FBMB4	35.3	45.3	48.8	10	0.1	1.36	35.3	1461	1465	2.13E-06
FBMB5	35.4	47.1	49.9	12	0.06	1.33	35.4	1493	1500	2.12E-06
FBB1	35.1	43	47.7	8	0.23	1.39	35.3	1312	1361	1.33E-06
FBB2	34.6	43.9	53	9	1.69	1.24	34.8	1338	1348	7.65E-07
FBB3	35.3	46.3	50.2	11	0.15	1.32	35.3	1481	1500	2.65E-06

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN



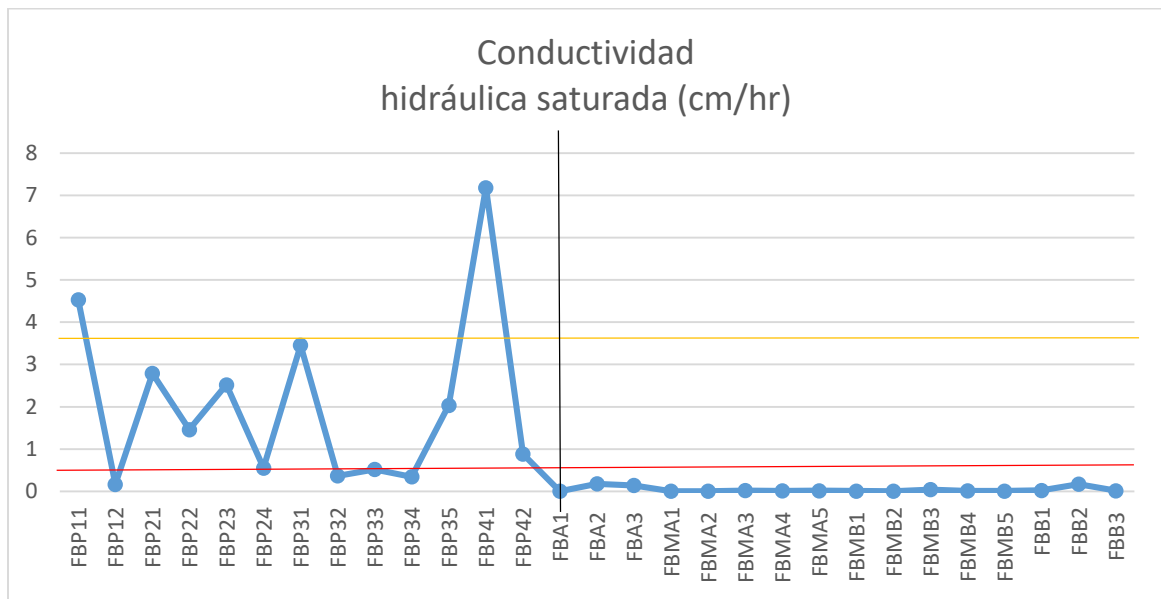
**Gráfica 1.** Densidad Aparente Matricial.

Conforme a la gráfica 1 de densidad aparente:

Ladera sur: De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 las muestras superficiales se encontraron cantidades altas a muy altas, 3.6% a mayores del 6% de materia orgánica y a mayor profundidad la materia orgánica tuvo valores de medio a bajo de 3.5% a 0.6% ya que los suelos con alto contenido de materia orgánica tienden a tener densidades aparentes bajas y tiende a aumentar con la profundidad de los suelos y en esta zona la profundidad a la que se tomaron las muestras fue mayor en un rango de 0 a 130 cm. Así mismo se encuentra una clase de textura promedio de franco limoso a franco arcilloso limoso, se encuentra en un rango de densidad aparente de  $0.88 \text{ g/cm}^3$  a  $1.58 \text{ g/cm}^3$ , según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) valores menores de  $1.40 \text{ g/cm}^3$  a  $1.55 \text{ g/cm}^3$  es una densidad ideal para el crecimiento de las plantas y en menor proporción una densidad aparente que afecta el crecimiento de las plantas.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Ladera norte: De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 las muestras superficiales se encontraron cantidades muy altas, mayores del 6% de materia orgánica y a mayor profundidad la materia orgánica tuvo valores altos a bajos de 6% a 1.5%, esta zona tuvo mayor contenido de materia orgánica respecto a la ladera sur ya que la profundidad a la que se tomaron las muestras fue menor en un rango de 0 a 51 cm. En esta zona la clase textural es arcillosa y su densidad aparente se encuentra en el rango de 1.18 g/cm<sup>3</sup> a 1.44 g/cm<sup>3</sup>, pasando el rango ideal menor a 1.10 g/cm<sup>3</sup> según el USDA, encontrándose en el rango de densidad aparente alta que afecta el crecimiento de las plantas a donde se restringe la raíz del crecimiento a una profundidad baja.



**Gráfica 2.** Conductividad Hidráulica Saturada.

Los valores fueron convertidos de mm/h a cm/h.

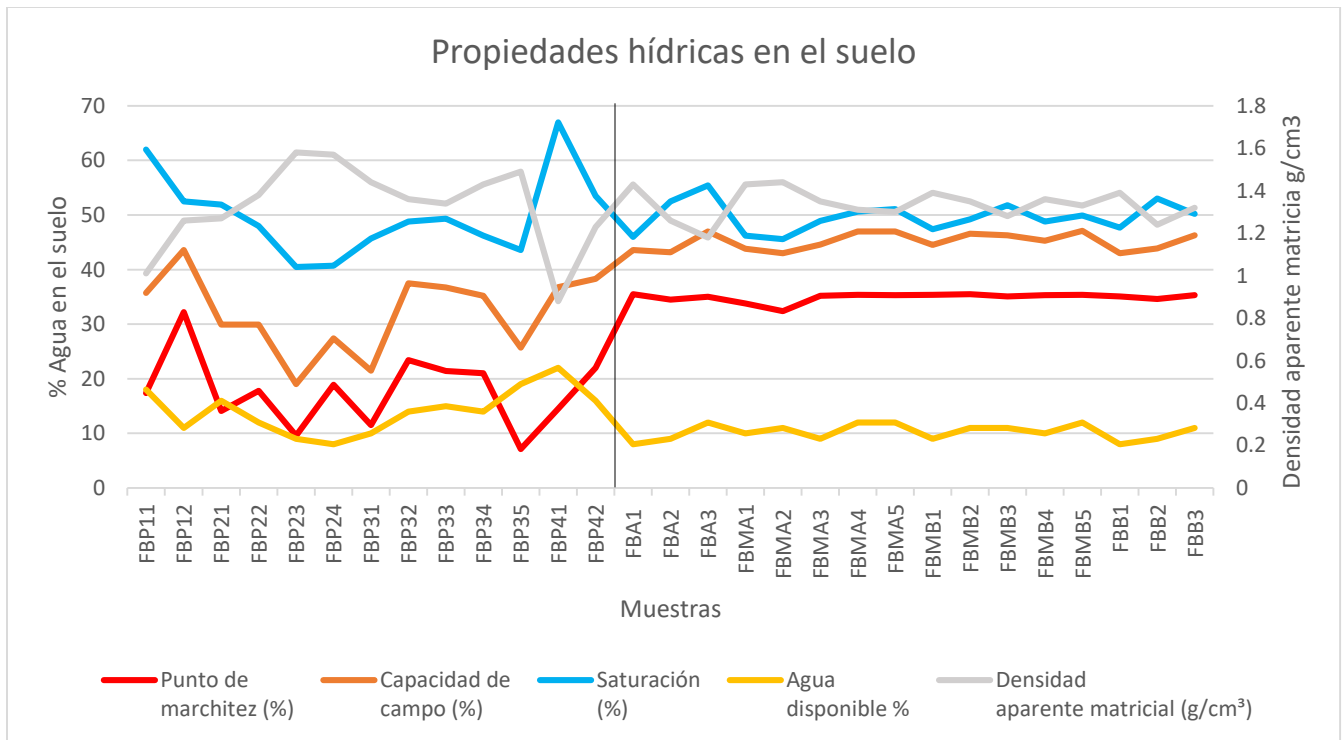
En la gráfica 2 se observa que existen dos líneas horizontales, de acuerdo a la tabla 2 “Rangos de conductividad hidráulica según el USDA”, por debajo de la línea roja valores de 0.0036 cm/h a 0.036 cm/h corresponde a conductividades bajas, por debajo

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

de la línea amarilla valores entre 0.360 cm/h a 3.60 cm/h corresponde a conductividades moderadamente altas y por encima de la línea amarilla valores entre 3.6 cm/h a 36 cm/h la conductividad es alta.

Ladera sur: la mayoría de los resultados de conductividad hidráulica se encuentran en el rango 0.360 cm/h a 3.60 cm/h corresponden a conductividades moderadamente alta lo cual determina que la velocidad del movimiento del agua es óptima.

Ladera norte: todos los resultados están en un rango de 3.6 cm/h a 36 cm/h que corresponden a conductividades bajas, la velocidad del movimiento del agua en esta zona es baja.



**Gráfica 3.** Propiedades Hídricas del Suelo.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En la gráfica 3 se observan dos comportamientos diferentes que corresponden a dos zonas de la Reserva, identificados en el mapa como ladera norte y ladera sur, la ladera norte tiene un comportamiento homogéneo y la ladera sur heterogéneo. En la tabla 14 se muestran los rangos de valores para las categorías de clasificación de retención de humedad.

**Tabla 14.** *Categorías para la clasificación de Retención de Humedad, C.C Capacidad de Campo; P.M.P Punto de Marchitamiento Permanente; D.A Disponibilidad de Agua. (Or, Wraith, Robinson & Jones, 2011 citado en Lince, 2021).*

Clase	C.C (%volumen)	P.M.P (%volumen)	D.A(%)
Baja	<20	<8	<12
Media	≥20<33	≥8<18	≥12<15
Alta	≥33	≥18	≥15

En la tabla 15 se resumen los resultados de los rangos de las propiedades hídricas del suelo de la tabla 13 de las laderas sur y norte.

**Tabla 15.** *Rangos de Resultados de las Propiedades Hídricas del Suelo.*

	SUR	NORTE
Textura	Franco, Arcilloso, Franco arenoso, Franco arcillo arenoso, Franco arcillo limoso y Franco limoso	Arcilloso
% Saturación	40% a 70%	45% a 53%
C. C.	19% a 43%	43% a 48%
D.A	8% a 22%	8% a 12%
P.M.P	7% a 32%	34% a 36%

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En la ladera sur se observa que el porcentaje de saturación de las muestras es variable debido a las diferentes texturas que se encuentran, disminuye a mayor profundidad ya que las muestras superficiales tienen el primer contacto con la lluvia o riego. La materia orgánica es mayor en muestras superficiales que en muestras profundas, por lo que el agua disponible disminuye a medida que la profundidad va aumentando gradualmente. La capacidad de campo según la tabla 14 (Lince, 2021) presenta un valor medio alto entre 20% y mayor a 33% gracias a propiedades como la textura, densidad aparente y M. O., en el suelo permite que el agua esté lo suficientemente disponible para las plantas ubicándose en un rango de bajo, medio y alto menor a 12% y mayor al 15% de acuerdo a la tabla 14. El P. M. P., es variable hallándose en un rango medio 8% a 18% según la tabla 14. La conductividad hidráulica es moderadamente alta en esta ladera por lo que la velocidad del flujo de agua es mayor sin llegar al punto de marchitamiento de forma inmediata.

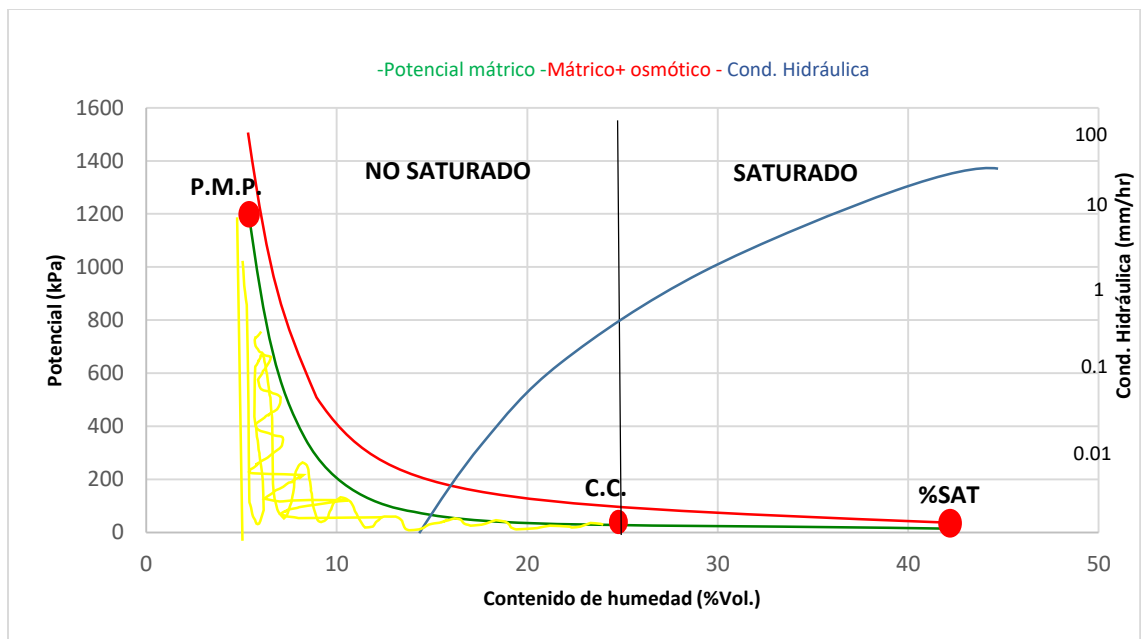
La ladera norte presentó un porcentaje de saturación el cual se mantuvo continuo esto debido al único tipo de textura que presentó (arcillosa). La C.C es alta, mayor al 33% según (Lince, 2021) de la tabla 14 debido a que la C.C aumenta con texturas finas al tener mayores poros pequeños que retienen el agua contra el libre drenaje, la M.O en esta zona fue alta por lo que junto a las arcillas tienen mayor capacidad de retención de agua. La disponibilidad de agua se encuentra en un rango bajo, menor al 12%, la densidad es alta, esta compactación reduce el almacenamiento de agua disponible ya que la compactación aplasta los poros del suelo de modo que los microporos se encuentran apretados. En esta ladera la conductividad hidráulica fue baja así que la velocidad del flujo de agua es deficiente, provocando que el agua disponible baje

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

considerablemente llegando al punto de marchitamiento rápidamente. El P. M. P., se encuentra alta, valores mayores al 18%.

“Los espacios porosos actúan como barreras para el flujo de agua provocando que este siga caminos tortuosos a lo largo de las capas y que el flujo de agua disminuya al disminuir la D. A.; debido a que el agua inicialmente no fluye hacia el material grueso sino hasta que el material fino esté saturado y haya canales de flujo se moverá a capas gruesas” (Schaetzl & Anderson, 2005).

A continuación, tenemos gráficas donde se muestran los resultados del potencial matricial, conductividad hidráulica y la relación entre el potencial mátrico + osmótico (véase anexo 1).



**Gráfica 4.** Ejemplo de Curva Tensión- Humedad para la muestra FBP35. Ladera Sur.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Tomamos como ejemplo la gráfica de la muestra FBP35 de la ladera sur, donde se observa que los valores del P. M. P. y % SAT son uniformes al comportamiento de las gráficas, el potencial mátrico está en función de estas, por ejemplo, el valor para % de SAT= 43 donde inicia la gráfica del potencial matricial y potencial osmótico y termina en el valor del P. M. P. (estimada a una presión -1500 kPa) es de 7, al tener estos valores podemos ubicar dentro de la gráfica el valor del punto a C. C. = 25, el agua retenida entre la C. C. y P. M. P puede ser usada por la vegetación para transpiración y es llamada agua disponible o agua útil, que está indicado con color amarillo, por lo tanto nos proporciona información de cambios en la estructura del suelo y la energía para extraer agua en este punto.

Se observa dos tipos de condiciones saturado o no saturado, cuando un suelo es recientemente mojado será un suelo saturado ya que los poros están completamente llenos de agua este flujo de agua depende de la porosidad, el flujo se moverá más rápido cuando los poros sean más grandes y haya buena porosidad a esta velocidad a la que el flujo de agua se mueve es llamada conductividad hidráulica, a mayor conductividad mayor es la energía que posee dado que no requiere de mayor esfuerzo para que el agua pueda moverse. En la gráfica 4 se observa que la línea de conductividad comienza desde el % de SAT y disminuye a medida que disminuye el contenido de agua llegando al agua que no puede ser utilizable para las plantas (agua higroscópica) donde las raíces no tienen la suficiente energía para extraer esta agua.

La textura del ejemplo de la gráfica 4 es franco limosa, según la tabla 2 de la USDA un suelo franco limoso tiene una conductividad moderadamente alta (valores de entre 0.360 - 3.6 cm/h), el valor que tenemos de acuerdo a los valores del programa nos

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

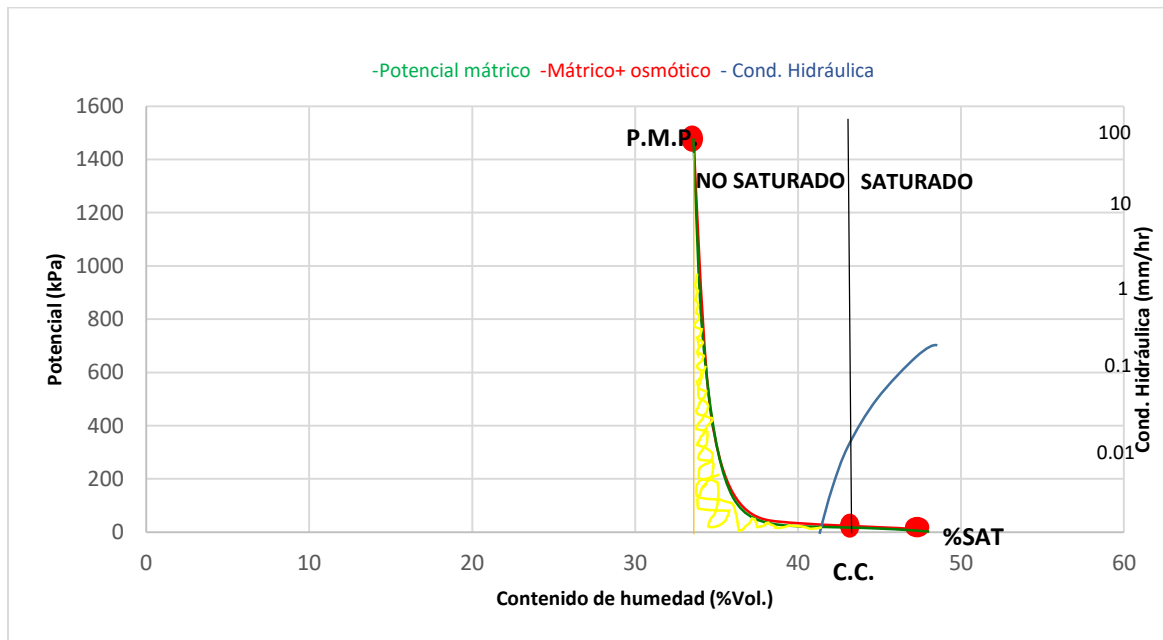
indican que tenemos un valor de  $20 \text{ mm/h} = 2.037 \text{ cm/h}$  que se encuentra dentro de ese rango, se observa una línea más larga al tener buena porosidad debido a la mezcla de texturas, por lo tanto tendrá valores altos de conductividad hidráulica entonces en el punto donde los poros del suelo están saturados la velocidad del movimiento del agua es mayor, mientras pasa el tiempo esta agua se drena por efecto de la gravedad y llega al punto donde el suelo está totalmente mojado, el potencial hídrico tiene un valor de cero este punto es llamado capacidad de campo C. C., donde el suelo tiene la capacidad de retener esta agua a partir de aquí va a ser una zona no saturada.

Al llegar a la C. C. el potencial matricial aumenta y el potencial hídrico disminuye estos se vuelven negativos, los valores negativos reflejan que fuerzas matriciales que mantienen el agua en el suelo mientras se seca, aquí el agua se mueve de mayor a menor potencial, en estas condiciones los poros llenos de agua son accesibles, pero el aire actúa como barrera provocando que el flujo de agua disminuya.

Podemos apreciar que la línea del potencial mátrico + osmótico es más visible en las gráficas donde el valor de la salinidad es notorio véase anexo 1 (FBP21, FBP33, FBP35, FBP35) ya que la salinidad incrementa el potencial osmótico, el potencial osmótico sumado al potencial mátrico incrementa la energía requerida para la absorción de agua y reduce el agua útil para las plantas. Por lo tanto, al tener una ligera salinidad, las plantas tienen que usar más energía para absorber esta agua en la zona no saturada por lo cual no llega al punto de marchitamiento rápidamente, en la zona saturada puede disminuir su velocidad sin embargo al tener una mezcla de texturas (arena, limo y arcilla) la velocidad no disminuye mucho teniendo una buena circulación de agua.

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Las gráficas de la ladera sur se comportan de una manera más suave pues los suelos francos tienen curvas de retención menos pronunciadas y más largas debido a la mezcla equilibrada de texturas tienen un buen drenaje y mayor D. A., disminuyendo el potencial mátrico provocando que cuando el contenido de humedad disminuye no llega de manera inmediata al P.M. P.



**Gráfica 5.** Ejemplo de Curva Tensión- Humedad para la muestra FBMA3. Ladera Norte.

Las gráficas de la ladera norte (véase anexo 1) fueron más pronunciadas y cortas ver ejemplo de la gráfica 5, debido al tamaño de los poros (presencia de granos finos), lo que apunta a que en estas zonas hay mayor humedad por la retención del agua en las partículas de arcilla, sin embargo, alcanzan el P. M. P., de manera inmediata al disminuir un poco la humedad pues la D. A., es poca por lo cual el potencial mátrico aumenta.

## CONCLUSIONES

### 4. CONCLUSIONES

1. Las propiedades del suelo utilizadas para la simulación son textura, materia orgánica y salinidad.
2. De lo expuesto, podemos concluir que las propiedades del suelo que determinan su capacidad de retención y movilidad son:
  - a) Ladera Sur
    - Textura: predomina las clases texturales franco limosa y franco arcillo limosa.
    - Materia orgánica: De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 las muestras superficiales presentan cantidades altas (mayores a 3.6%) y a mayor profundidad la materia orgánica tiene rangos de medio a bajo (3.5% a 0.6%) ya que en esta zona la profundidad a la que se tomaron las muestras fue mayor, en un rango de 0 a 130 cm.
    - Salinidad: conforme a la NOM-021-RECNAT-2000, los valores son menores a  $2 \text{ dS}^{-1}$ , clasificados como ligeramente salino.
    - De acuerdo a lo establecido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) la densidad aparente ideal para el crecimiento de las plantas en un suelo franco limoso debe ser menor a  $1.4 \text{ g/cm}^3$ . Esta ladera presenta valores entre  $0.88 \text{ g/cm}^3$  y  $1.58 \text{ g/cm}^3$ , se concluye que esta propiedad se encuentra en un rango ideal.
    - Conductividad hidráulica presenta valores de 0.360 a 3.60 cm/h, que de acuerdo al USDA la zona se catalogaría como moderadamente alta.

## CONCLUSIONES

### a) Ladera Norte

- Textura: la clase textural que presenta esta ladera es arcillosa.
  - Materia Orgánica: de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 en las muestras superficiales se encontraron cantidades muy altas, mayores del 6% de materia orgánica y a mayor profundidad la materia orgánica tuvo valores altos a bajos de (6% a 1.5%), esta zona tuvo mayor contenido de materia orgánica respecto a la ladera sur ya que la profundidad a la que se tomaron las muestras fue menor en un rango de 0 a 51 cm.
  - Salinidad: Conforme a la NOM-021-RECNAT-2000, los valores fueron menores a  $1 \text{ ds}^{-1}$  los cuales tienen efectos despreciables de salinidad.
  - Según el USDA la densidad ideal para el crecimiento de las plantas en un suelo arcilloso debe ser menor a  $1.10 \text{ g/cm}^3$ , el rango de esta ladera es de  $1.18 \text{ g/cm}^3$  a  $1.44 \text{ g/cm}^3$  concluyendo que esta densidad afecta el crecimiento de las raíces de las plantas.
  - Conductividad hidráulica presenta valores de 0.0036 a 0.036 cm/h, de acuerdo al USDA esta zona se cataloga como baja.
3. La importancia del movimiento del agua en el suelo influye en el crecimiento de las plantas, observándose dos comportamientos en la reserva.

La capacidad de campo según (Lince, 2021) presenta un valor medio alto entre 20% y mayor a 33% gracias a propiedades como la textura, densidad aparente y M. O., en el suelo permite que el agua esté lo suficientemente disponible para las plantas ubicándose la disponibilidad de agua en un rango de bajo, medio y alto menor a 12% y mayor al 15%. El P. M. P., es variable hallándose en un rango medio 8% a 18%. Los

## CONCLUSIONES

resultados obtenidos permiten concluir que la ladera sur tiene un comportamiento heterogéneo, propiedades como % de saturación, materia orgánica, agua disponible, densidad aparente y conductividad hidráulica disminuyen a mayor profundidad, el tipo de textura en las muestras que se tomó a lo largo de 0 a 130cm variaron en cada toma, en muestras superficiales 0 a 25 cm del perfil del suelo presentan variación de texturas francas, franco arenoso y franco limoso, a mayor profundidad se encontraron muestras arcillosas y limosas, por lo que la textura desempeña un papel importante en la capacidad de almacenamiento de agua, describiéndose a mayor perfil del suelo el movimiento de agua disminuye con una velocidad del flujo de agua optima 0.360 a 3.60 cm/h sin llegar al punto de marchitamiento de forma inmediata.

De acuerdo a los resultados la ladera norte presento un comportamiento homogéneo presentando texturas arcillosas en el perfil del suelo 0 - 51 cm. El porcentaje de saturación se mantuvo continuo. La densidad es alta, haciendo compacta esta zona, esta compactación reduce el almacenamiento de agua disponible ya que la compactación aplasta los poros del suelo de modo que los microporos se encuentran apretados, la C.C y el P.M.P aumentaron al tener mayores poros pequeños que retienen el agua contra el libre drenaje, junto a la M.O tienen mayor capacidad de retención de agua todas estas propiedades provocan que la velocidad del flujo de movimiento de agua en esta zona sea deficiente 0.0036 a 0.036 cm/h llegando al punto de marchitamiento rápidamente.

## REFERENCIAS

### 5. REFERENCIAS

Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas. (8 de mayo de 2023). *Areas Naturales Protegidas*. Gob.mx. Consultado el 14 de noviembre de 2023. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226>

Díaz, R., Bravo, L., Alatorre, L., & Sánchez, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *ScienceDirect*, 93-103. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461113727882>

Durán, A. (Febrero de 2011). Caracterización Físicoquímica de una ladera norte bien conservada en el parque Estatal Flor del Bosque, Puebla. *Tesis Licenciatura*. Puebla, Puebla, México: Universidad Autónoma de Puebla. Consultado el 29 de mayo de 2023

Espinoza, A. (2018). *DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO MEDIANTE EL USO DE RIEGO MEDIANTE EL USO DE TENSÍMETROS EN EL CULTIVO DE NABO, BAJO INVERNADERO [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Machala]*. Repositorio institucional. Consultado el 3 de octubre de 2023, de [http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12428/1/DE00014\\_TRABAJO\\_DE\\_TITULACION.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12428/1/DE00014_TRABAJO_DE_TITULACION.pdf)

FAO. (8 de diciembre de 2013). *Portal de suelos de la FAO*. Propiedades Físicas. Consultado el 20 de mayo de 2023. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

FAO. (8 de diciembre de 2013). *Propiedades Físicas del Suelo*. Portal de Suelos de la FAO. Consultado el 16 de junio de 2023. <https://www.fao.org/soils-portal/soil->

## REFERENCIAS

- survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/#:~:text=El%20punto%20Capacidad%20de%20Campo,de%20Marchitez%20Permanente%20(PMP).
- FAO. (24 de noviembre de 2016). *Diversas propiedades del suelo*. FAO. org. Consultado el 25 de agosto de 2023. [https://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s10.htm](https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s10.htm)
- FAO. (2023). *Definiciones clave*. Portal de Suelos de la FAO. Consultado el 11 de junio de 2023. [https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/#:~:text=El%20suelo%20es%20el%20producto,\(rocas%20y%20minerales%20originarios\).&text=El%20suelo%20es%20un%20componente,Tierra%22%20y%20%22Ecosistemas%22](https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/#:~:text=El%20suelo%20es%20el%20producto,(rocas%20y%20minerales%20originarios).&text=El%20suelo%20es%20un%20componente,Tierra%22%20y%20%22Ecosistemas%22).
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. Geología UNAM. Consultado el 9 de septiembre de 2023. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>
- Gisbet, J., Ibáñez, S., & Moreno, H. (Enero de 2010). La textura de un suelo. *Universidad Politecnica de Valencia*, 3-7. Consultado el 22 de julio de 2023. [https://www.researchgate.net/publication/50839531\\_La\\_textura\\_del\\_suelo](https://www.researchgate.net/publication/50839531_La_textura_del_suelo)
- Gobierno del Estado de Puebla. (15 de julio de 2022). *Periódico Oficial*. Recuperado el 13 de noviembre de 2023, de Sistema de Información Territorial del Estado de Puebla: <https://dduia.puebla.gob.mx/SITEP/apartados/anapro.html>

## REFERENCIAS

- Hernández, A., Bojórquez, J., Morell, F., & Cabrera, A. (2010). *Fundamentos de la estructura de los suelos tropicales*. Tepic, Nayarit, México: Universidad Autónoma de Nayarit, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Consultado el 7 de julio de 2023, de [https://www.google.com.mx/books/edition/Fundamentos\\_de\\_la\\_estructura\\_de\\_suelos\\_t/UZE6\\_MK79eoC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Nayarit,+Instituto+Nacional+de+Ciencias+Agr%C3%ADcolas+Fundamentos+de+la+estructura+de+los+suelos+tropicales&pg=](https://www.google.com.mx/books/edition/Fundamentos_de_la_estructura_de_suelos_t/UZE6_MK79eoC?hl=es-419&gbpv=1&dq=Universidad+Aut%C3%B3noma+de+Nayarit,+Instituto+Nacional+de+Ciencias+Agr%C3%ADcolas+Fundamentos+de+la+estructura+de+los+suelos+tropicales&pg=)
- Julca , A. (abril de 2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de uso en la agricultura. *Scielo*, 24(1), 49-61. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34292006000100009](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292006000100009)
- Lambers, H., Chapin, F., & Pons, T. (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer Science Business Media. doi:doi:10.1007/978-0-387-78341-3
- Lorenz, G. (2015). Soil science in the 21st century: connecting system, functions and planning. *Quebracho Revista de Ciencias Forestales*, 105-116. <https://www.redalyc.org/journal/481/48163489005/>
- Mikal, M. (2010). Evaluación de la fertilidad de una ladera sur de la reserva Parque Estatal Flor del Bosque Puebla. *Tesis Licenciatura*. Puebla, Puebla, México: Universidad Autónoma de Puebla. Recuperado el 30 de mayo de 2023

## REFERENCIAS

MINISTERIO DE AGRICULTURA. (2004). *La Salinidad de los Suelos y sus efectos en la Agricultura*. Provincia de Guayas, Ecuador: PROMSA. Consultado el 15 de octubre de 2023, de [https://books.google.com.mx/books?id=pbEzAQAAMAAJ&newbks=0&printsec=frontcover&pg=PP1&dq=La+Salinidad+de+los+Suelos+y+sus+efectos+en+la+Agricultura+MINISTERIO+DE+AGRICULTURA&hl=es-419&source=newbks\\_fb&redir\\_esc=y#v=onepage&q=La%20Salinidad%20de%20los%20Su](https://books.google.com.mx/books?id=pbEzAQAAMAAJ&newbks=0&printsec=frontcover&pg=PP1&dq=La+Salinidad+de+los+Suelos+y+sus+efectos+en+la+Agricultura+MINISTERIO+DE+AGRICULTURA&hl=es-419&source=newbks_fb&redir_esc=y#v=onepage&q=La%20Salinidad%20de%20los%20Su)

*Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000*. (31 de diciembre de 2002). Obtenido de Biblioteca Semarnat: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>

Ordoñez , J. (2011). *Global Water Partnership*. Balance hídrico superficial. Consultado el 18 de noviembre de 2023, [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/balance\\_hidrico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf)

Organismo Operador Municipal de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. (30 de agosto de 2020). *Ciclo hidrológico*. OROMAPAS BAHÍA DE BANDERAS. Consultado el 30 de septiembre de 2023. <https://www.oromapas.gob.mx/cultura-del-agua/ciclo-hidrologico/#:~:text=El%20ciclo%20hidrol%C3%B3gico%20o%20ciclo,o%20cambia%20de%20estado%20f%C3%ADsico>.

## REFERENCIAS

Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils genesis and geomorphology*. Cambridge University Press. Consultado el 1 de mayo de 2023

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. (11 de Diciembre de 2003).

*Métodos de muestreo y prueba de materiales*. Clasificación de fragmentos de roca y suelos. Consultado el 28 de septiembre de 2023.  
<https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-02-03.pdf>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (27 de Junio de 2018). *¿Qué son las cuencas hidrológicas y las reservas de agua?* Consultado el 18 de noviembre de 2023. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-son-las-cuencas-hidrologicas-y-las-reservas-de-agua>

Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial. (Diciembre de 2020). *Estudio Técnico Justificativo para el Establecimiento del Área Natural Protegida Flor del Bosque*. Gobierno de Puebla. Recuperado el 11 de octubre de 2023. [https://smadsot.puebla.gob.mx/images/ETJ-FLOR\\_del\\_Bosque.pdf](https://smadsot.puebla.gob.mx/images/ETJ-FLOR_del_Bosque.pdf)

Siebe, C. (31 de diciembre de 2021). *Indispensable, el cuidado de los suelos para conservar ecosistemas y cultivos*. Boletín UNAM. Recuperado el 15 de abril de 2023. [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021\\_1111.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_1111.html)

Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (22 de Julio de 2019). *Informe del Medio Ambiente*. SEMARNAT.gob.mx. Consultado el 4 de noviembre de 2023.  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap3.html>

## REFERENCIAS

Software Científico. (7 de agosto de 2020). *Voxler V4*. Software Científico. Consultado el 26 de junio de 2023. <https://www.softwarecientifico.com/voxler-v4/>

Universidad de San Carlos de Guatemala. (14 de julio de 2020). *Relaciones Hidricas - Conceptos básicos de la hidrológica*. Studocu. Recuperado el 5 de octubre de 2023. <https://www.studocu.com/gt/document/universidad-de-san-carlos-de-guatemala/hidrologia/relaciones-hidricas-conceptos-basicos-de-la-hidrologia/32298378>

USDA. (30 de marzo de 2016). *Clasificación Hidrológica de los Suelos según USDA*. Consultado el 26 de agosto de 2023, de [https://repositorio.credia.hn/bitstream/handle/123456789/232/clasificacion\\_hidrologica\\_de\\_los\\_suelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.credia.hn/bitstream/handle/123456789/232/clasificacion_hidrologica_de_los_suelos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

USDA. (12 de Noviembre de 2022). *Soil Facts*. Natural Resources Conservation U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Consultado el 28 de mayo de 2023. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/soil-facts>

Vázquez, G. (septiembre de 2015). *Introducción y Tutorial en español al programa "Soil Water Characteristics" Hydraulic Properties Calculator ( Saxton y Rawls) para estudiantes de la Maestría de Cuencas Hidrográficas de la Univ Nac de La Plata*. ResearchGate. Consultado el 10 de junio de 2023, de [https://www.researchgate.net/publication/282119926\\_Introduccion\\_y\\_Tutorial\\_en\\_espanol\\_al\\_programa\\_Soil\\_Water\\_Characteristics\\_Hydraulic\\_Properties\\_Calculator\\_Saxton\\_y\\_Rawls\\_para\\_estudiantes\\_de\\_la\\_Maestria\\_de\\_Cuencas\\_Hidrograficas\\_de\\_la\\_Univ\\_Nac\\_de\\_La\\_P](https://www.researchgate.net/publication/282119926_Introduccion_y_Tutorial_en_espanol_al_programa_Soil_Water_Characteristics_Hydraulic_Properties_Calculator_Saxton_y_Rawls_para_estudiantes_de_la_Maestria_de_Cuencas_Hidrograficas_de_la_Univ_Nac_de_La_P)

## REFERENCIAS

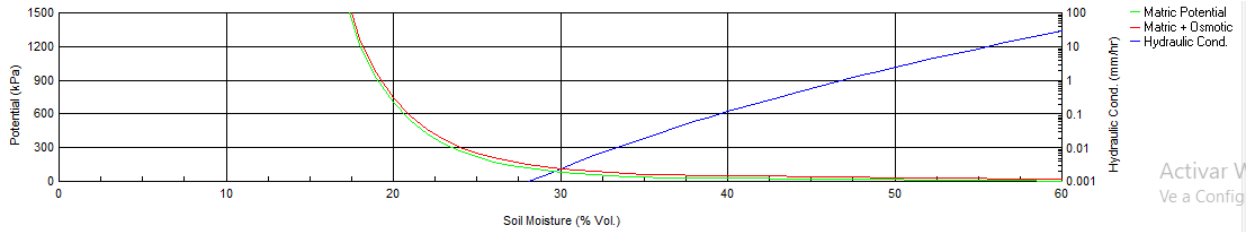
Villón, M. (2004). *Hidrología*. Costa Rica. Tecnologica de Costa Rica. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de <https://www.google.com.mx/books/edition/Hidrolog%C3%ADa/-JjGDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=Hidrolog%C3%ADa+Vill%C3%B3n,+M%C3%A1ximo&pg=PA470&printsec=frontcover>

# ANEXO

## 6. ANEXO 1

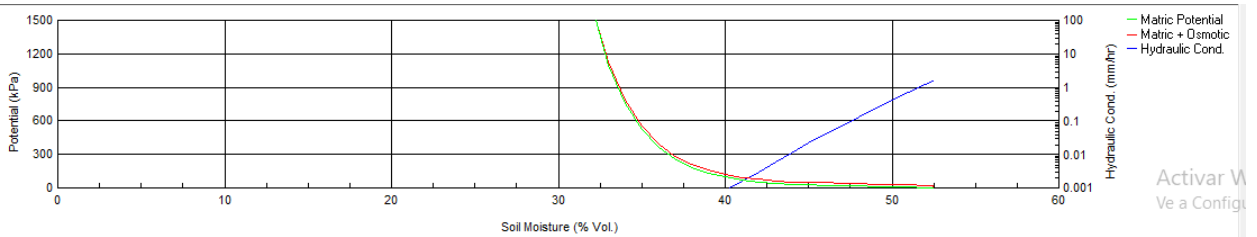
Graficas de los resultados de las propiedades hidrológicas para las muestras.

FBP11



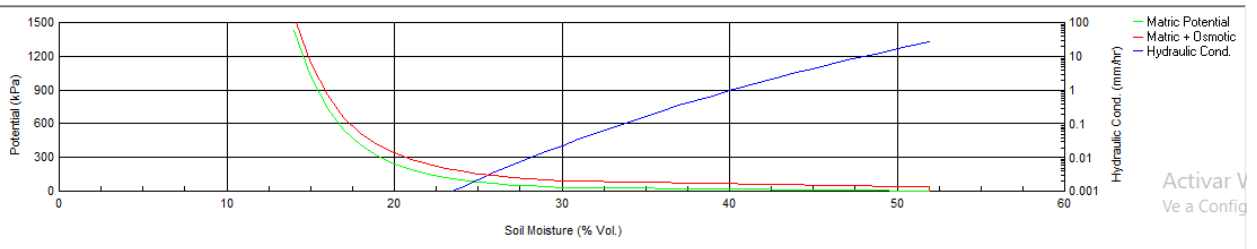
**Gráfica 6.** *Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP11.*

FBP12



**Gráfica 7.** *Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP12.*

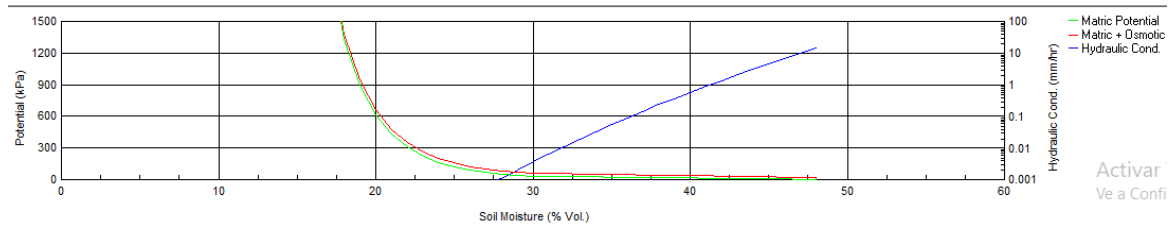
FBP21



**Gráfica 8.** *Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP21.*

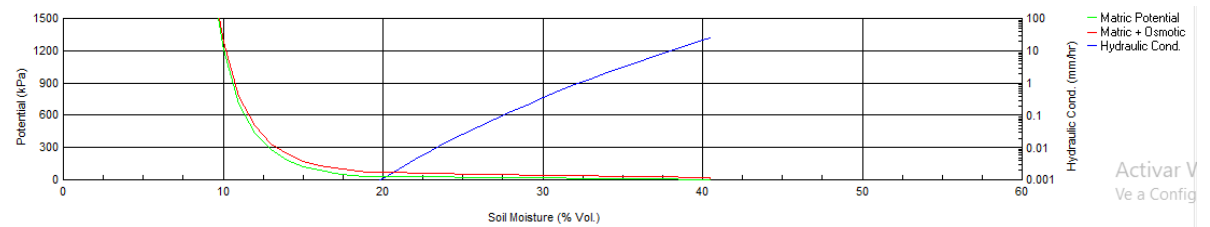
# ANEXO

## FBP22



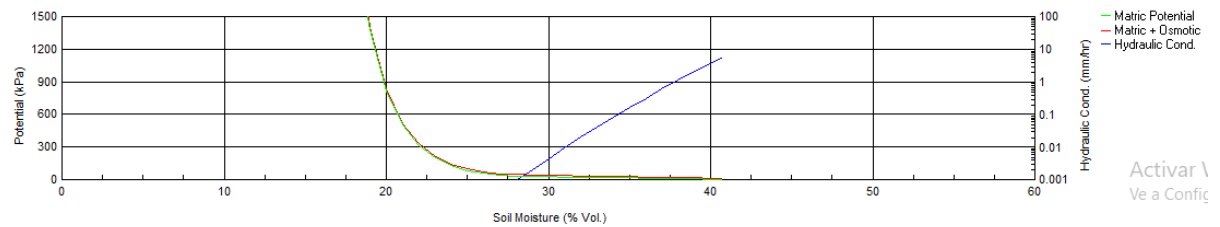
Gráfica 9. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP22.

## FBP23



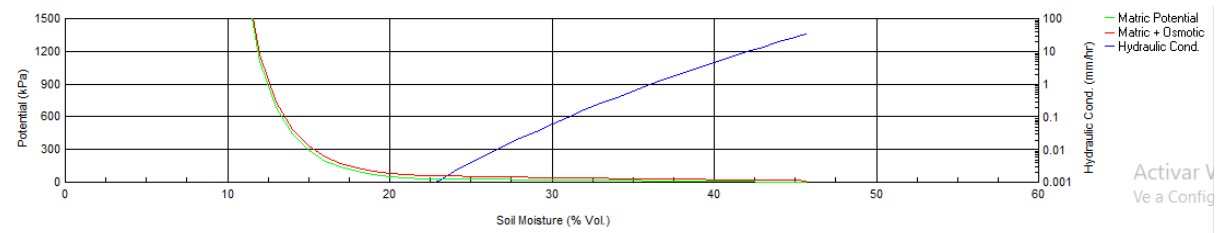
Gráfica 10. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP23.

## FBP24



Gráfica 11. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP24.

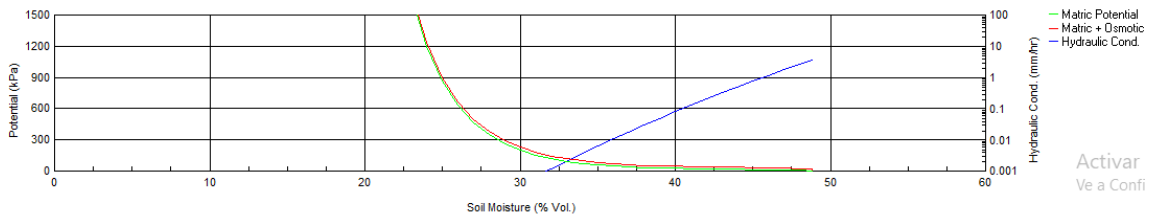
## FBP31



Gráfica 12. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP31.

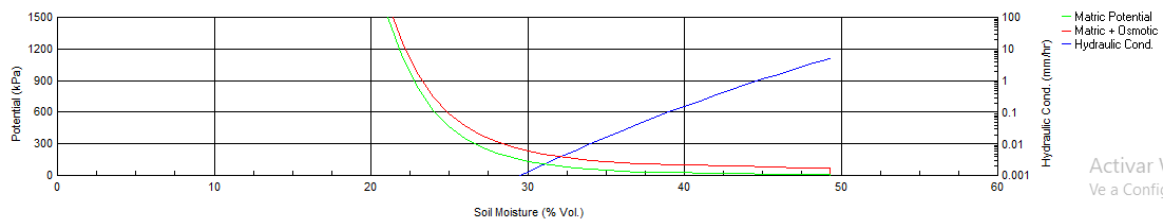
# ANEXO

## FBP32



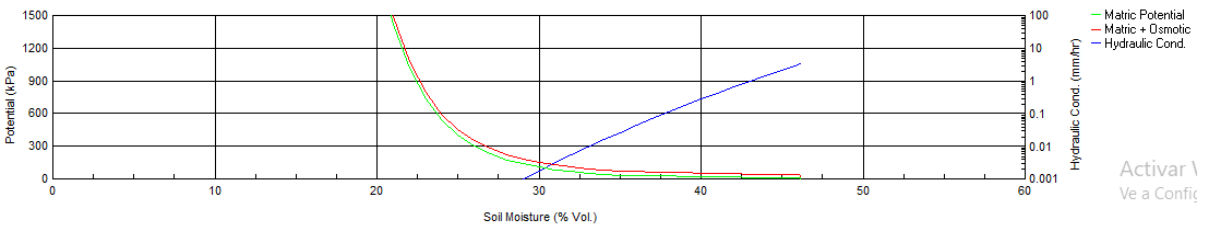
Gráfica 13. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP32.

## FBP33



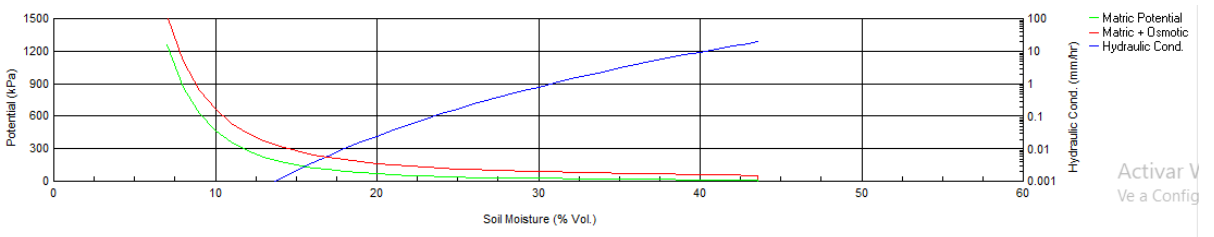
Gráfica 14. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP33.

## FBP34



Gráfica 15. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP34.

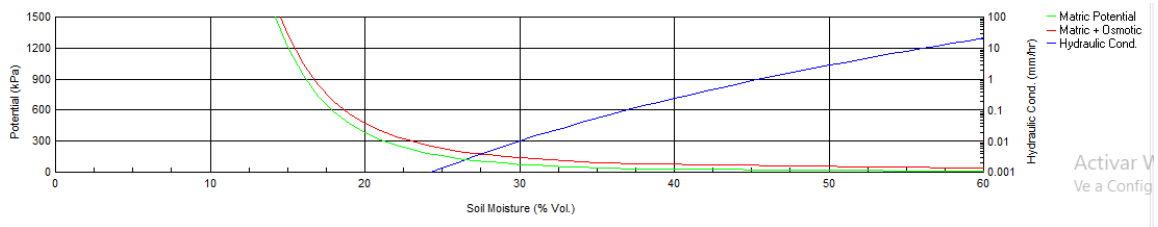
## FBP35



Gráfica 16. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP35.

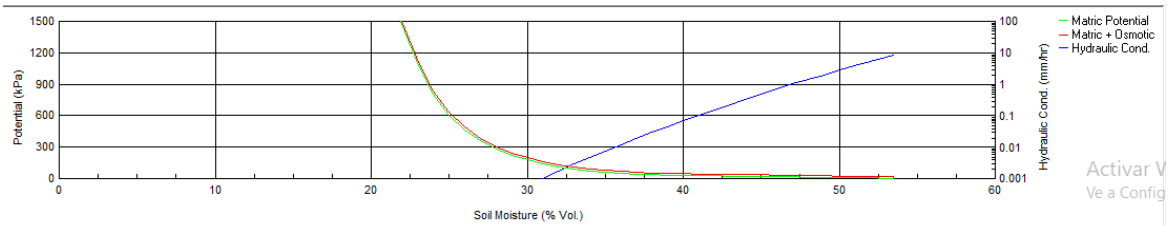
# ANEXO

## FBP41



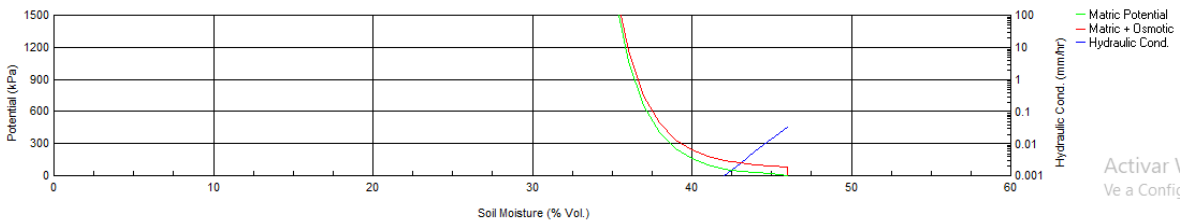
Gráfica 17. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP41.

## FBP42



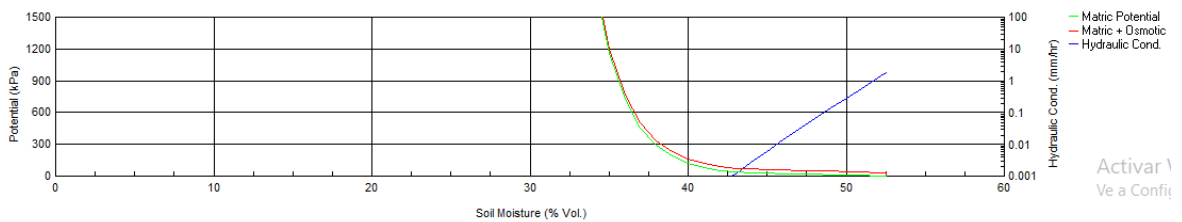
Gráfica 18. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBP42.

## FBA1



Gráfica 19. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBA1.

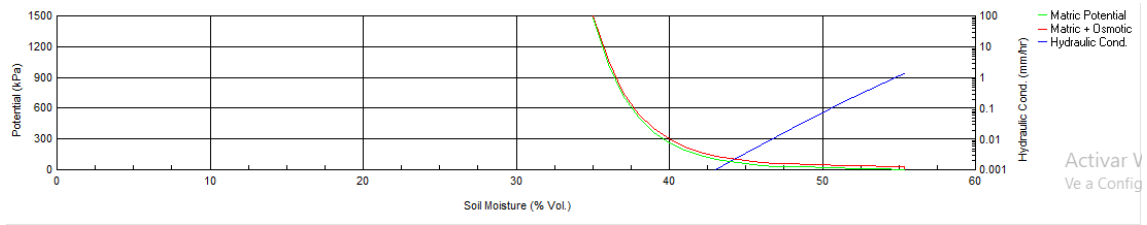
## FBA2



Gráfica 20. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBA2.

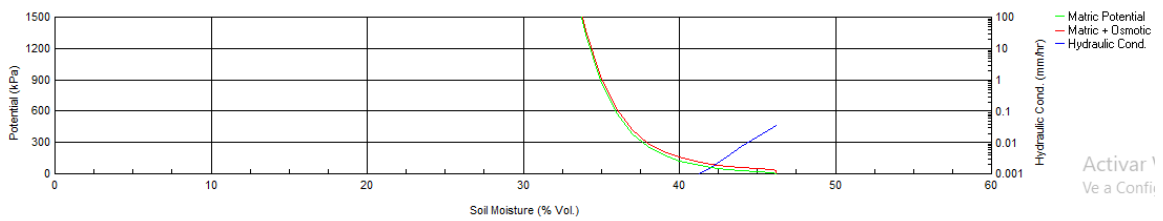
# ANEXO

## FBA3



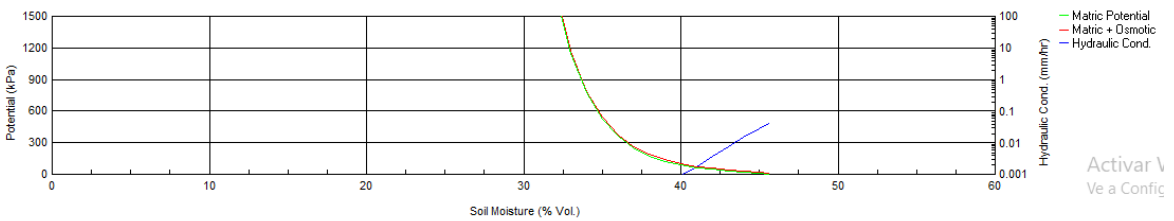
Gráfica 21. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBA3.

## FBMA1



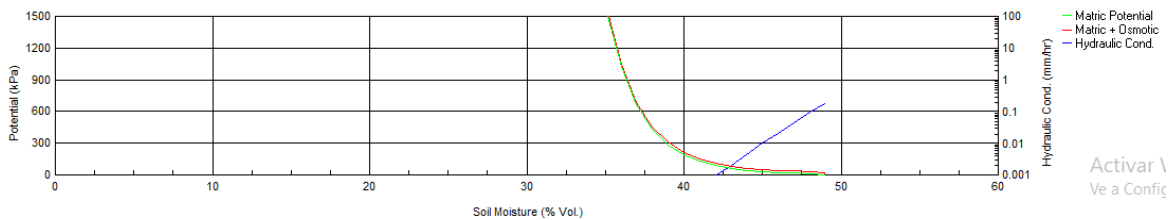
Gráfica 22. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMA1

## FBMA2



Gráfica 23. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMA2.

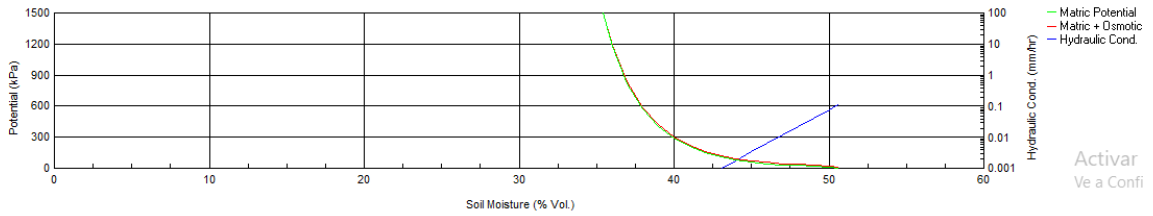
## FBMA3



Gráfica 24. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMA3

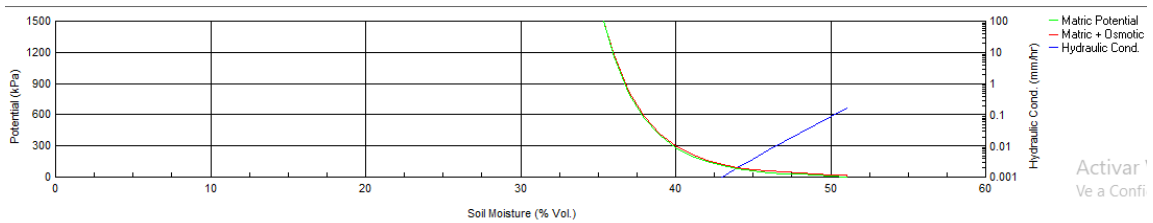
# ANEXO

## FBMA4



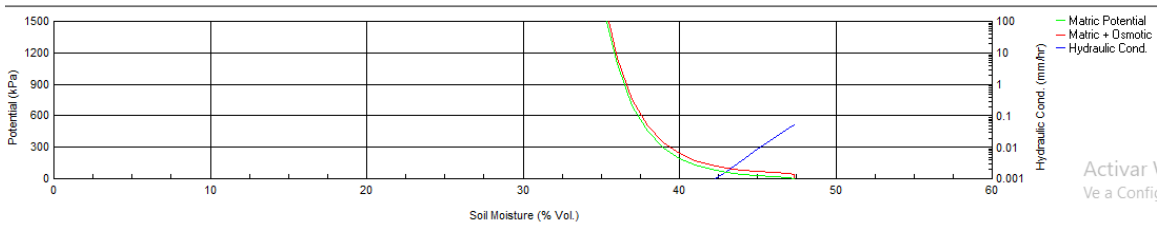
Gráfica 25. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMA4.

## FBMA5



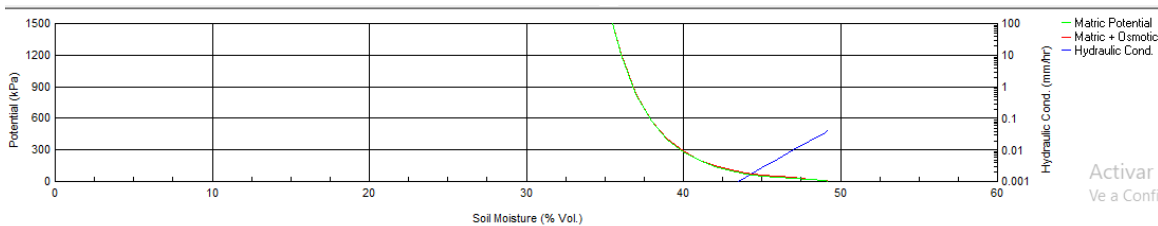
Gráfica 26. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMA5.

## FBMB1



Gráfica 27. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMB1.

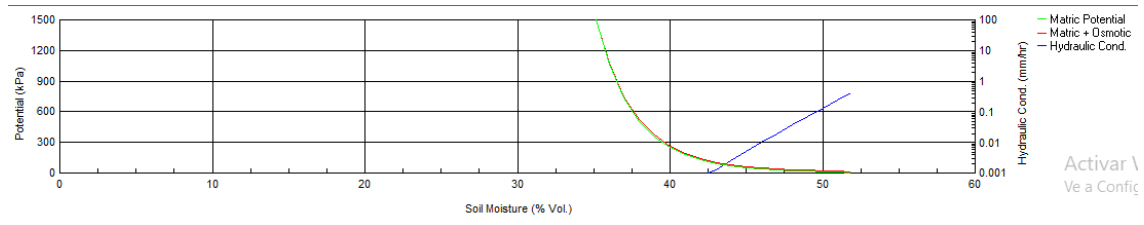
## FBMB2



Gráfica 28. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMB2.

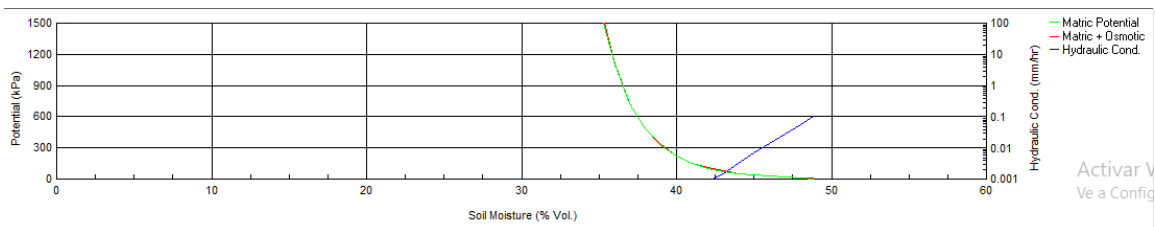
# ANEXO

## FBMB3



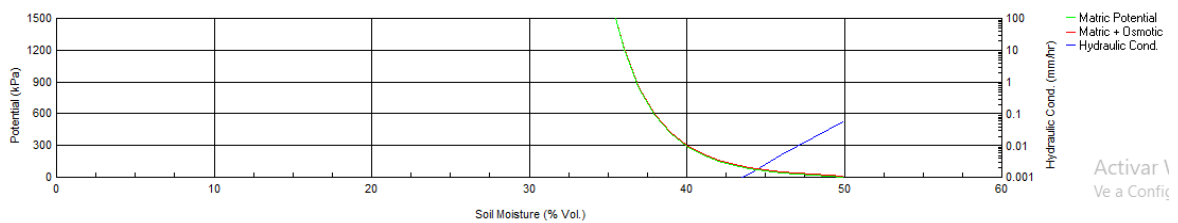
Gráfica 29. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMB3.

## FBMB4



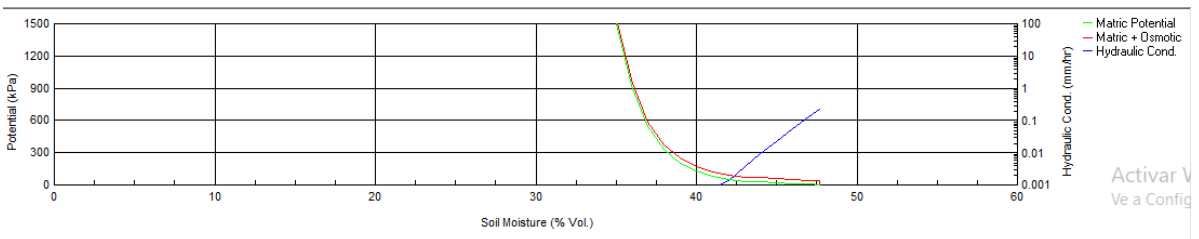
Gráfica 30. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMB4.

## FBMB5



Gráfica 31. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBMB5.

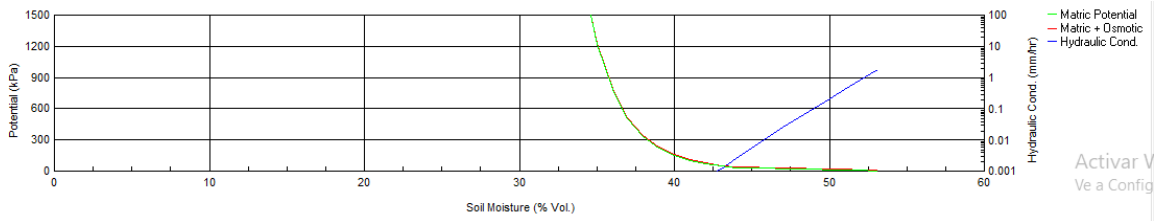
## FBB1



Gráfica 32. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBB1.

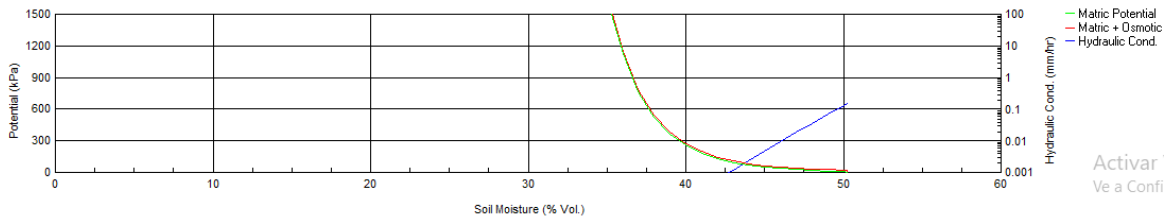
# ANEXO

## FBB2



Gráfica 33. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBB2.

## FBB3



Gráfica 34. Propiedades Hidrológicas para la muestra FBB3.