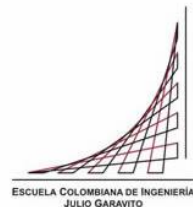


Maestría en Ingeniería Civil

**Efecto de la evapotranspiración generada por el pasto Kikuyo
(*Pennisetum clandestinum*) en la succión de suelos granulares.**

Edwin Giovanni Hormaza Guevara

Bogotá, D.C., 12 de abril de 2023



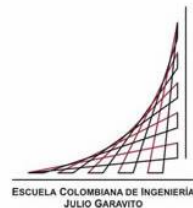
**Efecto de la evapotranspiración generada por el pasto Kikuyo
(*Pennisetum clandestinum*) en la succión de suelos granulares.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en geotecnia.**

Dr. Catalina Lozada López

Directora

Bogotá, D.C., 12 de abril de 2023



La tesis de maestría titulada “Efecto de la evapotranspiración generada por el pasto Kikuyo en la succión de suelos granulares”, presentada por Edwin Giovanni Hormaza Guevara, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.



Director de la tesis

Catalina Lozada López

Jurado

Rafael Angulo Jaramillo

Jurado

José Vicente Amórtegui

Bogotá, D.C., 12 de abril de 2023

Dedicatoria

A mi familia que siempre me ha apoyado y me han otorgado consuelo en los momentos más difíciles, en especial a mis padres Feliz Hormaza Hernández y Doris Guevara, que, con su ejemplo, han hecho de mí una persona perseverante y comprometida.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a mi familia por su confianza y apoyo incondicional, a mi pareja quien ha sido el motor y el aliento durante la maestría, a mis amigos y compañeros con quien he vivido vivencias que me han hecho crecer como persona.

Agradezco a los técnicos de laboratorio Marco Contreras y Osmar Tolosa, quienes me apoyaron en la ejecución de algunos de los ensayos de laboratorio, a la doctora Catalina Lozada por su dirección, acompañamiento y su sabiduría, ya que sin su tutela no habría sido posible terminar este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por abrirme las puertas y permitirme ser parte de ella.

Resumen

En la actualidad el mundo se encuentra inmerso en una serie de cambios climáticos que son el resultado del calentamiento global (Costa, 2007). Estos fenómenos han originado que desde la ingeniería misma se haga una transición de alternativas y procesos constructivos convencionales a alternativas verdes y más amigables con el medio ambiente. Para lograr esta transición, es necesario entender la interacción existente entre el suelo, planta y atmosfera.

Las coberturas vegetales tienen efectos positivos para reducir problemas de inestabilidad en taludes, entre los cuales se encuentra la prevención de erosión, el aporte a la resistencia a la tracción que depende del tipo y forma de la raíz de la planta y por último el cambio en el régimen de humedad dentro de la masa de suelo que se da por el efecto de la evapotranspiración. Cuantificar el incremento en las propiedades hidro-mecánicas del suelo es un reto dada la complejidad de las interacciones entre estos dos elementos (suelo-planta). Este reto se dificulta más debido a la variabilidad espacial que tienen a presentar sus respectivas propiedades (Bourrier et al., 2013).

En este trabajo se analizó el incremento de la succión, la cual fue determinada a partir del cambio en la humedad volumétrica del suelo generado por el efecto de la evapotranspiración del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Para determinar este cambio en el régimen de humedad, se implementó un modelo de columna de suelo, en el cual, se instalaron un conjunto de sensores de humedad volumétrica a diferentes profundidades. Los sensores estaban conectados a un sistema de adquisición de datos que permitió captar lecturas de humedad con una periodicidad de 15 minutos durante un tiempo de 90 días. Los valores de humedad fueron recolectados para dos tipos de suelos diferentes, un suelo bien gradado y otro mal gradado de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Palabras claves: Succión, evapotranspiración, suelo parcialmente saturado, Pasto Kikuyo.

Abstract

The planet is suffering a series of climate change as a result of global warming. These phenomena have forced the engineering discipline to look for alternative construction methods that are greener and friendlier with the environment. In order to achieve this transition, it is needed to understand the interactions between soil, plant and atmosphere.

Vegetable covering have positive effects in reducing instability in slopes, amongst there are erosion prevention, aiding traction resistance, depending on the type and shape of the root of the plant, and finally in the change in the humidity profile inside the soil mass caused by evapotranspiration. Quantifying the increment in the hydromechanical properties of the soil remains an challenge given the complexity in the interactions between the soil and the plant. This challenge is further complicated due to the spatial variability in these properties.

In this work we analyzed the increment in suction, determined from the change in volumetric humidity of the soil, generated by the effect of evapotranspiration of Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*). In order to determine this change in the humidity profile a soil column model was built, in which a set of volumetric humidity sensors were installed at different depths. The sensors were connected to data acquisition system that was able to register the humidity reading with a rate of 15 minutes during a period of 90 days. These humidity values were collected for two types of soil, a well graded soil and a poorly graded one according to the Unified Soil Classification System (USCS)

Keywords: Suction, evapotranspiration, partially saturated soil, Kikuyo grass

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	15
2	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
2.1	Planteamiento del problema	17
2.2	Objetivos	19
2.2.1	Objetivo general	19
2.2.2	Objetivos específicos.....	19
3	MARCO TEÓRICO	20
3.1	Suelos parcialmente saturados.....	20
3.2	Succión en suelos.....	23
3.2.1	Succión matricial	25
3.2.2	Succión osmótica	29
3.3	Curva de retención de humedad para suelos parcialmente saturados	30
3.3.1	Metodologías para medir la succión	33
3.3.2	Modelo Van Genuchten para ajustar la curva de retención de humedad	35
3.4	Evapotranspiración	36
3.4.1	Modelos para estimar la evaporación	38
3.5	Pasto Kikuyo.....	41
4	METODOLOGÍA	45
4.1	Etapa 1: Diseño experimental.....	45
4.1.1	Diseño físico experimental.....	45
4.1.2	Sistema de adquisición de datos	46
4.1.3	Pruebas.....	47
4.2	Etapa 2: Caracterización del suelo.	47
4.3	Etapa 3: modelos físicos experimentales.....	48

4.4	Etapa 5: análisis y validación.....	49
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS	50
5.1	Diseño experimental de un modelo de columna de suelo	50
5.1.1	Sistema de adquisición de datos	51
5.1.2	Pruebas.....	52
5.1.3	Caracterización del suelo.....	53
5.1.4	Modelos físicos experimentales.....	61
5.2	Determinación del incremento de la succión por efecto de la evaporación real y evapotranspiración.....	69
5.2.1	Resultados de los modelos físicos experimentales.....	69
5.2.2	Interpretación del cambio en el régimen de humedad.....	74
5.3	Efecto de la distribución del tamaño de las partículas en la succión.	85
5.4	Estimación de la evapotranspiración potencial y de referencia	88
6	CONCLUSIONES	91
7	RECOMENDACIONES	93
8	BIBLIOGRAFÍA.....	94

Lista de figuras

Figura 1 - Árbol de problemas.....	18
Figura 2 - Sistema multifásico de suelos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993)	20
Figura 3 - Estructura de los suelos (Alonso et al., 1989)	21
Figura 4 - Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. (Fredlund, 2000)	22
Figura 5 – Cambio de la presión de poros debido al cambio en las condiciones ambientales (Fredlund et al., 2012).....	23
Figura 6 - Relación entre la succión matricial y el tamaño de los poros para diferentes tipos de suelos (Fredlund et al., 2012)	26
Figura 7 - Tensiones superficiales que actúan en una superficie curva (Fredlund et al., 2012)	27
Figura 8 - Relación entre la succión osmótica y la conductividad eléctrica del agua que contiene mezclas de sales disueltas (Fredlund et al., 2012)	30
Figura 9 - Histéresis en la curva de retención de humedad (<i>Alsherif et al., 2015</i>)	31
Figura 10 - Curva característica de succión para diferentes tipos de suelos	32
Figura 11 - Etapas en la succión del suelo (Vanapalli et al., 1996).....	32
Figura 12 - Metodología para la determinación de las propiedades de los suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012).....	34
Figura 13 - Tipos de evaporización en el suelo (Fredlund et al., 2012)	37
Figura 14 - Relación entre la evaporación real y evaporación potencial como una función de la succión en el suelo (Wilson et al., 1997).	38
Figura 15 - Pasto el Kikuyo	43
Figura 16 - Metodología de investigación.....	45
Figura 17 - Sistema de adquisición de datos.....	46
Figura 18 - Diagrama de flujo para selección de suelo.....	48
Figura 19 - Modelo físico experimental propuesto; a) diseño modelo físico; b) modelo físico instalado.....	51
Figura 20 - Sistema de adquisición de datos; a) sistema de adquisición de datos final; b) programa en LabVIEW para el registro y visualización de la información.	52

Figura 21 - Pruebas sobre los elementos del sistema; a) Prueba de filtración sobre columna de acrílico; b) prueba de lectura en sensores de humedad volumétrica; c) prueba en frascos de Mariotte.	53
Figura 22 - Curva granulométrica de los suelos de análisis.....	54
Figura 23 - Ensayos de caracterización del suelo; a) análisis granulométrico; b) ensayo normal de compactación; c) determinación de la gravedad específica del suelo.....	56
Figura 24 - Curva densidad seca contra altura capilar teórica.....	56
Figura 25 - Ensayo de permeabilidad saturada; a) compactación de la muestra en permeámetro; b) saturación de la muestra en permeámetro.....	57
Figura 26 - Registro de humedad y succión; a) preparación de muestra de suelo; b) lectura de succión en WP4C; c) chequeo del contenido de humedad.....	59
Figura 27 - Curva de retención de humedad ajustada para el suelo 1.....	60
Figura 28 - Curva de retención de humedad ajustada para el suelo 2.....	61
Figura 29 - Calibración de sensores; a) curado de muestras; b) lectura de sensor de humedad volumétrica del suelo EC-5.	62
Figura 30 - Curva de calibración sensores de humedad volumétrica para el suelo 1	63
Figura 31 - Curva de calibración sensores de humedad volumétrica para el suelo 2	64
Figura 32 - Preparación de muestras; a) lavado de material; b) separación del suelo por rango de tamaños.....	65
Figura 33 - Modelos físicos experimentales; a) compactación y colocación de los suelos en las columnas de acrílico, b) determinación de la masa del suelo para cálculo de la densidad; c) montaje final de los modelos físicos experimentales.....	68
Figura 34 - Variación de humedad volumétrica del suelo con el tiempo para el modelo 1; a) variación de la humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación de humedad por efecto de la evaporación real.....	69
Figura 35 - Variación de humedad volumétrica del suelo con el tiempo para el modelo 2; a) variación de la humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación de humedad por efecto de la evaporación real.....	70
Figura 36 - Velocidad del viento promedio para el modelo 1 y 2	71
Figura 37 - Humedad relativa promedio para el modelo 1 y 2	72
Figura 38 - Radiación solar promedio en el modelo 1 y 2.....	73
Figura 39 - Precipitación promedio para el modelo 1 y 2.....	73
Figura 40 - Temperatura promedio para el modelo 1 y 2.....	74

Figura 41 - Variación de la humedad volumétrica con la profundidad para el modelo 1; a) variación en el régimen de humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación en el régimen de humedad por efecto de la evaporación real.....	75
Figura 42 - Variación de la humedad volumétrica con la profundidad para el modelo 2; a) variación en el régimen de humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación en el régimen de humedad por efecto de la evaporación real.....	75
Figura 43 - Análisis de la variación diaria de la humedad volumétrica del suelo por efecto de las condiciones atmosféricas; a) Relación entre la humedad volumétrica y la temperatura del aire; b) Relación entre la temperatura del aire y la humedad relativa; c) Relación entre la radiación solar y la velocidad del viento.	78
Figura 44 – Valores de succión desarrollados para el modelo 1; a) Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración; b) Succión desarrollada por efecto de la evaporación real.	80
Figura 45 - Valores de succión desarrollados para el modelo 2; a) Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración; b) Succión desarrollada por efecto de la evaporación real.	81
Figura 46 - Conductividad eléctrica del agua y compuesto formado por agua y fertilizante; a) dosificación fertilizante; b) lectura de la conductividad eléctrica del agua usando un conductímetro.	83
Figura 47 - Perfil de succión máxima por efecto de la evapotranspiración, evaporación real y transpiración del pasto; a) perfil de succión en el modelo 1; b) perfil de succión en el modelo 2.....	84
Figura 48 – Relación entre la succión máxima efecto de la evapotranspiración y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al Cc; b) Variación por efecto del Cu; c) Variación por efecto del D1 ₀	86
Figura 49 – Relación entre la succión máxima efecto de la transpiración y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al Cc; b) Variación por efecto del Cu; c) Variación por efecto del D1 ₀	86
Figura 50 – Relación entre la succión máxima efecto de la evaporación real y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al Cc; b) Variación por efecto del Cu; c) Variación por efecto del D1 ₀	87
Figura 51 - Evapotranspiración potencial (ETP) y de referencia (ETo) para los modelos de análisis) ETP y ETo para el modelo 1; b) ETP y ETo para el modelo 2.....	89

Lista de tablas

Tabla 1 - Técnicas y rango aproximado para medir succión (<i>Meza, 2012</i>)	35
Tabla 2 - Clasificación del pasto Kikuyo	43
Tabla 3 – Parámetros de la curva granulométrica	54
Tabla 4 - Propiedades índices de los suelos para los diferentes métodos de compactación.....	55
Tabla 5 - Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos de análisis	58
Tabla 6 - Parámetros finales de ajustes de la curva de retención de humedad	60
Tabla 7 - Lectura de sensores de humedad para diferentes contenidos de humedad volumétrica para el suelo 1	62
Tabla 8 - Lectura de sensores de humedad para diferentes contenidos de humedad volumétrica para el suelo 2	63
Tabla 9 - Constantes de ajuste para curva de calibración de sensores de humedad volumétrica.	64
Tabla 10 - Composición del fertilizante	66
Tabla 11 - Descripción física de los modelos.....	67
Tabla 12 – Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración del modelo 1 y 2. .	82
Tabla 13 - Valores de succión desarrollados por efecto de la evaporación real del modelo 1 y 2.....	82
Tabla 14 - Valores de succión osmótica y conductividad eléctrica del agua y del compuesto.....	83

Lista de anexo

- Anexo 1** Análisis granulométrico de los suelos 1 y 2
- Anexo 2** Curvas de compactación de los suelos 1 y 2
- Anexo 3** Gravedad específica de los suelos 1 y 2
- Anexo 4** Ensayos de masas unitarias de los suelos 1 y 2
- Anexo 5** Permeabilidad saturada de los suelos 1 y 2
- Anexo 6** Valores experimentales de la curva de retención de humedad para el suelo 1 y
- Anexo 7** Parámetros de ajustes para la curva de retención de humedad para el suelo 1
- Anexo 8** Calibración de sensores de humedad
- Anexo 9** Cantidades para ajuste granulometría suelo 1
- Anexo 10** Reporte de las condiciones climáticas
- Anexo 11** Reporte variación volumétrica del suelo con la profundidad
- Anexo 12** Reporte de las condiciones climáticas para un día de análisis (22-02-23)
- Anexo 13** Perfil de succión en el suelo por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación.
- Anexo 14** Estimación de la evapotranspiración potencial y de referencia
- Anexo 15** Registro de cantidad de agua que ingreso en los modelos

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad y uno de sus detonantes es la emisión de gases de efecto invernadero. Esta emisión es el resultado de la actividad humana, donde se destaca el sector de la construcción, el cual, emite alrededor de la tercera parte de emisiones de CO₂ y dos quintas partes de los desechos sólidos (Betancourt & Salazar, 2018). El calentamiento global ha generado mayores tasas de evapotranspiración, aumentando la cantidad de agua disponible en la atmosfera y, por ende, una mayor tasa de precipitación, lo que genera condiciones críticas en la inestabilidad de taludes por la presencia de agua.

La estabilidad de taludes se evalúa a través de modelos matemáticos como el de equilibrio limite, el cual se desarrolla a partir de la teoría clásica de suelos saturados. Sin embargo en la realidad muchos suelos se encuentran en estado parcial de saturación (Carvajal-cardenas & Lozada, 2023). Autores como (Ning Lu et al., 2010), (Vahedifard et al., 2016) y (Fredlund et al., 2012) en los últimos años han evaluado el efecto de la succión en la resistencia al corte de los suelos y como esta última repercute en la estabilidad de los taludes.

La ingeniería sostenible nace de la necesidad de poder reducir los efectos nocivos que pueden presentar los procesos constructivos sobre el medio ambiente y de la misma manera busca crear alternativas que permitan reducir el impacto del calentamiento global (Betancourt & Salazar, 2018). Dentro de las alternativas amigables con el medio ambiente se encuentra la implementación de coberturas vegetales para controlar los niveles de erosión que se presentan en los taludes, pero la prevención de erosión no es el único beneficio que presentan las plantas en general, actualmente, se discuten dos efectos positivos de la vegetación en el incremento de las propiedades geomecánicas de los suelos: el primero es un efecto mecánico, presente en el refuerzo del suelo con el aporte de la resistencia a la tracción generada por las raíces de las plantas y el segundo un efecto hidrológico, que relaciona el régimen de succión del suelo afectado por la absorción de agua por medio de la evapotranspiración (Chirico et al., 2013). Con base en lo anterior, en este trabajo se busca profundizar en el efecto hidrológico del suelo, por medio del análisis del incremento de la succión generada por efecto de la

evapotranspiración del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en dos suelos granulares, bajo condiciones atmosféricas no controladas.

2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento del problema

El estudio de la agricultura nos condujo al desarrollo de investigaciones enfocadas a los estudios de la ciencia del suelo, la física del suelo y la agronomía, las cuales, influyeron en los modelos físicos e hidráulicos que más tarde se incluyeron en la mecánica de los suelos no saturados (Cambel, 1956). Es a partir de estas investigaciones que la ingeniería civil incorporo la utilización de la vegetación como métodos de estabilización dando paso a la construcción de proyectos sostenibles y amigables con el medio ambiente, concepto que también se conoce como Bio-ingeniería.

Según (Chirico et al., 2013) uno de los aportes más significativos que tiene la vegetación en el mejoramiento de las propiedades geomecánicas de los suelos, es en el incremento de la succión que se genera por el cambio en el régimen de humedad del suelo. Las hierbas, los árboles, y en general todas las plantas disminuyen el contenido de humedad del suelo mediante el fenómeno de evapotranspiración induciendo a la reducción de la presión de poros (Dorsey, 1940).

La mayoría de las plantas son capaces de reducir 1000-2000 kPa (10-20 atm) de presión de poros antes de alcanzar su punto de marchitamiento (Taylor & Ashcroft, 1972). Esto quiere decir que la evapotranspiración reduce la cantidad de agua en el suelo, lo que provoca la reducción de la saturación, agrietamiento y una sobre consolidación de la masa del suelo. Las propiedades físicas y mecánicas que posee la vegetación pueden modificar enormemente las propiedades hidráulicas y geomecánicas de los suelos (Chirico et al., 2013).

Hoy en día es fácil ver la implementación de distintas clases de vegetación como una alternativa de solución eco-ingenieril a largo plazo, logrando en gran medida mitigar deslizamientos superficiales generados por la erosión del suelo (Bourrier et al., 2013). Adicional a eso, se presentan diferentes beneficios de la vegetación que influyen significativamente en las propiedades del suelo y por lo cual se utiliza como técnica de estabilización sobre todo en taludes (Marín & Osorio, 2016).

El efecto de la evapotranspiración conlleva a un cambio en el contenido de agua dentro de la masa de suelo. Según (Fredlund et al., 2012) los cambios en las presiones negativas del agua de poros asociados a los cambios de humedad son la causa de numerosos deslizamientos y fallas en los taludes, reducciones de la capacidad portante y del módulo de resiliencia de los suelos en las carreteras. En base a lo anterior, se puede preguntar ¿cuánto es el cambio de la humedad dada por la evapotranspiración de las plantas?, ¿cómo se puede cuantificar?, y ¿cómo se comporta teniendo en cuenta la heterogeneidad del tamaño de partículas de los suelos?

Para dar respuestas a las anteriores preguntas se debe considerar que la succión en los suelos es una propiedad que depende en gran medida del tamaño de los poros y del contenido de agua (Fredlund et al., 2012). Lo que conlleva a que se presenten cambios significativos por procesos como la evapotranspiración de las plantas. Dado lo anterior, se plantea este proyecto de investigación que busca analizar cómo es el comportamiento de la succión en función de estas dos variables: el tamaño de las partículas y el cambio de humedad generada por la evapotranspiración del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), que es un pasto común en gran parte de Colombia. La figura 1 presenta el árbol de problemas, en el cual, se especifica la necesidad de esta investigación.



Figura 1 - Árbol de problemas

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

- Analizar el efecto de la evapotranspiración generada por el pasto Kikuyo en la succión de dos suelos granulares.

2.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de columna de suelo que permita la instalación de sensores para monitorear el cambio de la humedad generada por la evapotranspiración del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).
- Determinar el incremento de la succión generada en dos suelos granulares por efecto de la evapotranspiración del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).
- Analizar el efecto de la distribución del tamaño de partículas de dos suelos granulares en el cambio de la succión debido a la evapotranspiración producida por el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Suelos parcialmente saturados

(Terzaghi, 1943) fue uno de los primeros en investigar el comportamiento del suelo en condiciones no saturadas, otorgándole un enfoque significativo al análisis de la interfaz agua – aire en los poros. Presentó estudios referentes a las fuerzas capilares y el análisis mecánico de las condiciones de drenaje enfocado a la pérdida de agua por desecación del suelo. De igual manera, (Matyas & Radhakrishna, 1968) y (Fredlund, 1979) incluyeron otra variable al estado de esfuerzos presentes en el análisis de los suelos parcialmente saturados presentado por Terzaghi, la cual, está relacionada con la succión y la presencia de presiones de poros negativas que influye en la resistencia al corte de los suelos.

Autores como (Yoshimi & Osterberg, 1963) y (Fredlund & Rahardjo, 1993) consideran que los suelos parcialmente saturados están compuestos por un sistema multifásico conformado por sólidos, agua, aire y una cuarta fase llamada membrana contráctil. La figura 2 muestra una representación del sistema multifásico de los suelos parcialmente saturados.

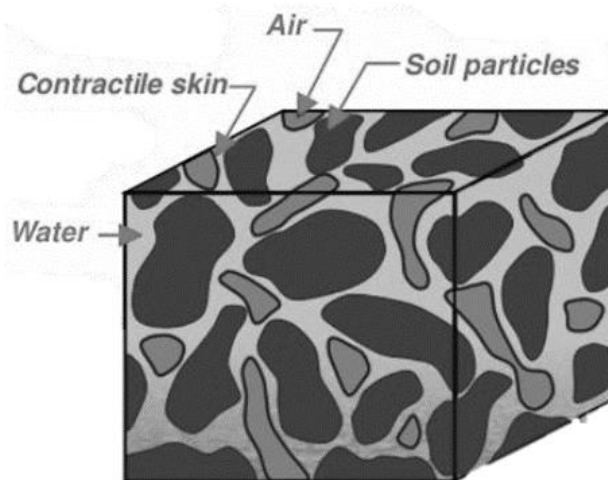


Figura 2 - Sistema multifásico de suelos parcialmente saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993)

La membrana contráctil es la interfase presente entre el aire y agua libre en los poros, y presenta un comportamiento distinto en comparación al modelo multifásico compuesto por suelo y sistema de vacíos (Fredlund & Morgenstern, 1977). Esta cuarta fase con la presencia de esfuerzos tiende a equilibrarse junto con la fase sólida del suelo y, por tanto, las fases conformadas por el aire y el agua en los poros tienden a fluir dentro de la masa de suelos.

En congruencia con lo anterior, (Alonso et al., 1989) consideran que las características particulares de la fase sólida de los suelos determinan y controlan el componente capilar de la succión. Entre las características más relevantes se tiene el tamaño, forma y textura de los granos de suelo, los cuales, determinan la cantidad y el tamaño de los poros. Así mismo, esta estructura interna condiciona las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos. Por tal razón, estos autores contemplaron la existencia de tres tipos de elementos que conforman estas estructuras, las cuales son: las partículas elementales, agregado de partículas y los poros. Cuando estos elementos están distribuidos de forma homogénea se considera una estructura de tipo matricial, en caso contrario se considera una microestructura de agregados. Según estos mismos autores cuando aumenta la succión, los suelos con estructura matricial presentan un incremento de su volumen (expansión) y los suelos con microestructura de agregado se retraen (contracción). Pero en ambos casos se presenta un aumento de resistencia de contacto entre las partículas de suelos. La figura 3 muestra la estructura de los suelos parcialmente saturados.

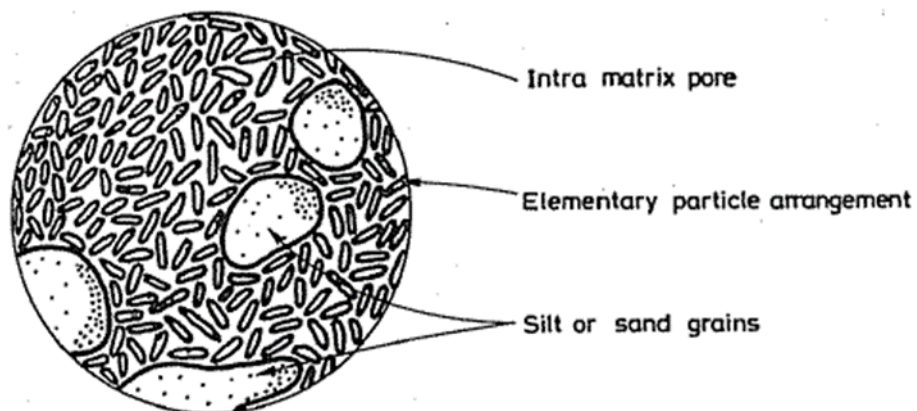


Figura 3 - Estructura de los suelos (Alonso et al., 1989)

Para (Fredlund et al., 2012), el clima desempeña un papel importante a la hora de determinar si un suelo está saturado o parcialmente saturado, ya que el agua se retira del suelo por efecto de la evaporación desde la superficie o por transpiración a través de la cobertura vegetal, estos procesos producen flujo ascendente de agua en forma de vapor. Así mismo, las lluvias y demás formas de precipitación aumentan el contenido de agua del suelo por medio de flujo descendente llenando nuevamente los poros. Por lo tanto, la diferencia de estas dos condiciones de flujo, influyen en el grado de saturación en el perfil del suelo. De acuerdo a lo anterior (Fredlund, 2000), estableció que todo suelo que se encuentre por debajo del nivel freático se encuentran en estado saturado y todo suelo por encima de este pueden encontrarse en estado seco o parcialmente saturado. La figura 4 presenta el perfil de saturación de un suelo parcialmente saturado.

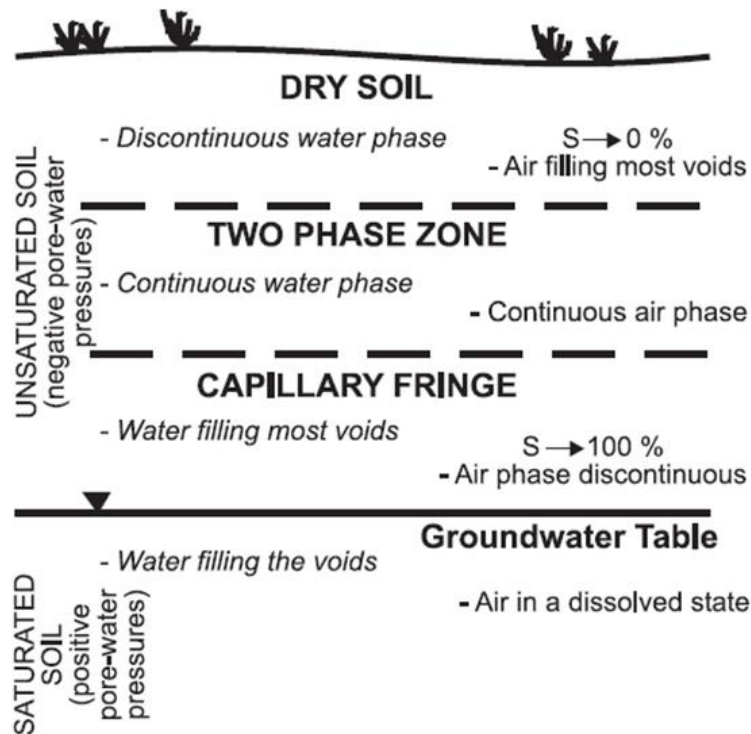


Figura 4 - Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. (Fredlund, 2000)

La cobertura vegetal está ligada a la naturaleza dinámica de las condiciones climáticas, lo que condiciona el cambio de humedad y el grado de saturación del suelo (Wilson et al., 1994). Las variables atmosféricas pueden condicionar directamente el incremento de la

succión lograda por la evapotranspiración y, por ende, el incremento en la resistencia al corte de los suelos. Para (Fredlund et al., 2012), la presión de poros actúa en todas las direcciones y puede superar fácilmente el confinamiento lateral en el suelo. Cuando esto ocurre, comienza un modo secundario de saturación debido al agrietamiento del suelo. El cual está sometido a condiciones climáticas variables que produce cambios en la distribución de la presión poros. Este efecto se puede observar en la figura 5.

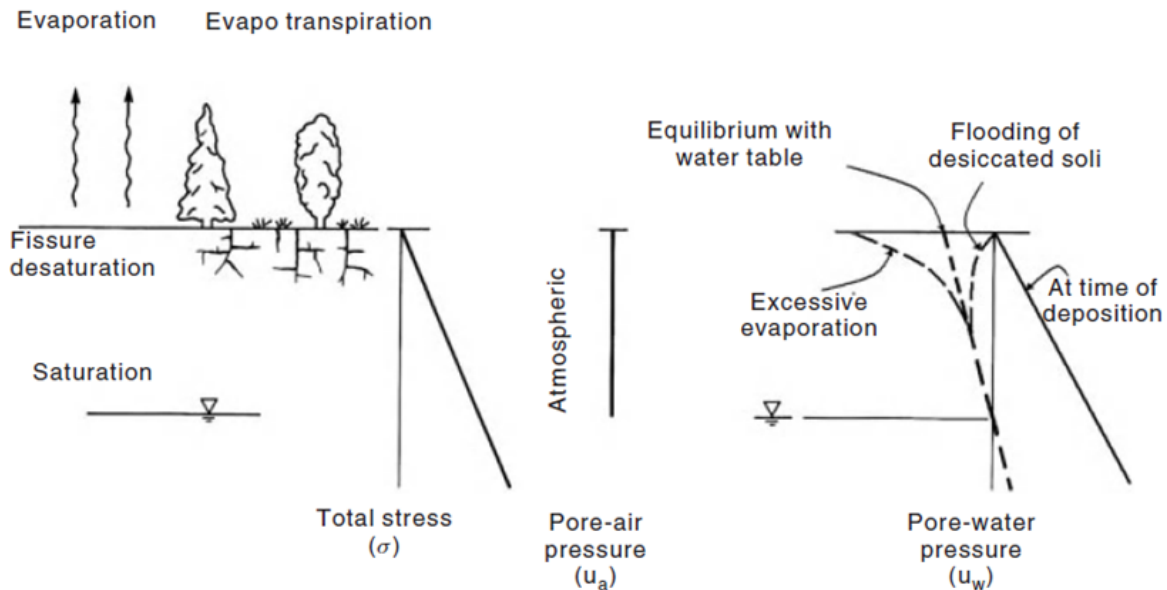


Figura 5 – Cambio de la presión de poros debido al cambio en las condiciones ambientales (Fredlund et al., 2012)

3.2 Succión en suelos

(Schofield, 1935) fue el primero en utilizar el término de succión, con el cual hacía referencia a la deficiencia de presión en el agua de poros presentes en algunos suelos. Autores como (Bishop & Blight, 1963) estipularon que la succión en un suelo es similar a una presión exterior aplicada. La relación termodinámica existente entre la succión total del suelo y la presión parcial del vapor de agua en el suelo se describe como se indica en la ecuación (1).

$$\psi = -\frac{RT}{\mu_w \omega_v} * \ln\left(\frac{\bar{v}_w}{\bar{v}_{v0}}\right) \quad (1)$$

Donde:

Ψ : Succión total

R: Constante universal de gases [8.31432 J/ (Mol K)]

T: Temperatura absoluta [T=(273.26+t°) (K)]

v_w0 : Volumen específico del agua o el inverso de la densidad del agua (m³/kg)

ω_v : Masa molecular del vapor de agua (18.106 kg/kmol).

\bar{v}_w : Presión parcial de vapor de agua (kPa)

\bar{v}_{v0} : Presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura (KPa).

El termino de \bar{v}_w/\bar{v}_{v0} es conocido como humedad relativa del aire en el suelo RH (%). Si la humedad relativa es igual al 100% indica que la succión del suelo es igual a cero y si por el contrario esta densidad relativa está por debajo del 100%, hay presencia de succión.

(Fredlund & Rahardjo, 1987) estipularon que la succión total presente en una masa de suelo es la suma entre la succión matricial y la succión osmótica, tal como se describe en la ecuación (2).

$$\psi = \psi_m + \pi \quad (2)$$

Donde:

Ψ : Succión total

Ψ_m : Succión matricial

π : Succión osmótica

3.2.1 Succión matricial

La succión matricial es conocida como la diferencia existente entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros, la cual, se expresa en la ecuación (3). La succión matricial está en función de la tensión superficial y está asociada al fenómeno de la capilaridad. Para (Fredlund et al., 2012) los suelos con tamaño de poros muy pequeños presentan una disminución de la saturación por efecto de la capilaridad. El radio de curvatura del menisco se reduce y, por ende, se presenta un incremento de la succión matricial. Por lo cual, es común que haya un mayor desarrollo de succión matricial en suelos arcillosos que poseen tamaño de poros más pequeños que en suelos granulares donde el tamaño de los poros tiende a aumentar.

$$\psi_m = (v_a - v_w) \quad (3)$$

Donde:

ψ_m : Succión matricial

v_w : Presión de agua de poros

v_a : Presión de aire de poros

El tamaño de los poros, el grado de saturación y la distribución de las partículas de los suelos influyen directamente en la succión matricial (Dineen, 1997). La curva granulométrica brinda información importante sobre la cantidad de espacios vacíos en los suelos y puede utilizarse para la estimación de la succión (Fredlund et al., 2012). La figura 6 muestra la relación entre la succión matricial y el tamaño de los poros en diferentes tipos de suelos.

Por las razones antes mencionadas, las ecuaciones (4) y (6) permiten determinar la altura capilar que puede alcanzar un suelo de acuerdo con sus propiedades físicas. En suelos granulares la capilaridad se puede estimar a partir de la granulometría del material y en suelos finos se podrá calcular a partir de los límites de consistencia.

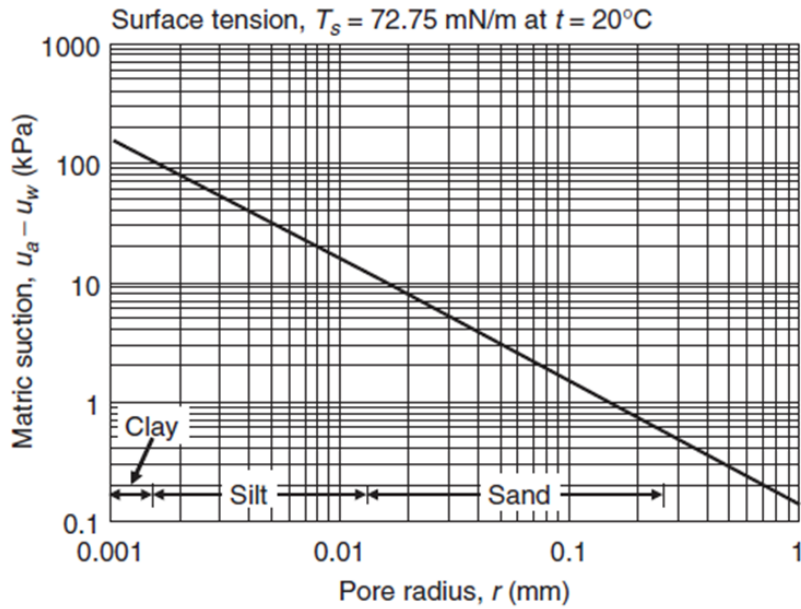


Figura 6 - Relación entre la succión matricial y el tamaño de los poros para diferentes tipos de suelos (Fredlund et al., 2012)

$$h_{co} = \frac{b(\text{cm}^2)}{e * D_{10}(\text{cm})} \quad (4)$$

Donde:

h_{co} Elevación capilar media (cm)

e : Relación de vacíos del suelo

D_{10} : Diámetro correspondiente al 10% de la curva granulométrica

B : Constante que se puede determinar a través de la ecuación (5)

$$b(\text{cm}^2) = \frac{0.75}{1.17 * \log C_u + 1} \quad (5)$$

Donde:

C_u : Coeficiente de uniformidad del suelo

$$h_{co} = \frac{\xi * (ll)^{1.75}}{e} \quad (6)$$

Donde:

ξ Constante igual a 402.2cm²

LL: Limite liquido del suelo

Según (Alonso et al., 1989) la succión matricial está ligada a la estructura del suelo y depende de la componente capilar asociada al agua libre entre los agregados. Cuando aumenta la succión matricial aumenta la rigidez de la estructura del suelo. Cuando la saturación aumenta, la succión matricial disminuye generando una reducción de la resistencia de contacto entre las partículas del suelo.

La tensión superficial es una característica propia de la membrana contráctil en los suelos y tiene como función el equilibrio de fuerzas a lo largo de la misma. Debido a estos esfuerzos la membrana se caracteriza por tener una forma curva y, por tanto, se desarrollan tensiones para estar en una condición de equilibrio (Alonso et al., 1989). La figura 7 presenta el estado de esfuerzos en la membrana contráctil.

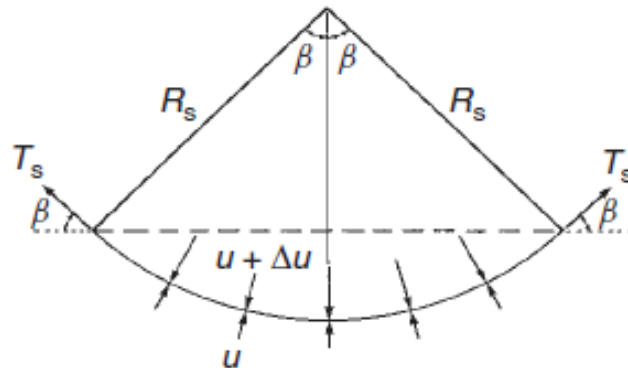


Figura 7 - Tensiones superficiales que actúan en una superficie curva (Fredlund et al., 2012)

Dado lo anterior al desarrollar el equilibrio de fuerzas a lo largo de la membrana contráctil se describe en la ecuación (7).

$$2T_s \sin \beta = 2R_s \Delta\mu \sin \beta \quad (7)$$

Donde:

Ts: Tensión superficial de la pared contráctil

Rs: Radio de curvatura de la membrana contráctil

νa : Angulo formado por la vertical y el radio de curvatura.

$$\Delta\mu = \frac{T_s}{R_s} \quad (8)$$

El supuesto anterior está basado en considerar una curvatura de la membrana contráctil de forma bidimensional. Si se realiza un análisis tridimensional y si se considera que los radios de curvatura son igual se tendría que: $R_1 = R_2 = R_s$ y, por tanto, se puede decir que:

$$\Delta\mu = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (9)$$

De igual forma, la expresión anterior se puede expresar como:

$$\Delta\mu = \frac{T_s}{2R_s} \quad (10)$$

En los suelos parcialmente saturados la succión matricial es la diferencia entre la presión de aire de poros y la presión de agua de poros, tal como, se expresó anteriormente en (3). La succión matricial ocasiona la curvatura de la membrana contráctil, por lo cual, la expresión (10) se puede expresar de la siguiente forma:

$$(\mu a - \mu w) = \frac{T_s}{2R_s} \quad (11)$$

Por tal motivo, se genera una relación inversa entre la succión matricial y el radio de curvatura de la membrana contráctil. Por esta razón, mientras que el radio de curvatura aumenta la succión matricial disminuye.

3.2.2 Succión osmótica

Según (Fredlund et al., 2012), la succión osmótica está relacionada con el contenido de sales disueltas en la fase líquida del suelo, por lo tanto, se encuentra presente tanto en suelos saturados como en suelos parcialmente saturados. El efecto de la succión osmótica repercute en el comportamiento del suelo, lo que puede conllevar a un cambio volumétrico y a un aumento de la resistencia al corte de los suelos en concordancia al contenido de iones disueltos.

El flujo de agua que se mueve a través de la masa de los suelos parcialmente saturados, es controlado por el gradiente del potencial de agua total. El cual a su vez puede expresarse como la suma del potencial gravitacional (que es causado por la elevación del agua), el potencial capilar o matricial (causado por efecto de la tensión superficial) y el potencial osmótico (causado por la concentración de iones disueltos en el agua).

La succión osmótica también se puede relacionar con la conductividad eléctrica del agua., la cual, tiende a aumentar con la presencia de sales disueltas (Fredlund et al., 2012). Por tanto, el agua pura tendrá una conductividad eléctrica menor en comparación con el agua de poros que posea una cantidad significativa de sales disueltas, lo que conlleva a un mayor valor de la succión osmótica. Esta relación se puede observar en la figura 8.

La ecuación (12) se desarrolló con el fin de expresar matemáticamente la relación entre la succión osmótica y la conductividad eléctrica del agua.

$$\pi = 0.024EC^{1.08} \quad (12)$$

Donde:

τ : Succión osmótica (Kpa)

EC: Conductividad eléctrica del agua (milimhos/cm)

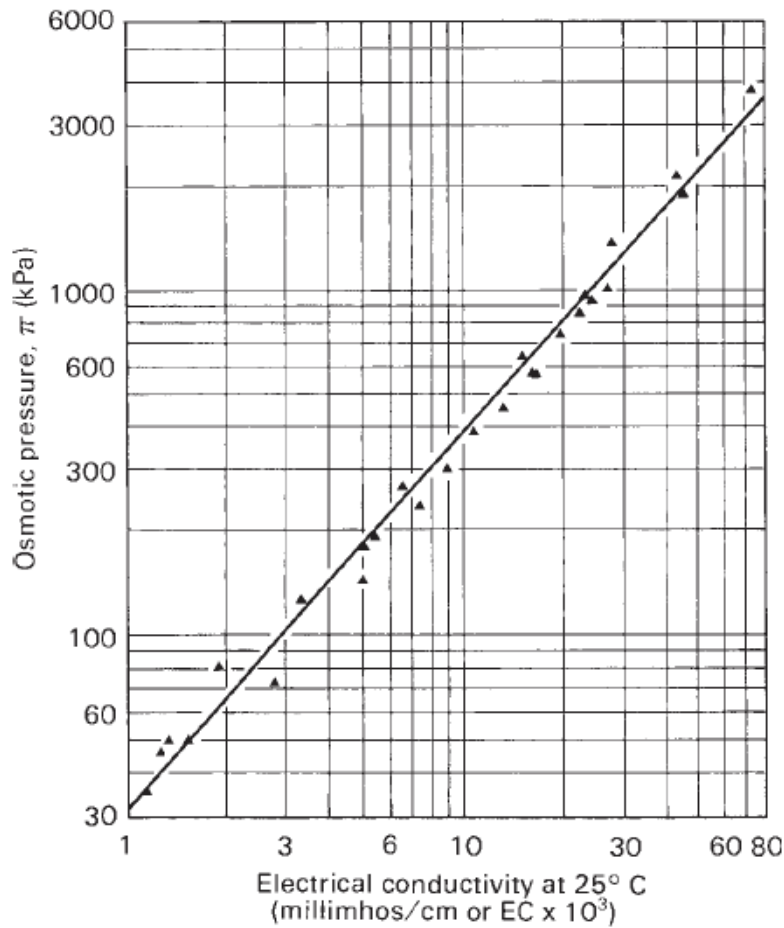


Figura 8 - Relación entre la succión osmótica y la conductividad eléctrica del agua que contiene mezclas de sales disueltas (Fredlund et al., 2012)

3.3 Curva de retención de humedad para suelos parcialmente saturados

La curva característica del suelo (SWCC) es primordial para el estudio de los suelos parcialmente saturados (Wilson et al., 1994). La SWCC es una representación gráfica de la relación existente entre el contenido de agua en una muestra de suelo que puede ser expresado en términos de humedad gravimétrica (w), grado de saturación (S) o humedad volumétrica (θ) contra el potencial de energía del agua (Alsherif et al., 2015).

En la curva característica del suelo, se considera principalmente la componente de succión matricial, puesto que la mayoría de los problemas en la ingeniería se representan

por condiciones ambientales que convergen en un cambio en el régimen de humedad del suelo. Por otra parte, se debe considerar la succión osmótica cuando se identifique la presencia de sales que contribuyan a la reducción del grado de saturación del suelo.(Fredlund & Rahardjo, 1993).

La curva de retención de humedad varía de acuerdo con los procesos de humedecimiento y secado, consecuencia del cambio hídrico en la masa de suelo, lo que implica un cambio en el contenido de humedad (Alsherif et al., 2015) y (Ning Lu & Likos, 2004).La figura 9 presenta el efecto de la histéresis en la succión.

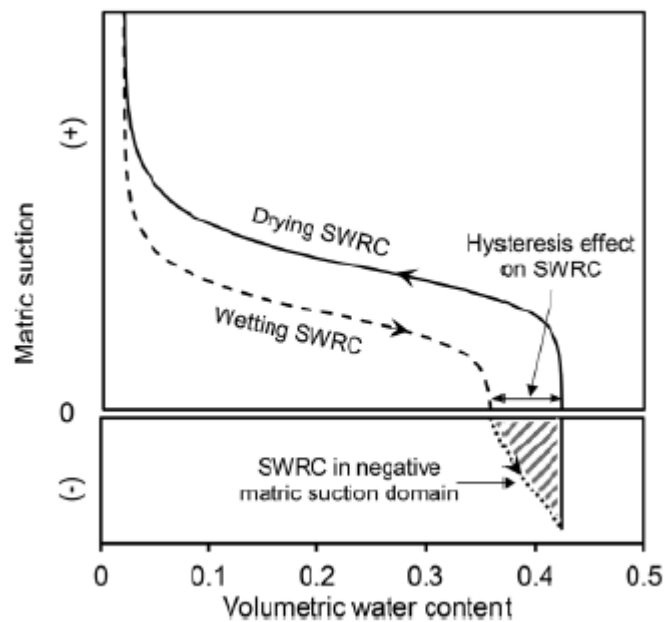


Figura 9 - Histéresis en la curva de retención de humedad (Alsherif et al., 2015)

Estos mismos autores en conjunto con (Ning Lu et al., 2010) analizaron que la curva se rige por la distribución de tamaño de los poros, presentándose mayor succión en suelos arcillosos y las propiedades de la superficie intersticial, tal como se observa en la figura 10.

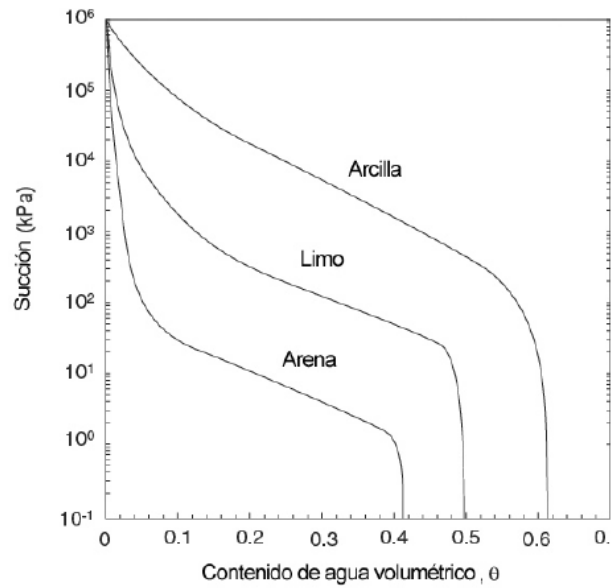


Figura 10 - Curva característica de succión para diferentes tipos de suelos

(Vanapalli et al., 1996) concluyeron que la curva característica de succión presenta cuatro etapas tal como se puede observar en la figura 11. En la primera fase el suelo está completamente saturado, posteriormente se encuentra una zona de transición primaria y secundaria en las cuales el contenido de agua se reduce gradualmente hasta llegar a una zona residual donde el menisco del agua es muy pequeño y genera incremento de la succión.

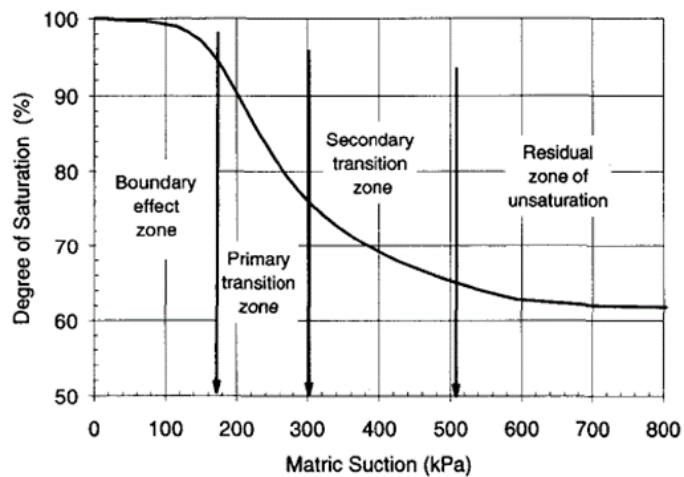


Figura 11 - Etapas en la succión del suelo (Vanapalli et al., 1996)

(Fredlund & Xing, 1994) propusieron una ecuación matemática para evaluar la succión, la cual se puede observar en la expresión (13).

$$\theta = C(\psi) \left[\frac{\theta_s}{\ln(e + [\psi/a]^n)} \right]^m \quad (13)$$

Donde:

- θ : Contenido volumétrico de agua a cualquier valor de succión.
- Ψ : Succión en el suelo (kPa).
- $C(\Psi)$: Función de corrección cuya ecuación se expresa en (14).
- θ_s : Contenido volumétrico de agua en el suelo en estado de saturación.
- a : Succión relacionada con el valore de entrada de aire.
- n : Parámetro del suelo relacionado con la pendiente de la curva en el punto de inflexión.
- m : Parámetro de ajuste relacionado con los resultados cerca del contenido residual de agua.

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \frac{1000000}{\psi_r})} \right] \quad (14)$$

Donde:

- Ψ_r : Succión correspondiente al contenido residual de agua [kPa].

3.3.1 Metodologías para medir la succión

Una de las mayores dificultades que se contempla en el desarrollo de la mecánica de suelos parcialmente saturados es la determinación de las propiedades físicas y

mecánicas del suelo, debido a los altos costos que conlleva la realización de este tipo de pruebas en los laboratorios en los cuales se debe contemplar la permanencia de la succión (Fredlund et al., 2012). Actualmente se pueden definir muchas de esas propiedades con una aproximación razonable por medio de la implementación de técnicas indirectas de laboratorio y a partir de las propiedades de los suelos saturados. En la figura 12 se presenta la metodología para la determinación de las propiedades de los suelos parcialmente saturados.

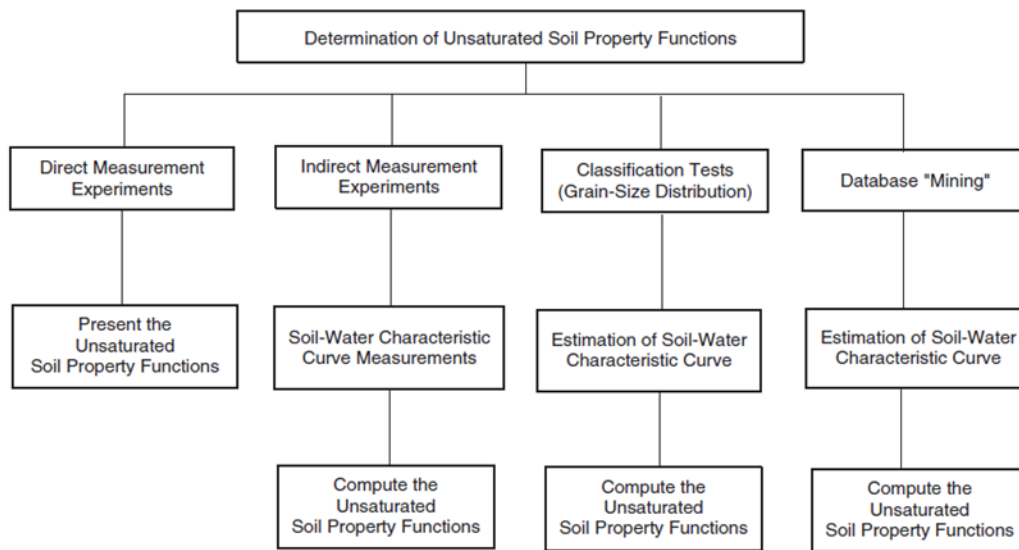


Figura 12 - Metodología para la determinación de las propiedades de los suelos parcialmente saturados (Fredlund et al., 2012)

Existen diversas técnicas para medir la succión en los suelos, entre los cuales se tiene los métodos directos y los métodos indirectos. Los métodos directo buscan medir directamente la succión en campo o en laboratorio y los métodos indirectos buscan determinar a través de correlaciones valores de succión (Fredlund et al., 2012).

Entre los métodos directos más utilizados son los tensiómetros o las técnicas de traslación de ejes y entre los métodos indirectos se encuentra el método de papel filtro (Meza, 2012). La tabla 1 muestra con más detalle las diferentes técnicas para medir la succión en los suelos

Tabla 1 - Técnicas y rango aproximado para medir succión (Meza, 2012)

Componente de succión de medida	Técnica/ sensor	Rango de succión medido en kPa	Ensayo de campo o laboratorio
Succión matricial	Tensiómetros	0-100	Campo y laboratorio
	Técnicas de traslación de ejes	0-1500	Laboratorio
	Sensores de conductividad eléctrica y térmica	0-400	Campo y laboratorio
	Papel filtro (contacto)	Rango completo	Campo y laboratorio
Succión total	Psicrómetros termopares	100-8000	Campo y laboratorio
	Técnica de espejo enfriado	1000-450000	Laboratorio
	Papel filtro (sin contacto)	1000-500000	Campo y laboratorio

3.3.2 Modelo Van Genuchten para ajustar la curva de retención de humedad

(Ning Lu & Likos, 2004) propusieron una representación matemática de la curva de retención de humedad, la cual, hace uso de variables como velocidad del viento, humedad residual, humedad de saturación, entre otros. Estos mismos autores concluyeron que para poder predecir el comportamiento de esta curva es necesario determinar experimentalmente algunos puntos para poder establecer un modelo matemático de ajuste.

Van Genuchten (1980) propuso un modelo matemático para estimar y ajustar la curva de retención de humedad utilizando tres parámetros de ajuste α , n y m . La ecuación (15) presenta la ecuación de ajuste.

$$\theta = \left[\frac{\psi}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (15)$$

Donde:

Ψ Succión del suelo expresada en kPa o metros de columna de agua

α : Parámetro de ajuste expresado en (kPa^{-1}) o (m^{-1})

m Parámetro de ajuste relacionado con la simetría general de la curva

n Parámetro de ajuste relacionado con la distribución de tamaños de los poros

Los parámetros m y n se restringe por su relación directa como se muestra en la expresión (16).

$$m = 1 - \frac{1}{n} ; n > 1 \quad (16)$$

3.4 Evapotranspiración

Para (Fredlund et al., 2012), el término evapotranspiración se refiere a dos aspectos específicos, la evaporación real y la transpiración producida por la cubierta vegetal. La evaporación se describe como la pérdida de humedad dentro de la masa de suelo y se puede presentar de dos maneras: la evaporación real es la generada a través de la superficie del suelo o capa vegetal y la evaporación potencial es la generada a través de la superficie del agua. La transpiración es la pérdida de humedad debido únicamente a la vegetación, por efecto de la absorción de agua a través de las raíces de las plantas que posteriormente es liberada por medio de las estomas de las hojas. La figura 13 muestra los tipos de flujo ascendentes de humedad que se presentan en una masa de suelo.

Para conocer la variación de la humedad en el suelo por efecto de la evapotranspiración es necesario realizar un del balance hídrico en la superficie del suelo (Fredlund et al., 2012). Por procesos hidrológicos, el agua proveniente de las precipitaciones entra a la masa de suelo por percolación. Parte del agua infiltrada es captada por las raíces de las plantas y liberada a la atmósfera por efecto de la transpiración y otra parte se pierde como vapor de agua a través de la superficie del suelo por efecto de la evaporación. Para (Wilson et al., 1994) el flujo real de agua por evapotranspiración puede calcularse por medio de un modelo suelo – atmósfera.

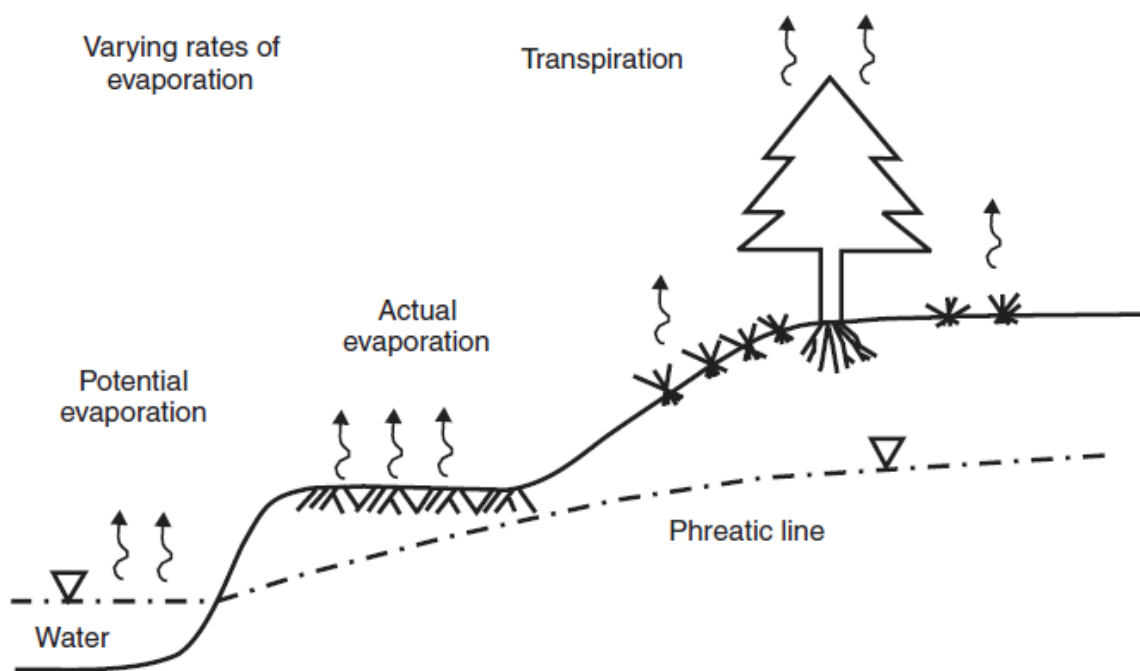


Figura 13 - Tipos de evaporización en el suelo (Fredlund et al., 2012)

Para realizar un análisis de la transpiración producida por la capa vegetal, es necesario considerar a las plantas como pequeñas bombas las cuales extraerán la humedad del suelo en zonas por debajo de la superficie. Además, se deberá contemplar el periodo de crecimiento de las plantas, por tanto, se necesita garantizar la sostenibilidad de los nutrientes en el suelo a largo plazo. (Tratch, 1995),.

Según (Hillel, 2004) la hidrología se ha enfocado en la determinación de la evaporación potencial para estimar el cambio en el régimen de humedad. Mientras que (Wilson et al., 1994), demostraron por medio de estudios experimentales que la relación entre evaporación real y la evaporación potencial es la que se asocia con la succión del suelo y es la que controla el perfil de presión de poros negativas por debajo de la superficie del terreno. La figura 14 relaciona la evaporación real y potencial con la succión.

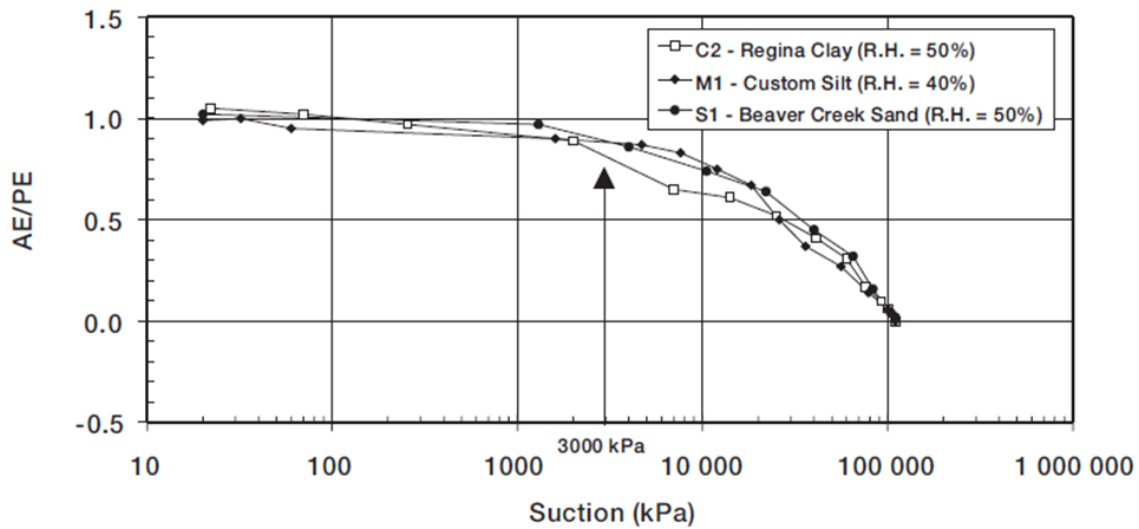


Figura 14 - Relación entre la evaporación real y evaporación potencial como una función de la succión en el suelo (Wilson et al., 1997).

3.4.1 Modelos para estimar la evaporación

Thornthwaite en 1948 generó un modelo que usualmente se aplica para evaluar las condiciones climáticas de aridez y humedad. Para calcular la evaporación potencial incorporó variables como: duración de las horas de luz, temperatura media mensual y una constante empírica. Este modelo se expresa en la ecuación (17)

$$PE = 0.533 \left(\frac{L_d}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^{af} \quad (17)$$

Donde:

PE: Evaporación potencial (mm/día)

Ld: Duración de la luz del día

N: Número de días al mes

Ta: Temperatura media mensual del aire, °C,

I: Suma para doce meses de la función $\left(\frac{T_a}{5}\right)^{1.514}$

Af: Función compleja de la variable I, tal como se expresa en la ecuación (18)

$$at = (6.75 * 10^{-7})I^3 - (7.71 * 10^{-3})I^2 + (1.79 * 10^{-2})I + 0.492 \quad (18)$$

Penman en 1948 genero una expresión para la predicción de la evaporación potencial a través de variables como la humedad relativa, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la radiación neta. Esta expresión se puede ver en la ecuación (19).

$$PE = \frac{\Gamma Q_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta} \quad (19)$$

Donde:

PE: Evaporación potencial (mm/día)

Γ : Pendiente de la curva presión de vapor de saturación vs temperatura (kPa/°C), la cual se puede determinar por medio de la expresión (23)

Q_n : Radiación neta en la superficie (mm/día) se puede calcular por medio de la expresión (24)

η Constante piezométrica igual a 0.06733 kPa/°C

E_a : Expresión que se puede calcular por medio de la ecuación (20) medida en [mm/día]

$$E_a = 2.625(1 + 0.146W_w)(u_{v0}^{aire} - u_v^{aire}) \quad (20)$$

Donde:

W_w : Velocidad del viento (km/h)

$U_v(\text{aire})$: Presión de vapor en el aire sobre la superficie del agua a la temperatura media [kPa]

$U_{v0}(\text{aire})$: Presión de vapor saturado a la temperatura media del aire [kPa], el cual se puede determinar por medio de la expresión) (21)

$$u_{v0}^{aire} = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_a}{T_a + 237.3} \right] \quad (21)$$

Donde:

Ta: Temperatura del aire (°C)

La presión de vapor saturado la podemos hallar a través de la expresión 22

$$u_v^{aire} = u_{v0}^{aire} * h_r \quad (22)$$

Donde:

hr: Humedad relativa del aire (%)

La pendiente de la curva presión de vapor de saturación vs temperatura (kPa/°C), se puede determinar a través de la siguiente expresión:

$$\Gamma = \frac{4098 u_{v0}^{aire}}{(T_a + 237.3)^2} \quad (23)$$

Finalmente, la radiación neta se la puede estimar a través de la expresión

$$Q_n = (1 - r) R_c - \sigma_s T_a^4 \left(0.56 - 0.092 (u_v^{aire})^{0.5} \right) \left(0.10 + \frac{0.90 n}{N} \right) \quad (24)$$

Donde:

r: Coeficiente de reflexión (Unidimensional) igual a 0.2 para una cobertura vegetal con pasto, tomado de Lee 1980.

σ_s Constante de Stefan Boltzman igual a $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJK}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

n/N Relación entre actual y posible horas de brillo

R_c Radiación de onda corta, se puede determinar de acuerdo a la expresión (25)

$$R_c = R_a(0.18 + 0.55 \frac{n}{N}) \quad (25)$$

Donde:

R_a Radiación solar (MJ/m²) /día

Para el cálculo de la evaporación real o actual, (Wilson et al., 1994), retomaron los estudios realizados por Penman para la determinación de la evaporación potencial. Obteniendo como resultado la expresión presentada en la ecuación (26).

$$AE = PE \left[\frac{u_v^{soil} - u_v^{aire}}{u_{v0}^{soil} - u_v^{aire}} \right] \quad (26)$$

Donde:

AE: Evaporación real

PE: Evaporación potencial

U_v(suelo): Presión de vapor en el suelo en la superficie del mismo a temperatura media (kPa)

U_v(aire): Presión de vapor saturado a la temperatura media del aire (kPa)

U_{v0}(suelo): Presión de saturación de vapor en el suelo en el suelo a temperatura media (kPa)

3.5 Pasto Kikuyo

El uso de vegetación es una de las mejores alternativas de mitigación de riesgos asociados a la pérdida de resistencia de los suelos. (Chiaradia et al., 2016) enfatizan el gran efecto que aportan las plantas en procesos de estabilidad de taludes, siendo las raíces las más importantes debido a que proporcionan una resistencia a la tensión que es significativamente alta en comparación a la nula resistencia que es capaz de soportar el

suelo, de esta manera existe un aumento de la resistencia al corte. Aunque el aporte de las raíces no es la única variable a tener en cuenta debido a la vegetación, también se presentan diferentes procesos como es el aporte de la evapotranspiración, la sobrecarga debido a la capa vegetal y los procesos hidrológicos, procesos que influyen en la ganancia de resistencia al corte y en los factores de seguridad asociados (Marín & Osorio, 2016).

La reforestación es una de las actividades más beneficiosas que se debe poner en práctica para prevenir la erosión, ya que el peso de los árboles ayuda como sobrecarga para mejorar efectos de estabilización, aunque este efecto es relativamente pequeño comparado con la fijación que proporcionan las raíces. Así mismo, desde un punto de vista hidrológico, la alta tasa de evapotranspiración de las plantas y de los árboles reduce el contenido de humedad del suelo, lo que conlleva a la reducción de la presión de agua en los poros (Bathurst et al., 2010).

El tipo de planta a utilizar como herramienta de estabilización de taludes depende de su taxonomía y del tipo de suelo que conforma el talud, lo que conlleva a un riguroso análisis de las posibles opciones de vegetación disponible y su efecto en la estabilidad (Gray & Sotir, 1996).

(Huertas et al., 2018) concluyeron que la cobertura vegetal superficial generada por el pasto Kikuyo, en su sistema radicular amarra las partículas del suelo y por su porosidad ayuda a regular la humedad dentro de la masa de suelo. Adicional a lo anterior, el pasto Kikuyo es, dentro de las plantas regionales de Colombia, una de las más eficientes para reducir la erosión.

El pasto Kikuyo, pertenece a la especie (*Pennisetum clandestinum*) es originario de África. En Colombia es una de las gramíneas más comunes y de fácil adaptación en climas con alturas que oscilan ente 1000 msnm y los 3200msnm. Este pasto logra un mejor desarrollo en climas fríos, pero también se adapta a climas templados a expensas de una menor tasa de crecimiento (Hernández, 2004)

Según (Villaneda & Sánchez, 2009) el Kikuyo puede adaptarse en temperaturas que oscilan entre los 16 a 21°C, pero su crecimiento se ve reducido cuando las temperaturas

son menores de 7°C La tabla 2 muestra la clasificación del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Estos datos fueron tomados de la investigación de (Osorio & Roldan, 2006).

Tabla 2 - Clasificación del pasto Kikuyo

Descripción	Valores de referencia
Reino	Vegetal
Clase	Angiosperma
Sub clase	Monocotiledónea
Familia	Gramínea
Genero	<i>Pennisetum</i>
Especie	<i>clandestinum</i>

El pasto Kikuyo se caracteriza por tener ramas rectas del orden de 45 a 60 cm de altura, con raíces que pueden alcanzar hasta 1 m de profundidad. Sus hojas se caracterizan por ser alargadas con una longitud promedio que oscila de los 3 a los 25 cm y un ancho que varía de 1 a 6 mm. Estas características se pueden observar en la figura 15. Este pasto no presenta ningún tipo de restricción en cuanto a la humedad del suelo, pero es más adaptable a suelos poco densos y permeables (García et al., 2014).

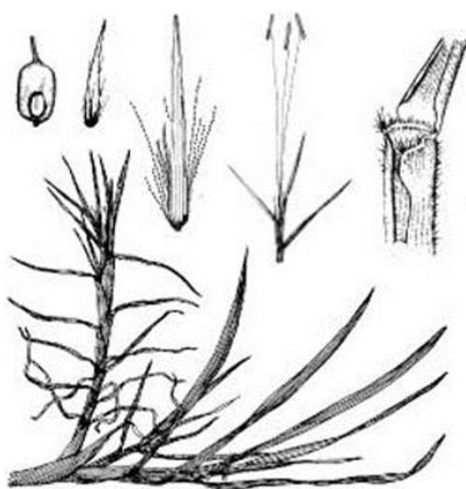


Figura 15 - Pasto el Kikuyo

La fertilización del pasto Kikuyo se puede hacer por vía radicular o por vía foliar. La fertilización foliar se realiza cuando las propiedades nutricionales del suelo son insuficientes, y para garantizar su éxito se deben tener en cuenta tres aspectos importantes el primero es la formulación foliar que está ligada a la concentración del fertilizante, el PH de esta solución y el tamaño de la gota a asperjar. El segundo está relacionado con las variables atmosféricas de la zona, como radiación solar y humedad relativa y, por último, se debe considerar la edad del pasto (Martín & Montico, 2005).

La cantidad de fertilizante a utilizar depende del tipo de planta y de la composición nutricional del fertilizante (Bernal, 2003). El Kikuyo al ser una gramínea presentan un mejor desempeño con presencia de nitrógeno (N), por lo que para su fertilización se puede estimar un mínimo de 150kg de fertilizante por hectárea (Lazarides, Michael, Bernadette, 1993). Aunque en Colombia por el nivel nutricional del suelo se ha establecido que los niveles mínimos de (N) pueden oscilar entre 50Kg y 70Kg por hectárea (Sánchez & Villaneda, 2009).

4 METODOLOGÍA

Para analizar el efecto de la evapotranspiración generada por el pasto (*Kikuyo* (*Pennisetum clandestinum*) en la succión de los suelos granulares, se planteó la metodología que se muestra en la figura 16, la cual se divide en cuatro etapas.

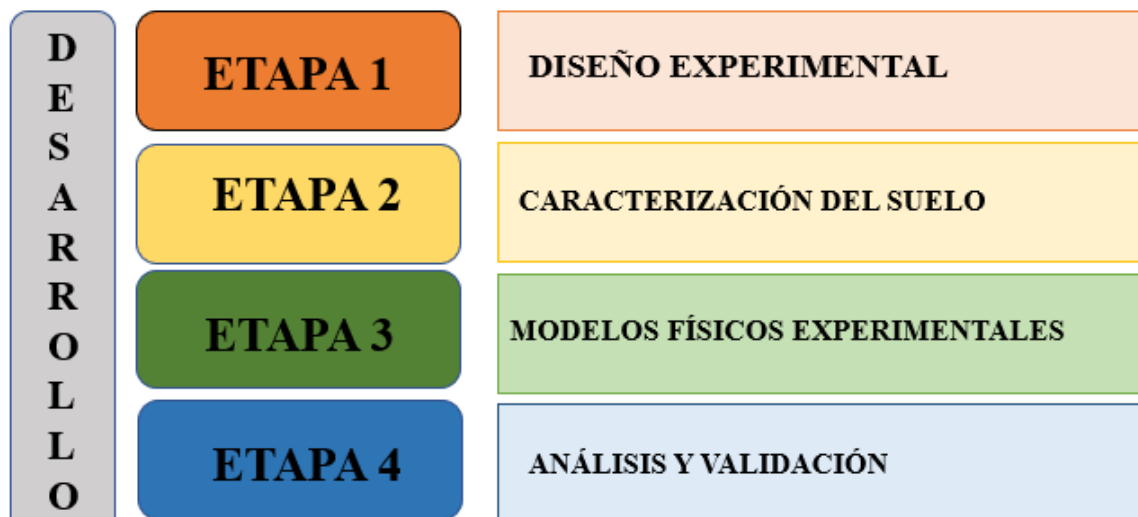


Figura 16 - Metodología de investigación

4.1 Etapa 1: Diseño experimental

Esta primera etapa de investigación se divide en tres partes. La primera de ella corresponde al diseño del modelo físico experimental, la segunda consiste en la adecuación del sistema de datos existente y por último una etapa de pruebas.

4.1.1 Diseño físico experimental

El diseño de los modelos físicos experimentales partió de dos premisas, la primera de ellas en utilizar los elementos e insumos disponibles en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la segunda en alimentar el pasto por capilaridad para controlar el ingreso de agua al sistema.

4.1.2 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos fue modificado de uno existente, el cual hacía parte del proyecto de convocatoria interna 2019 “Estudio de la influencia de las plantas en el aumento de resistencia al corte aplicado a la estabilidad de taludes, modelación física y numérica “. El sistema de adquisición inicial consistía de dos tarjetas Advantech para captar y suministrar las lecturas de los sensores de humedad, un regulador de voltaje y una fuente de poder. En la figura 17 se puede observar el sistema de adquisición de datos inicial.

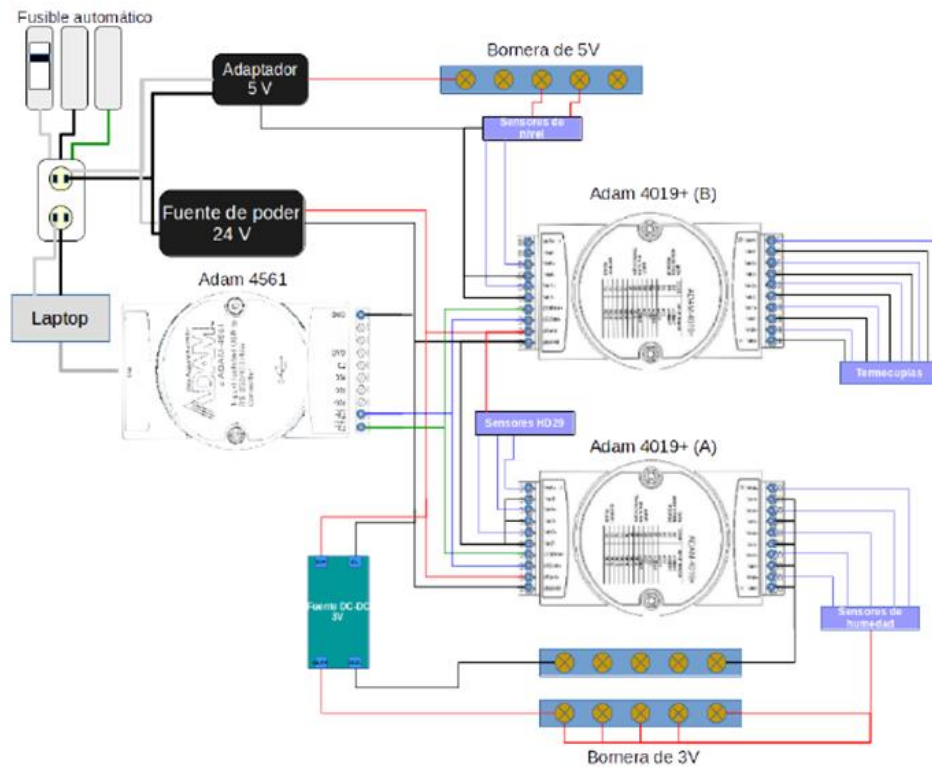


Figura 17 - Sistema de adquisición de datos

Para modificar el sistema de adquisición de datos actual se realizaron las siguientes actividades.

- Prueba de conectividad a los elementos del sistema.
- Remplazo de reguladores de voltaje

- Retiro de borneras de 5 voltios
- Instalación de regulador de corriente
- Instalación de sensores de humedad volumétrica EC-5
- Modificación al programa Labview de visualización de datos

4.1.3 Pruebas

Se realizaron pruebas a las columnas de acrílico para evitar fugas, a los frascos de Mariotte para garantizar la altura y permanencia del nivel freático y al sistema de adquisición de datos para verificar y recopilar de forma continua el cambio de humedad durante el tiempo de permanencia de los modelos.

4.2 Etapa 2: Caracterización del suelo.

Esta etapa se desarrolló en dos pasos, el primero consistió en escoger dos suelos con granulometrías diferentes que pudieran alcanzar una altura capilar mínima de 90cm, y el segundo paso consistió en determinar las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos escogidos. La figura 18 muestra el diagrama de flujo seguido para escoger los dos tipos suelos para el análisis.

Los ensayos de caracterización física e hidráulica realizados se desarrollaron en el laboratorio de suelos y pavimento de la Escuela Colombiana de Ingeniera Julio Garavito, los cuales se enlistan a continuación:

- Determinación del tamaño de las partículas del suelo (INVIAS E123-13).
- Determinación de la humedad natural del suelo (INVIAS E122-13).
- Determinación de la gravedad específica del suelo utilizando el método del picnómetro (INVIAS E128-13).
- Determinación de la densidad suelta y compacta del suelo (INVIAS E217-13)
- Relación de humedad – peso unitario seco en suelos (INVIAS E141-13)
- Determinación de la succión de un suelo usando WP4C (ASTM D6836)
- Determinación de la conductividad hidráulica del suelo (INVIAS E130-13)

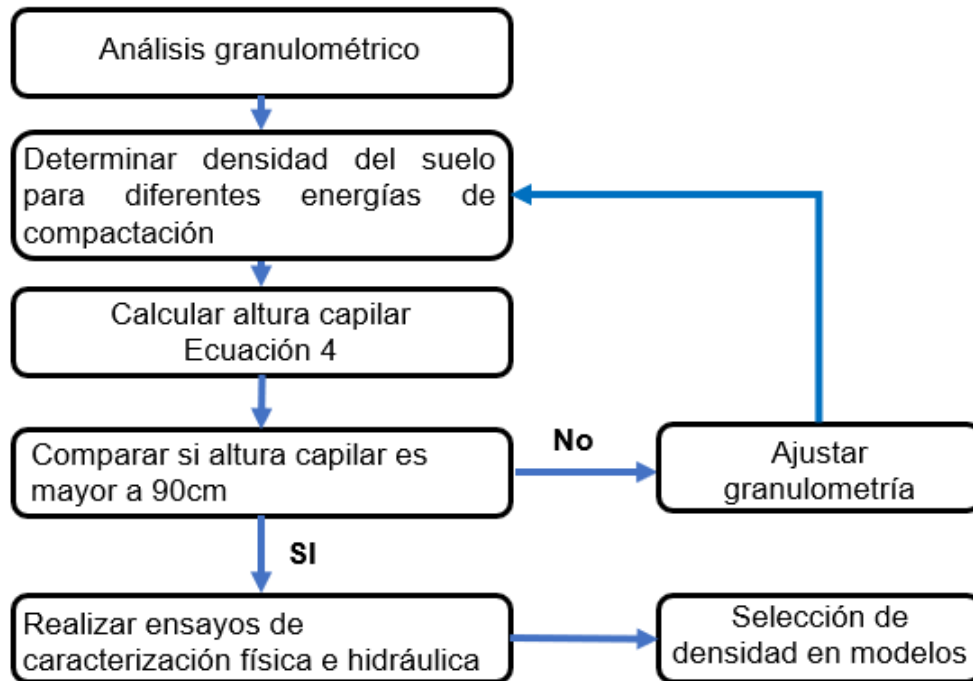


Figura 18 - Diagrama de flujo para selección de suelo

4.3 Etapa 3: modelos físicos experimentales

Esta etapa se desarrolló en cuatro pasos, el primero de ellos consistió en la calibración de los sensores de humedad EC-5, el segundo en la preparación de las muestras, el tercero en escoger el nutriente adecuado para el pasto y, por último, el montaje y la instalación de sensores de humedad en los modelos. En esta última subetapa se registra el cambio de la humedad volumétrica por efecto de la evapotranspiración y de la evaporación. Adicionalmente se instaló un tanque evaporímetro clase A para determinar la evapotranspiración potencia por efecto de la evaporación de una superficie de agua. Se registra la cantidad de agua que ingresa en el sistema a través de los frascos de Mariotte. Por último, se tomaron datos atmosféricos de la estación meteorológica Guaymaral ubicada dentro del campus de la escuela durante los tiempos de permanencia de los modelos.

4.4 Etapa 5: análisis y validación.

En esta etapa se hizo el análisis y comparación técnica de los resultados obtenidos en los modelos físicos experimentales con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados. Así mismo, se hizo una revisión bibliografía para validar la información encontrada.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Diseño experimental de un modelo de columna de suelo

El modelo físico experimental consta de dos columnas de acrílico totalmente idénticas y en cuyo interior alberga dos muestras de suelo con las mismas características, a las dos columnas de suelo se le instalaron tres sensores de humedad volumétrica ubicados a diferentes alturas, el primero a los 10cm, el segundo a los 30cm y el tercero a los 70cm. Las alturas de análisis son medidas desde la superficie de los modelos. Los sensores de humedad volumétrica son de tipo EC-5 de la empresa Metergroup los cuales determinan el contenido de humedad volumétrica del suelo en un rango de medida desde 0% a 100% VWC. Estos sensores tienen una exactitud de 1-2% en medios porosos y un tiempo de respuesta de 10ms.

Como se dijo anteriormente, el modelo está compuesto de dos columnas. La columna de suelo 1 fue sembrada con pasto Kikuyo mientras que la columna 2 no, es decir, solo almacena suelo. Esto se debe a que en la columna 1, se registró el cambio de humedad volumétrica generado por el efecto de la evapotranspiración (transpiración + evaporación real) y en la columna 2, se registró el cambio en la humedad volumétrica generado por el efecto de la evaporación real. Adicionalmente, ambas columnas de suelo estuvieron conectadas a dos frascos de Mariotte cuya función es mantener un nivel freático constante y a un sistema de adquisición de datos que recopilara la información suministrada por los sensores de humedad con una periodicidad de 15 minutos durante los 90 días de permanencia de los modelos. En la figura 19 se muestra el modelo físico experimental propuesto y el modelo físico instalado.

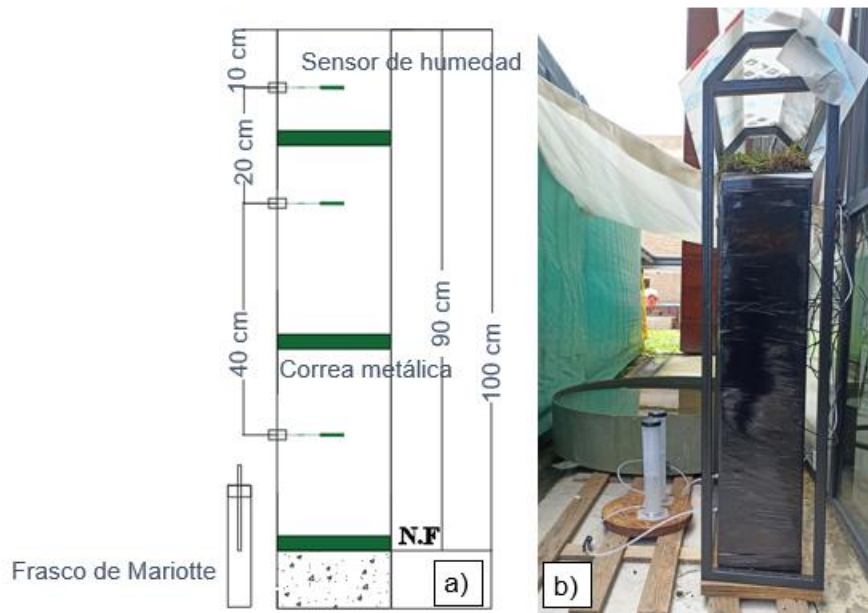


Figura 19 - Modelo físico experimental propuesto; a) diseño modelo físico; b) modelo físico instalado.

5.1.1 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos consiste en dos tarjetas de adquisición marca ADAM Advantech, las cuales envían la información a un computador portátil que registra los datos arrojados por los sensores de humedad volumétrico con una periodicidad de 15 minutos.

Las modificaciones realizadas al sistema de adquisición de datos inicial, se iniciaron una vez se probaron el estado de los dispositivos que lo componen. Como primera medida se revisó continuidad de corriente y voltaje en todos los elementos del tablero, se realizó el retiro de bornera eléctricas para conexión de sensores con voltaje de entrada de 3V, cambio de regulador de voltaje, conexión de sensores de humedad volumétrica, y ajuste al programa LabVIEW para toma de datos y visualización de la información. En la figura 20a se observa el sistema de adquisición de datos final y en la figura 20b el programa en LabVIEW para el registro y visualización de la información.

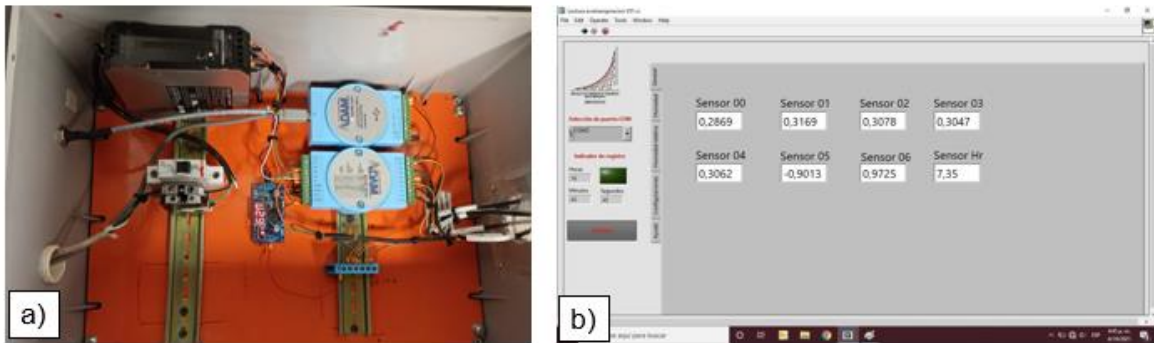


Figura 20 - Sistema de adquisición de datos; a) sistema de adquisición de datos final; b) programa en LabVIEW para el registro y visualización de la información.

5.1.2 Pruebas

Las pruebas realizadas al modelo y al sistema de adquisición de datos consistieron en verificar que las columnas de acrílico se encontraran completamente selladas, para lo cual se llenaron con agua hasta un nivel establecido, las columnas permanecieron con agua durante un periodo de tres días, tiempo durante el cual no se evidencio filtraciones.

La prueba al sistema de adquisición de datos consistió en tomar lecturas con los sensores de humedad utilizando una muestra de suelo granular expuesta a diferentes contenidos de humedad volumétrica durante un periodo de 24 horas.

Finalmente, los frascos de Mariotte se conectaron a las columnas de acrílico, se fijó un nivel de agua en los acrílicos y se procedió a reducir la altura del agua en las columnas para evidenciar el proceso de llenado de las mismas a través de los frascos de Mariotte. La figura 21 muestra un testigo de las pruebas realizadas.

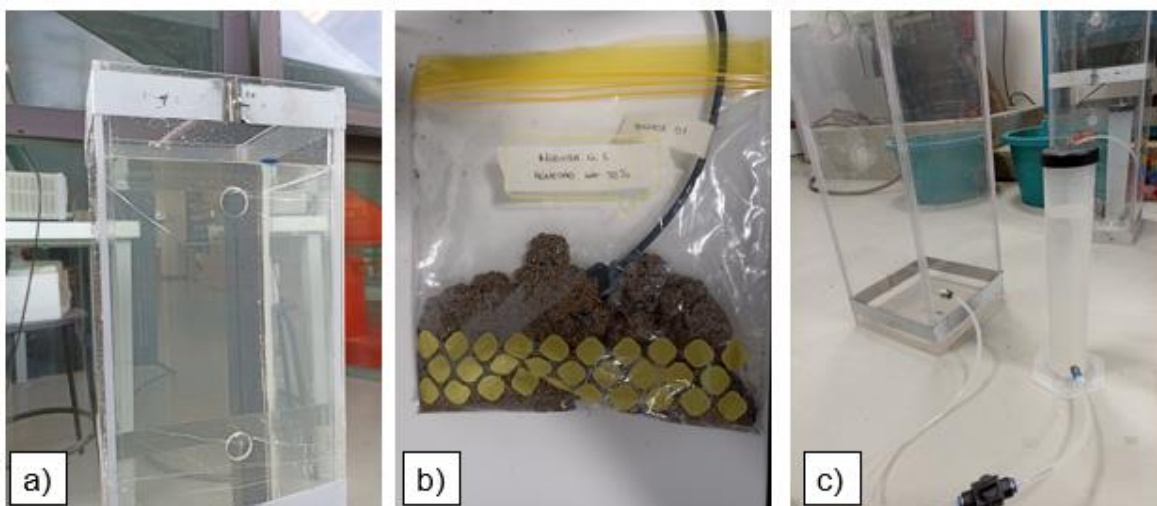


Figura 21 - Pruebas sobre los elementos del sistema; a) Prueba de filtración sobre columna de acrílico; b) prueba de lectura en sensores de humedad volumétrica; c) prueba en frascos de Mariotte.

5.1.3 Caracterización del suelo

5.1.3.1 Determinación de la densidad de compactación en los modelos

Los suelos escogidos para el análisis se determinaron a partir de su granulometría, altura capilar y densidad de compactación. Los ensayos realizados se determinaron de acuerdo con los lineamientos establecidos en las normas INVIAS y ASTM. Para el cálculo de la altura capilar se tomó como referencia la ecuación (4). Se determinó experimentalmente variables como el diámetro por el cual pasa el 10% del material (D_{10}) y coeficiente de uniformidad (Cu), parámetros encontrados a partir de la curva granulométrica (INV E123). La relación de vacíos se calculó a través de relaciones de fases, considerando la gravedad específica del suelo (INV E128) y la humedad natural (INV E122). Las propiedades índices del suelo se calcularon considerando tres valores de densidad encontrados aplicando diferentes métodos de compactación.

En la figura 22 se presenta las curvas granulométricas de los suelos que serán utilizados en la elaboración de los modelos físicos experimentales.

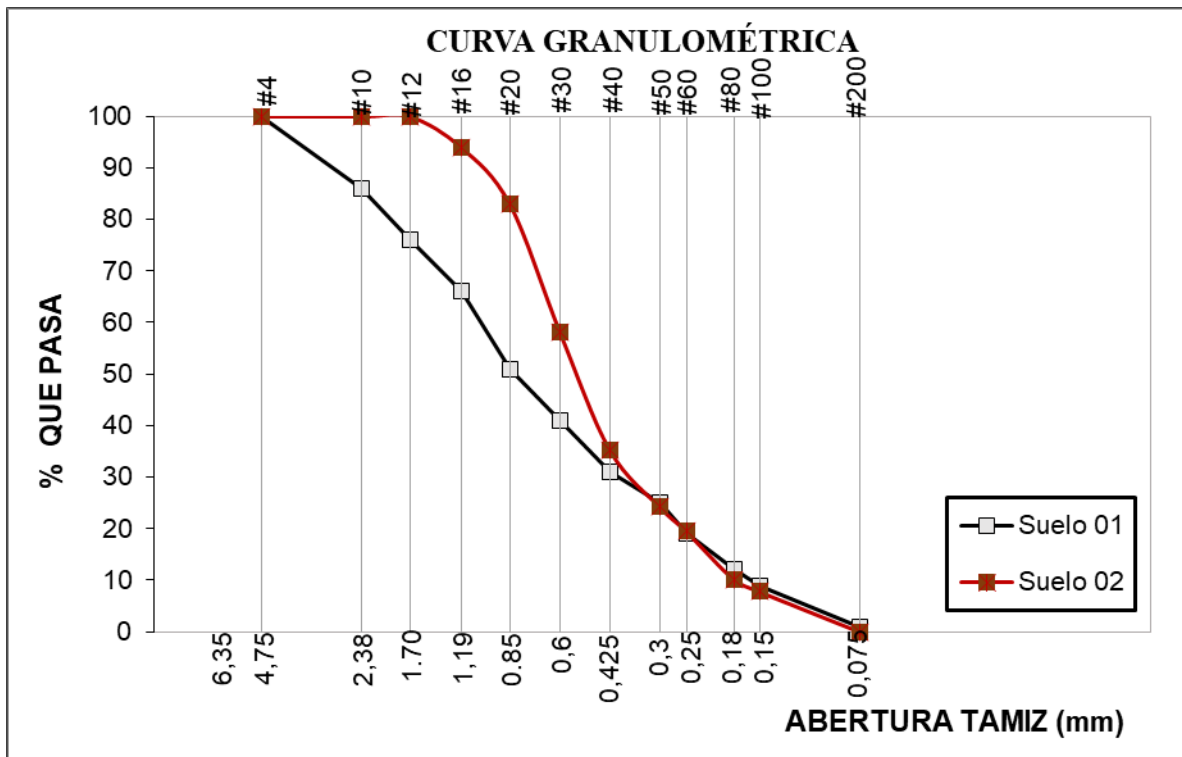


Figura 22 - Curva granulométrica de los suelos de análisis.

El suelo 1 se clasifica como una arena bien gradada (SW) y el suelo 2 como una arena mal gradada (SP), las clasificaciones se realizaron de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). En la tabla 3 se observan los parámetros obtenidos de la curva granulométrica.

Tabla 3 – Parámetros de la curva granulométrica

Parámetros	Suelo 1	Suelo 2
D ₁₀ (mm)	0.16	0.18
D ₃₀ (mm)	0.40	0.37
D ₆₀ (mm)	1.05	0.62
C _u	6.59	3.49
C _c	1.21	0.97
Clasificación	SW	SP

La primera densidad, nombrada como densidad suelta o por paladas se determinó mediante el procedimiento establecido en la norma (INV E217), este método de compactación es al que llamaremos método (A), el cual consiste en dejar caer el material libremente desde una altura de 5cm de la superficie de un recipiente con volumen conocido.

La segunda densidad se determinó para un estado más compacto, utilizando el método de punzonamiento con varilla (norma INV. E217), este método es al que llamaremos método (B), en este proceso el suelo fue compactado en un recipiente de volumen conocido en tres capas y a cada capa se le aplico un punzonamiento del suelo con una varilla de punta redonda de 16mm de diámetro. Por último, la tercera densidad se determinó siguiendo el procedimiento del ensayo normal de compactación (INV 141), método (C), en el cual, el suelo fue sometido a una energía de compactación de 600kN-m/m³, y fue compactado en tres capas y cada capa con 25 golpes de un martillo de masa de 4.54kg que se deja caer desde una altura de 30cm.

En la tabla 4 se muestra las propiedades índices determinadas por relaciones de fases para los diferentes métodos de compactación de los suelos, las siglas A, B y C corresponden a los métodos de compactación utilizados para variar la densidad del suelo.

Tabla 4 - Propiedades índices de los suelos para los diferentes métodos de compactación.

Propiedades	Suelo 01			Suelo 02		
	A	B	C	A	B	C
Humedad gravimétrica(%)	0.03	0.03	0.90	0.01	0.01	1.00
Densidad del agua (g/cm ³)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Gravedad específica	2.65	2.65	2.65	2.64	2.64	2.64
Densidad bulk (g/cm ³)	1.45	1.70	1.82	1.37	1.56	1.69
Relación de vacíos	0.45	0.40	0.38	0.60	0.50	0.46
Saturación (%)	0.13	0.16	5.16	0.03	0.04	4.65
Humedad volumétrica (%)	0.05	0.06	1.62	0.01	0.01	1.67
Densidad seca (g/cm ³)	1.45	1.70	1.80	1.37	1.56	1.67
Altura capilar teórica (cm)	97.44	109.61	115.38	97.85	117.42	127.63

En la figura 23 se presenta un registro fotográfico de la determinación del tamaño de las partículas por el método de tamizado, ensayo normal de compactación y gravedad específica. Ensayos necesarios para definir la densidad y método de compactación en los modelos.



Figura 23 - Ensayos de caracterización del suelo; a) análisis granulométrico; b) ensayo normal de compactación; c) determinación de la gravedad específica del suelo.

En la figura 24 se muestra la relación entre la densidad seca determinada con los diferentes métodos de compactación y la altura capilar teórica.

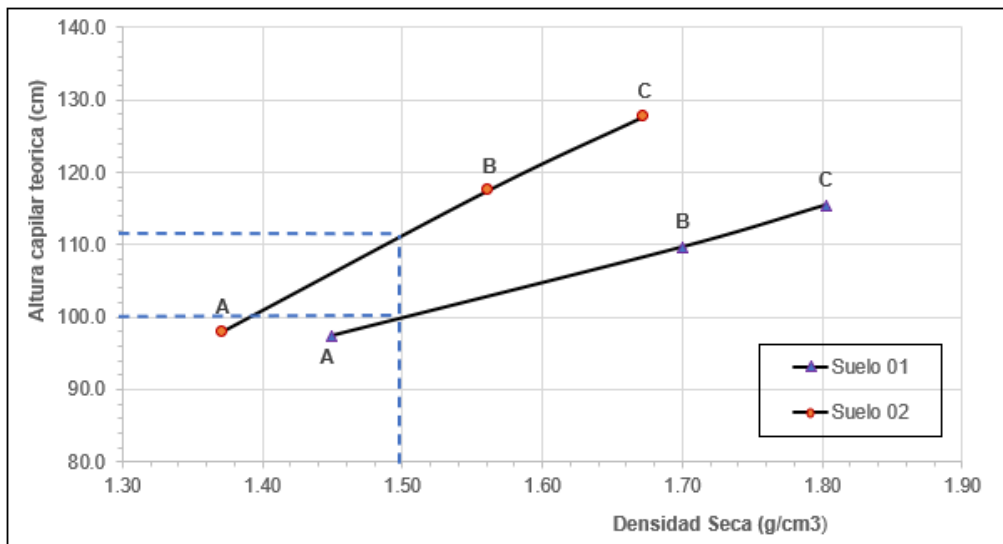


Figura 24 - Curva densidad seca contra altura capilar teórica

De la figura 24 se definió una densidad seca de compactación para los modelos de 1.5 g/cm³, con la cual, se logra alturas capilares de 100cm para el suelo 1 y 111 cm para el suelo 2, altura suficiente para garantizar la alimentación del pasto por capilaridad. Adicionalmente, esta densidad seca permitió alcanzar porosidades del 39% y 41% para el suelo 1 y 2 respectivamente, valores que están en congruencia con (García et al., 2014) quienes afirman que el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) alcanza un mejor desarrollo en suelos pocos densos, permeables y porosos.

5.1.3.2 Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos

Las propiedades índices se determinaron a partir de relaciones de fases, tomando como valores de entrada el volumen de la columna de acrílico, densidad seca de compactación y gravedad específica del suelo. La tabla 5 muestra las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos analizados. Adicionalmente, se realizó un ensayo de permeabilidad saturada para los suelos 1 y 2 manteniendo una densidad seca constante de 1.5g/cm³. La figura 25 muestra el proceso del ensayo.

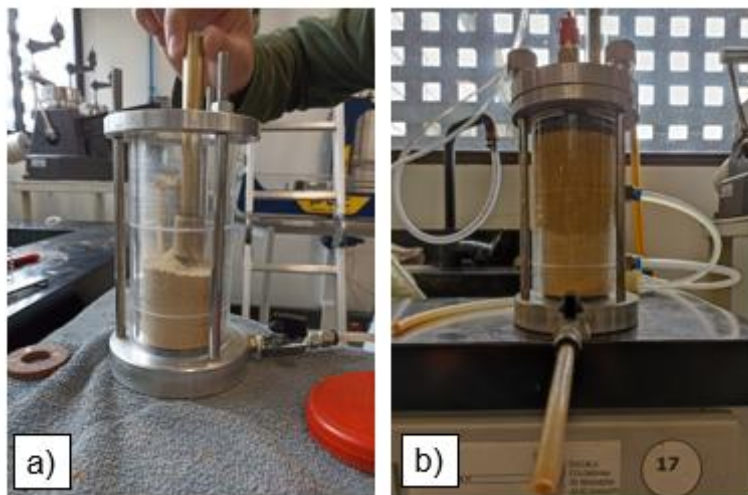


Figura 25 - Ensayo de permeabilidad saturada; a) compactación de la muestra en permeámetro; b) saturación de la muestra en permeámetro.

Tabla 5 - Propiedades físicas e hidráulicas de los suelos de análisis

Descripción	Suelo 1	Suelo 2
Humedad gravimetrica (%)	28.93	30.20
Humedad volumetrica residual (%)	0.24	0.24
Humedad volumetrica de saturación (%)	43.30	45.30
Gravedad específica	2.65	2.64
Densidad bulk (g/cm ³)	1.93	1.93
Densidad seca (g/cm ³)	1.50	1.50
Porosidad (%)	43.30	45.30
Saturación (%)	100.00	100.00
Permeabilidad saturada (cm/s)	0.13	0.15

5.1.3.3 Curva de retención de humedad

La curva de retención de humedad se determinó con el Psicómetro de punto de rocío WP4C, este equipo permite determinar la succión en un rango de 0.01 a 300 Mpa y una precisión de ± 0.01 Mpa.

Para la elaboración de la curva, se prepararon tres muestras diferentes con una densidad de 1.5 g/cm³. Como se explicó en la sección 3.3, la curva presenta un comportamiento diferente dependiendo del ciclo en que se encuentra (humedecimiento o secado). Las muestras se prepararon con una humedad cercana a la humedad de saturación. La succión se determinó siguiendo el camino de histéresis que presentan este tipo de curvas.

Para la rama húmeda, la humedad gravimétrica inicial del suelo 1 fue de 36.6% y para el suelo 2 de 32.9%. Las muestras se sometieron a un proceso de secado a temperatura ambiente durante un periodo de 2 horas. Para cada lectura de succión se determinó la humedad de la muestra como la diferencia en peso por pérdida de la masa de agua. Este procedimiento se repitió hasta que la muestra llegó una humedad constante cercana a su humedad residual. Por último, las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C y para este último punto se registró la succión y humedad de la muestra.

La rama seca inició con las muestras con humedad residual. Para cada punto de humedad se registró su valor de succión. Por tanto, se adiciona agua a las muestras para variar su contenido de agua, antes de tomar el registro de succión se permitió un tiempo de curado de 3 horas para que la humedad sea homogénea en toda la muestra. El procedimiento se continuó hasta llegar a un valor cercano a la humedad de saturación. En la figura 26 se muestra la preparación de las muestras y la determinación de succión.



Figura 26 - Registro de humedad y succión; a) preparación de muestra de suelo; b) lectura de succión en WP4C; c) chequeo del contenido de humedad.

Los valores experimentales de las curvas de retención de humedad volumétrica de los suelos 1 y 2, se reportan en el anexo 6. Con dichos valores se procedió a determinar la curva de ajuste utilizando el software RECT de la empresa PC-PROGRESS que utiliza el modelo de regresión de Van Genuchten explicado en la sección 3.3.2. Los resultados de las iteraciones realizadas para encontrar los parámetros de ajuste se encuentran reportadas en el anexo 7 de este documento.

En la tabla 6 se presentan los parámetros de ajustes al final de la iteración del programa RECT para la construcción de la curva de retención de humedad para los suelos de análisis. De igual forma en la figura 27 se muestra la curva de retención de humedad ajustada del suelo 1 y en la figura 28 la curva de retención de humedad ajustada para el suelo 2.

Tabla 6 - Parámetros finales de ajustes de la curva de retención de humedad

Parámetros	Suelo 1		Suelo 2	
	Rama húmeda	Rama seca	Rama húmeda	Rama seca
Humedad residual (%)	0.24%	0.24%	0.24%	0.24%
Humedad saturación (%)	43.30%	43.30%	45.30%	45.30%
m	0.257	0.195	0.246	0.267
n	1.3452	1.242	1.326	1.365
a (kPa ⁻¹)	0.486	0.533	7.174	6.775

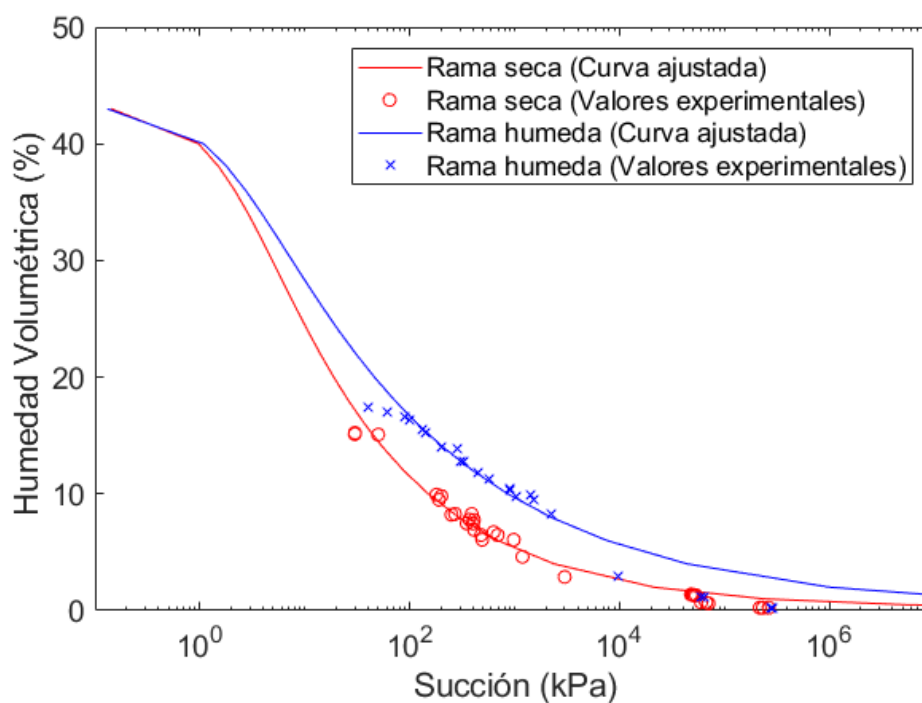


Figura 27 - Curva de retención de humedad ajustada para el suelo 1

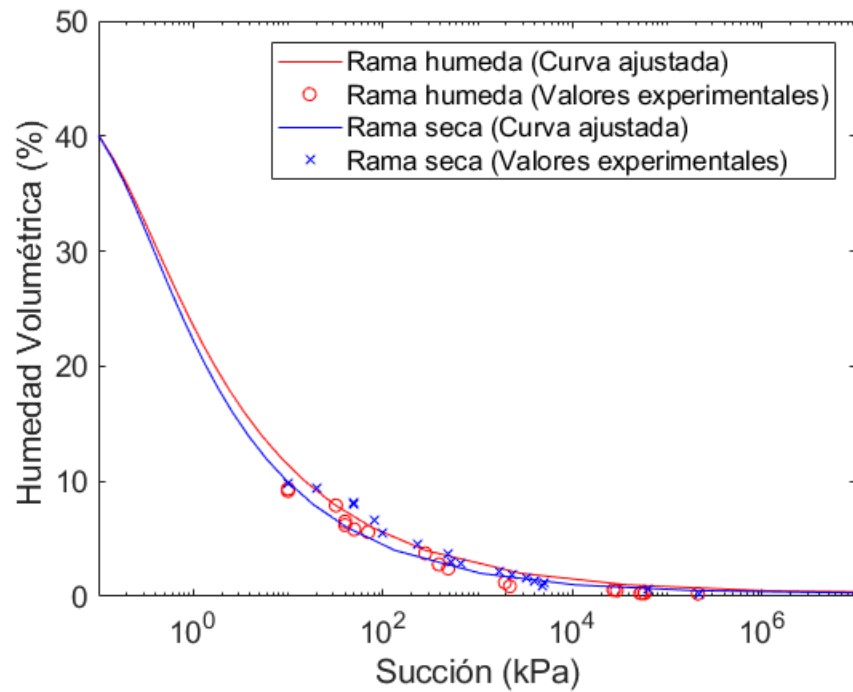


Figura 28 - Curva de retención de humedad ajustada para el suelo 2

5.1.4 Modelos físicos experimentales

5.1.4.1 Calibración sensores de humedad volumétrica

Los sensores de humedad volumétrica se calibraron para los dos suelos de acuerdo a la relación existente entre la humedad gravimétrica y la humedad volumétrica del suelo, tal y como se observa en la expresión (27).

$$\theta = \rho_d * \omega(\%) \quad (27)$$

Se prepararon 6 muestras de suelos con humedades gravimétricas de 0.2%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. La densidad seca de las muestras es de 1.5 g/cm³. Dado lo anterior se obtuvieron valores de humedad volumétrica del suelo en (m³/m³) del orden de 0.03, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75.

Las muestras de suelo fueron sometida a un periodo de curado de 3 horas para garantizar humedad homogénea y se procedió a tomar lecturas de los sensores de humedad volumétrica del suelo EC-5 en mV. Adicionalmente, se preparó una muestra de agua para

tener el último punto de la curva de calibración que corresponde a una humedad volumétrica de 1 m³/m³. El proceso de preparación de muestras, y lectura de humedad volumétrica con los sensores EC-5 se observa en la figura 29.

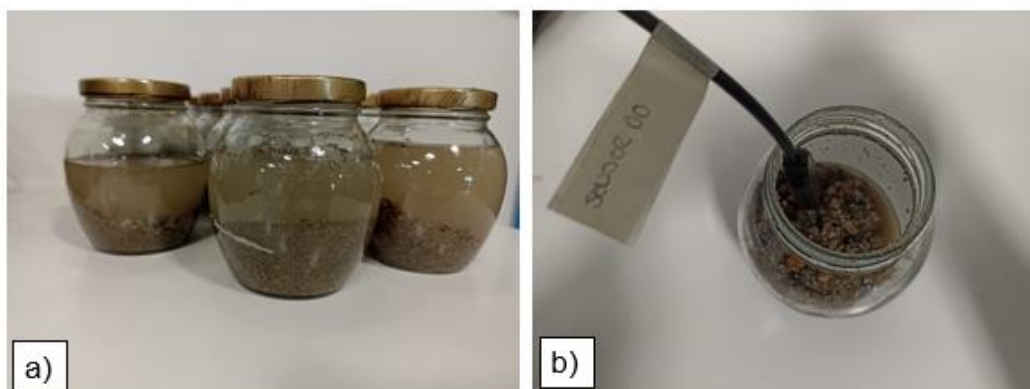


Figura 29 - Calibración de sensores; a) curado de muestras; b) lectura de sensor de humedad volumétrica del suelo EC-5.

En las tablas 7 y 8 se observan los valores medidos en (mv) de los sensores de humedad EC-5 para diferentes valores de humedad volumétrica usando el suelo 1 y 2.

Tabla 7 - Lectura de sensores de humedad para diferentes contenidos de humedad volumétrica para el suelo 1

Lectura sensores (mV)	Humedad volumetrica del suelo (%)						
	0.3	15	30	45	60	75	100
Sensor 00	0.361	0.441	0.536	0.606	0.657	0.708	0.908
Sensor 01	0.368	0.405	0.554	0.684	0.731	0.785	0.911
Sensor 02	0.354	0.407	0.547	0.593	0.648	0.703	0.917
Sensor 03	0.354	0.385	0.575	0.578	0.696	0.717	0.918
Sensor 04	0.340	0.367	0.545	0.584	0.674	0.700	0.938
Sensor 05	0.358	0.382	0.593	0.623	0.716	0.754	0.972

Tabla 8 - Lectura de sensores de humedad para diferentes contenidos de humedad volumétrica para el suelo 2

Lectura sensores (mV)	Humedad volumetrica del suelo (%)						
	0.3	16	30	47	59	76	100
Sensor 00	0.332	0.396	0.484	0.556	0.598	0.679	0.908
Sensor 01	0.361	0.439	0.494	0.655	0.692	0.758	0.913
Sensor 02	0.351	0.417	0.525	0.618	0.654	0.733	0.917
Sensor 03	0.354	0.385	0.575	0.578	0.696	0.717	0.918
Sensor 04	0.349	0.400	0.501	0.626	0.642	0.719	0.938
Sensor 05	0.386	0.422	0.576	0.638	0.675	0.770	0.972

Las figuras 30 y 31 presentan la curva de calibración de los sensores de humedad volumétrica del suelo 1 y suelo 2 respectivamente.

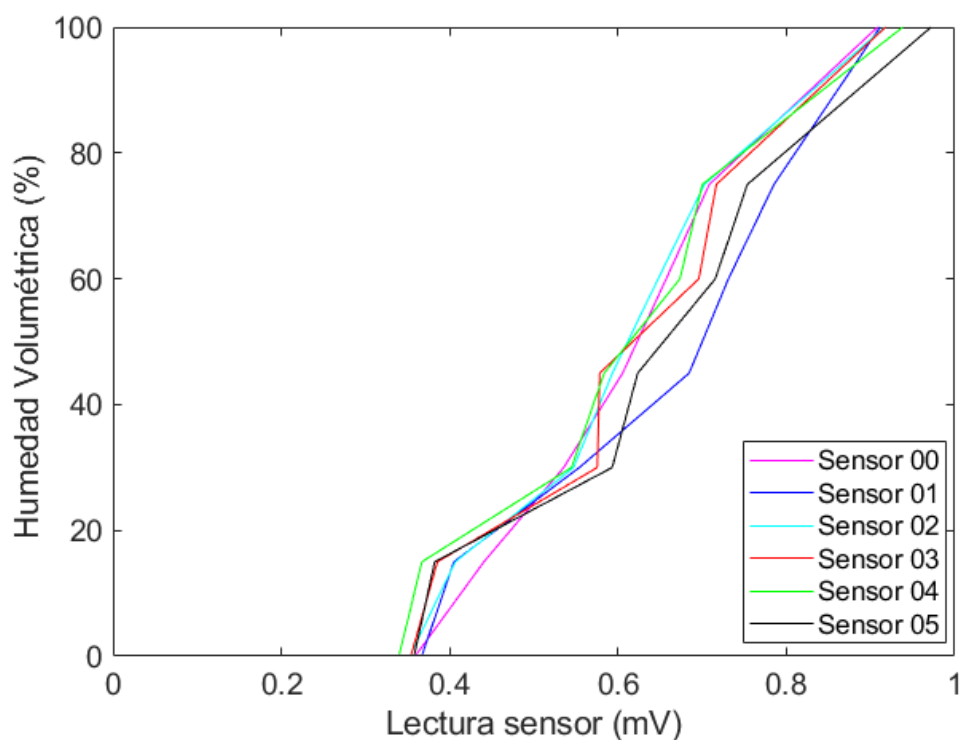


Figura 30 - Curva de calibración sensores de humedad volumétrica para el suelo 1

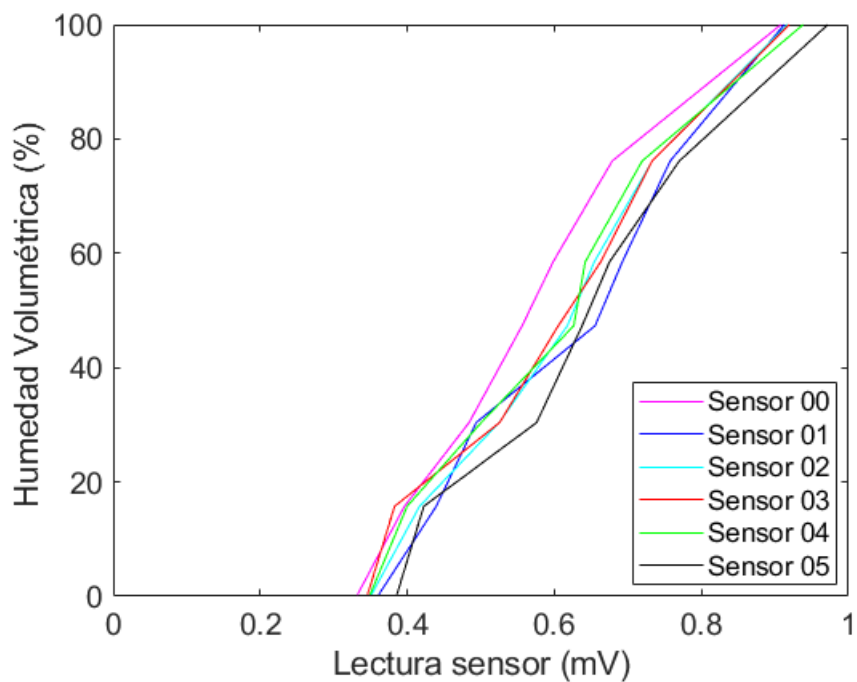


Figura 31 - Curva de calibración sensores de humedad volumétrica para el suelo 2

En las figuras 30 y 31, se observa que la tendencia de las curvas de calibración se puede representar como líneas polinómicas de segundo orden y que se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\theta \left(\frac{m^3}{m^3} \right) = ax^2 + bx + c \quad (28)$$

Tabla 9 - Constantes de ajuste para curva de calibración de sensores de humedad volumétrica.

	Suelo 01		Suelo 02			
	a	b	a	a	b	c
Sensor 00	-0.579	2.627	-0.894	-1.404	3.519	3.519
Sensor 01	0.150	1.586	-0.570	1.365	0.006	0.134
Sensor 02	0.556	2.514	-0.817	0.359	2.243	0.740
Sensor 03	0.104	1.608	-0.546	0.162	1.920	-0.613
Sensor 04	-0.315	2.049	-0.627	-0.703	2.594	-0.804
Sensor 05	0.162	1.382	-0.473	-0.473	2.332	-0.803

Dado lo anterior, y debido a la dispersión que presentan las curvas de calibración se opta por trabajar con curvas de calibración individual para cada sensor y para cada tipo de suelo. La tabla 9 presenta los valores de las constantes a, b y c para las curvas de calibración de los sensores de humedad volumétrica.

5.1.4.2 Preparación de muestras para montaje de modelos

Se preparó aproximadamente 130kg de material por modelo, dos modelos en total. El modelo 1 contiene el suelo clasificado como arena bien gradada con relación de vacíos de 0.45 y el modelo 2 contiene el suelo clasificado como arena pobremente gradada con relación de vacíos de 0.50.

La preparación del material consistió en un proceso de lavado por el tamiz No.200 utilizando el procedimiento descrito en la norma INVIAS E214-13, posteriormente se procedió a separar el material por tamaños, utilizando los tamices utilizados en el análisis granulométrico. Por último, se ajustó la granulometría de los suelos 1 y 2 con la escogida en la sección 5.2.1, la cual, cumple con la altura capilar requerida para alimentar el pasto. La figura 32 presenta el proceso de preparación y reconstitución de muestras.

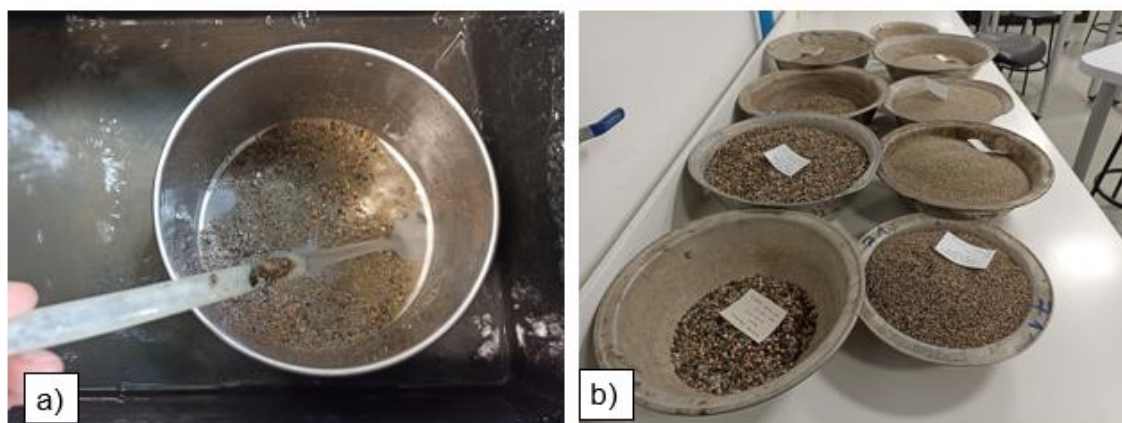


Figura 32 - Preparación de muestras; a) lavado de material; b) separación del suelo por rango de tamaños.

5.1.4.3 Dosificación del fertilizante

El pasto Kikuyo es una gramínea, por tanto, su alimentación debe estar basada principalmente en nitrógeno (N) como nutriente principal. Además, se debe acompañar

este nutriente con elementos menores como magnesio, calcio y zinc. La tabla 10 muestra los componentes y las proporciones del fertilizante escogido.

Tabla 10 - Composición del fertilizante

Descripción	Referencia
Nitrogeno total (g/l)	300.00
Calcio soluble en agua (g/l)	54.00
Magnesio soluble en agua (g/l)	38.00
Zinc en agua (g/l)	11.00

La dosificación, se escogió con base a las recomendaciones dadas por el manual de Gramíneas y leguminosas forrajeras en Colombia del Instituto colombiano agropecuario (ICA) en el cual, se afirma que el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) presenta buena respuesta ante nitrógeno (Urea) en dosificación entre 50 y 75 kg/ha. Con base a lo anterior, y tomando las características del nutriente relacionadas en la tabla 10. La dosificación calculada a partir del área de la columna de suelo es de 5 g de fertilizante por litro de agua. La solución compuesta por agua y fertilizante en las proporciones antes relacionadas fue la utilizada garantizar un nivel freático de 10cm en el sistema y de esta forma alimentar el pasto por ascensión capilar. El control de fertilizante se realizará a través de los frascos de Mariotte adaptados al sistema.

5.1.4.4 Montaje de los modelos físicos y experimentales

Se instalaron y analizaron dos modelos en total, el modelo 1 que alberga al suelo clasificado como arena bien gradada (SW) y el modelo 2 que alberga el suelo clasificado como arena pobremente gradada (SP). La permanencia de cada modelo es de 90 días calendario. Adicionalmente, se instaló un tanque evaporímetro clase A con el fin de monitorear y determinar la evapotranspiración potencial que se puede presentar en la zona de estudio. La tabla 11 muestra la nomenclatura utilizada para la instalación y construcción de los modelos físicos experimentales.

Tabla 11 - Descripción física de los modelos

Descripción	Tipo de suelo	Columna tipo	Referencia Sensor	Nomenclatura
Modelo 1	SW	Columna con pasto	Sensor 02	CCP 10cm
			Sensor 04	CCP 30cm
			Sensor 01	CCP 70cm
		Columna sin pasto	Sensor 03	CSP 10cm
			Sensor00	CSP 30cm
			Sensor 05	CSP 70cm
Modelo 2	SP	Columna con pasto	Sensor 00	CCP 10cm
			Sensor 01	CCP 30cm
			Sensor 03	CCP 70cm
		Columna sin pasto	Sensor 02	CSP 10cm
			Sensor 04	CSP 30cm
			Sensor 05	CSP 70cm

Los modelos se ubicaron al respaldo del laboratorio de suelos y pavimentos dentro de las instalaciones de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garabito, donde también se encuentra ubicada la estación meteorología Guaymaral a una distancia aproximada de 600 metros del punto de adquisición de datos. De esta estación se tomaron las variables atmosféricas en los tiempos de permanencia de cada uno de los modelos.

El suelo 1 se compactó en estado suelto con una densidad seca promedio de 1.498 g/cm³, para lo cual, se depositó en nueve capas de aproximadamente de 10cm de espesor, en cada capa el suelo se vertió libremente desde una altura de 5cm.

El suelo 2 se compacto en la misma cantidad de capas, pero aplicando una energía de compactación diferente que consistió en punzar el suelo 15 veces por capa, con una varilla punta redonde de 16mm de diámetro. La densidad seca de compactación medida para el suelo 2 fue de 1.501 g/cm³.

Se cubrió las columnas de acrílico con un plástico negro para reducir el efecto de la exposición del suelo a la radiación solar y se agregó agua a través de los frascos de

Marriote hasta lograr que el material alcance un equilibrio hídrico por efecto por el ascenso de agua por capilaridad.

La siembra del pasto consistió en recortar un área de 20cmx20cm de pasto Kikuyo, el cual crece como maleza en la zona verde de la Escuela Colombiana de Ingeniera, se remueve ligeramente la superficie del suelo y se trasplanta el pasto a la columna de suelo destinada para medir la evapotranspiración, se adiciona 250ml de la solución de trabajo (agua + fertilizante) a la superficie del suelo para garantizar su arraigamiento y posteriormente, se instalaron los sensores de humedad en las alturas descritas en la tabla 11 y se inicia con el registro de la humedad volumétrica en un lapso de cada 15 minutos durante 90 días calendario. Durante este tiempo se registra la cantidad de agua que ingresa al sistema que se cuantifica a través de los frascos de Mariotte y que se reportaron en el anexo 15 y la altura de la película de agua en el tanque evaporímetro reportada en el anexo 14. En la figura 33 se muestra el proceso de compactación de las columnas de suelo.

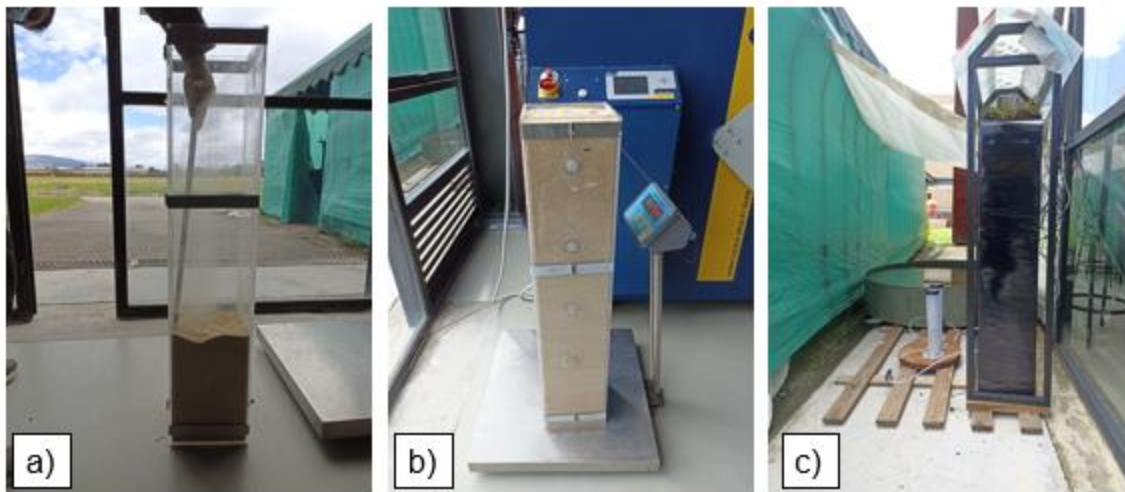


Figura 33 - Modelos físicos experimentales; a) compactación y colocación de los suelos en las columnas de acrílico, b) determinación de la masa del suelo para cálculo de la densidad; c) montaje final de los modelos físicos experimentales.

5.2 Determinación del incremento de la succión por efecto de la evaporación real y evapotranspiración.

5.2.1 Resultados de los modelos físicos experimentales

5.2.1.1 Variación de la humedad en el tiempo

El modelo 1 se instaló en el periodo comprendido entre el 25 de noviembre de 2022 y el 23 de febrero de 2023. El registro de las condiciones climáticas fue tomado de la estación meteorológica Guaymaral para este periodo de tiempo las cuales se reportaron en el anexo 10. La figura 34 muestra la variación del régimen de humedad volumétrica del suelo del modelo 1 tanto para la columna de suelo con pasto (prototipo para medir la evapotranspiración) como para la columna de suelo sin pasto (prototipo para medir la evaporación real), durante un periodo de análisis de 90 días.

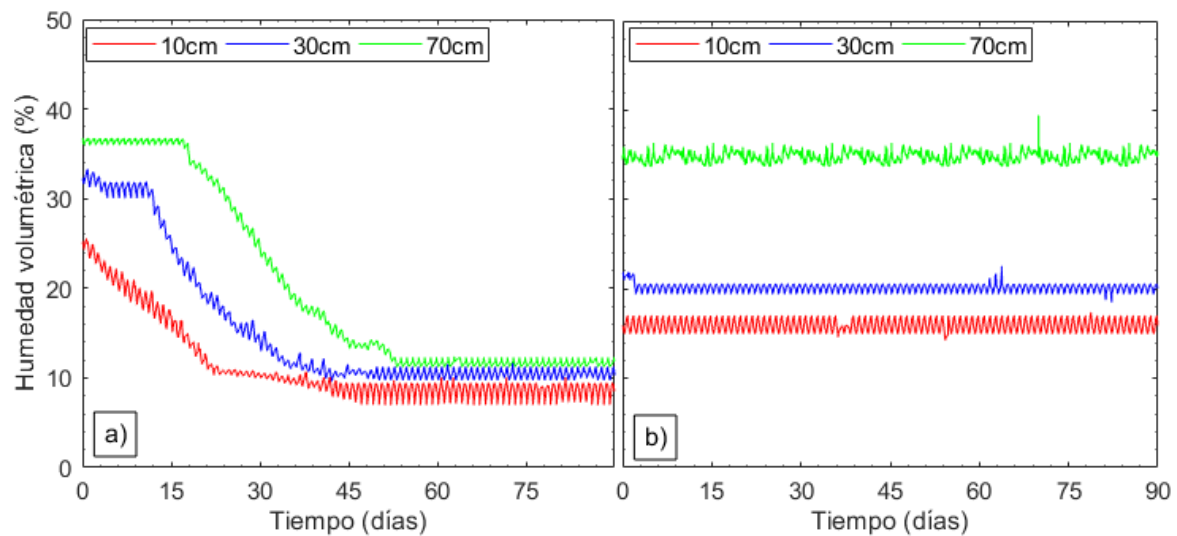


Figura 34 - Variación de humedad volumétrica del suelo con el tiempo para el modelo 1; a) variación de la humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación de humedad por efecto de la evaporación real

En la figura 34a se observa que hay un proceso de desecación del suelo por efecto de la absorción de agua a través de las raíces del pasto Kikuyo. Si se considera las alturas de análisis de forma individual, se puede decir que para una profundidad de 10cm el

contenido de humedad volumétrica del suelo alcanza un punto de equilibrio a los 44 días, para una profundidad de 30cm, a los 50 días y para una profundidad de 70cm, a los 54 de siembra del pasto. De la figura 34b se observa que la humedad volumétrica es constante en las tres alturas analizadas presentando oscilaciones que se pueden atribuir al ciclo de día y noche.

El modelo 2 se instaló en el periodo comprendido entre el 08 de agosto de 2022 y el 30 de octubre de ese mismo año. De igual forma, los registros atmosféricos fueron tomados de la estación meteorología de Guaymaral durante este tiempo y se encuentran reportados en el anexo 10. La figura 35 presenta el cambio en la humedad volumétrica presentada en el modelo 2 tanto para el prototipo de evapotranspiración como para el de evaporación real.

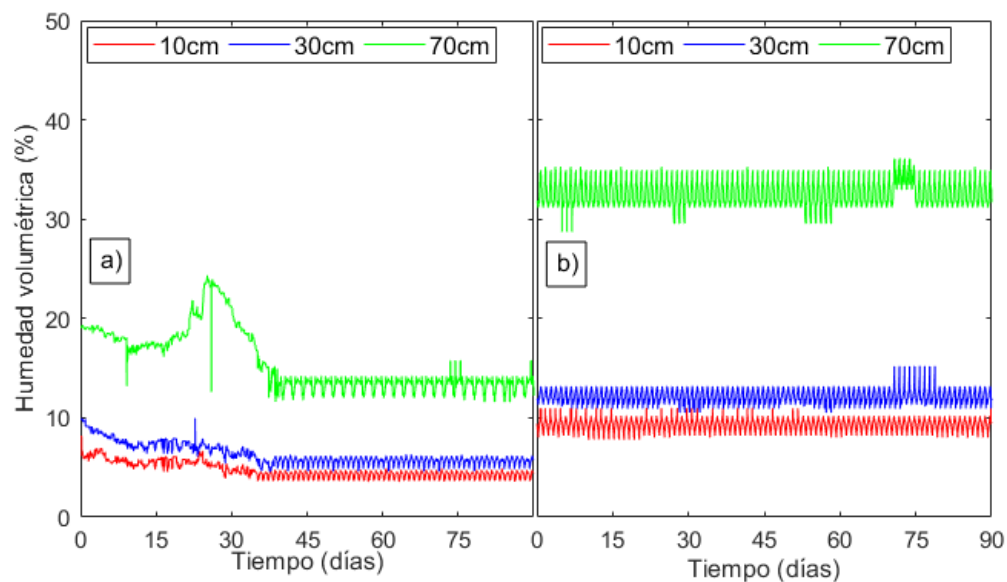


Figura 35 - Variación de humedad volumétrica del suelo con el tiempo para el modelo 2; a) variación de la humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación de humedad por efecto de la evaporación real

En la figura 35a se observa que el modelo 2 presenta un comportamiento similar al observado en el modelo 1. Los prototipos destinados a medir el incremento de la succión por efecto de la evapotranspiración están generando una reducción en el contenido de agua del suelo por efecto del crecimiento del pasto. En el caso del modelo 2, también se

visualiza que la humedad volumétrica se estabiliza en ciertos periodos de tiempo de acuerdo con la profundidad de análisis. Para 10cm el equilibrio se da a los 36 días, para los 30cm a los 38 días y para los 70cm en 40 días.

5.2.1.2 Condiciones climáticas

Los parámetros atmosféricos se tomaron de la estación meteorológica Guaymaral durante los tiempos de permanencia de los modelos físicos experimentales. Las variables analizadas fueron: velocidad del viento, humedad relativa, precipitación, temperatura y radiación solar.

En la figura 36 se presenta la velocidad del viento promedio para los modelos 1 y 2. De esta figura, se observa que la velocidad del viento promedio presente para el modelo 1 fue de 0.9 m/s y para el modelo 2 fue de 1.0 m/s. Adicionalmente, se evidencia que durante los periodos de tiempo comprendidos entre los días 10 y 20, se lograron velocidades de viento promedio diario del orden de 1.5m/s. Para el periodo comprendido entre los días 25 y 30 se logró la velocidad de tiempo máxima del orden de 2 m/s y finalmente para el periodo comprendido entre los días 54 y 57 se desarrolló una velocidad del tiempo de 1.7 m/s, siendo estos intervalos los picos máximos desarrollados en el modelo 2. Por el contrario, durante el tiempo de permanencia del modelo 01 la velocidad del viento fue constante y presento pequeñas oscilaciones que variaban entre 1 m/s y 0.7 m/s.

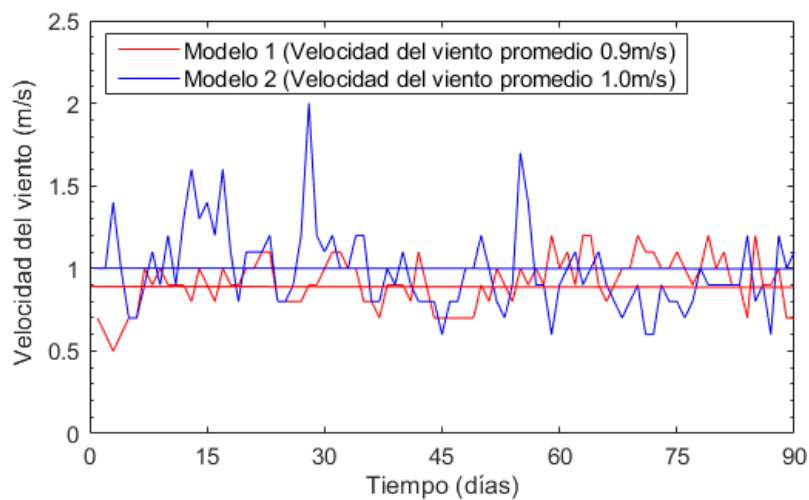


Figura 36 - Velocidad del viento promedio para el modelo 1 y 2

La figura 37 presenta la variación de la humedad relativa. Para el modelo 2 la humedad relativa fue constante oscilando entre el 79% y el 63%, a diferencia del modelo 2, el módulo 1 presento valores mínimos de 52% y 54% en los días 32 y 63.

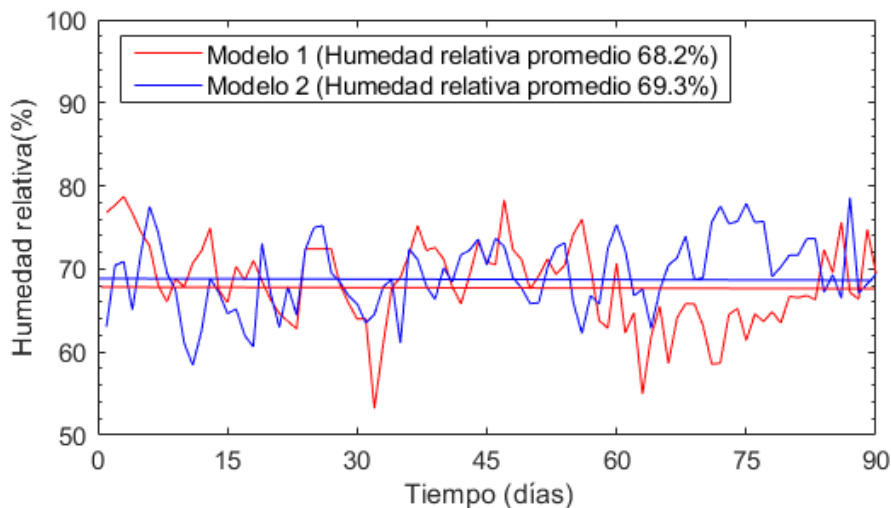


Figura 37 - Humedad relativa promedio para el modelo 1 y 2

La figura 38 presenta la variación de la radiación solar, en esta figura se observa que la radiación solar promedio para el modelo 1 fue de 148.5 w/m^2 y para el modelo 2 fue de 165.5 w/m^2 . El modelo 1 presenta una radiación solar máxima promedio de 300 w/m^2 a los 8 días de siembra de pasto y para el modelo 2 una radiación solar máxima promedio de 274 w/m^2 a los 85 días. Los valores mínimos de radiación solar fueron de 60 w/m^2 para el modelo 1 a los 60 días y para el modelo 2 de 50 w/m^2 a los 88 días.

La figura 39 presenta la precipitación diaria promedio, en la cual, se observa que para el modelo 1 entre los 30 y 60 días, se presentan las mayores precipitaciones alcanzando valores máximos de 40mm. Por el contrario, para el modelo 2 las mayores precipitaciones se presentan en el periodo comprendido entre los días 70 y 80 alcanzando un valor de precipitación máxima 45mm. La precipitación promedio registrada para el modelo 1 y el modelo 2 fueron de 3.2mm y 3.1mm respectivamente.

La figura 40 presenta la variación de la temperatura promedio diaria registrada para el modelo 1 y del modelo 2. El valor reportado corresponde al promedio entre la temperatura máxima y la temperatura mínima registrada durante un día. Con base a lo anterior la

temperatura promedio presente en el modelo 1 fue de 14.3°C y de 14.4°C para el modelo 2.

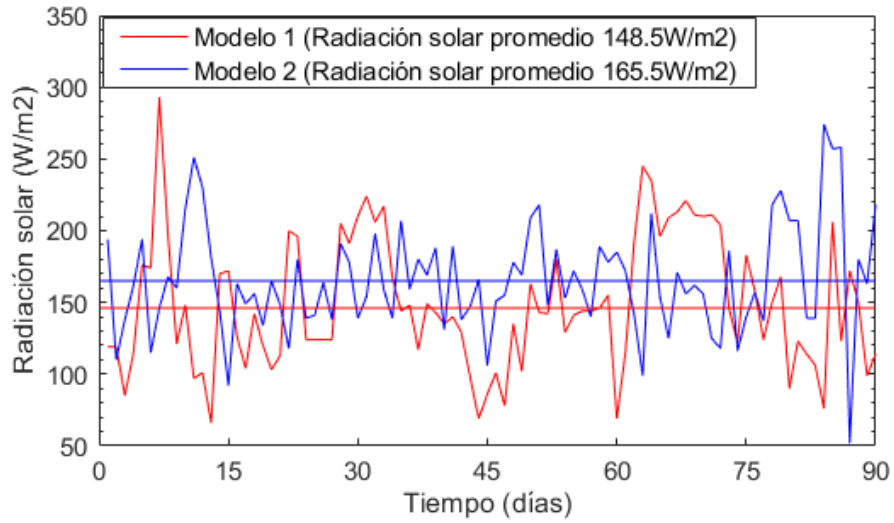


Figura 38 - Radiación solar promedio en el modelo 1 y 2

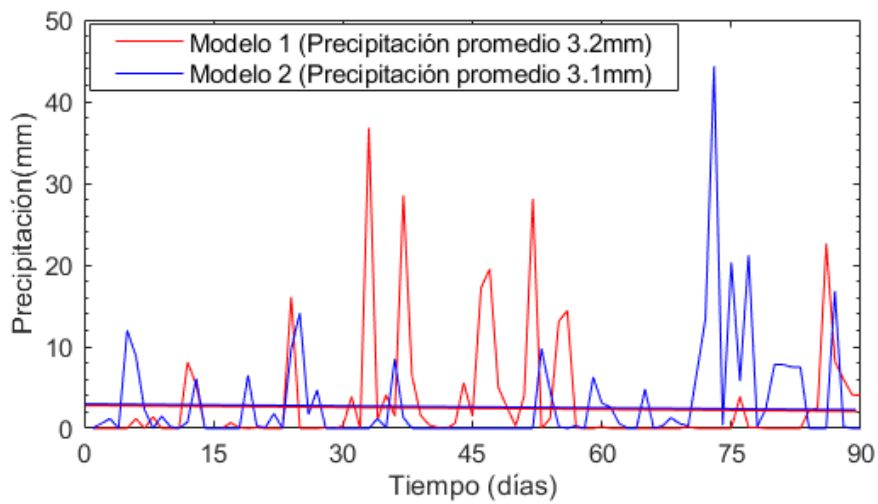


Figura 39 - Precipitación promedio para el modelo 1 y 2

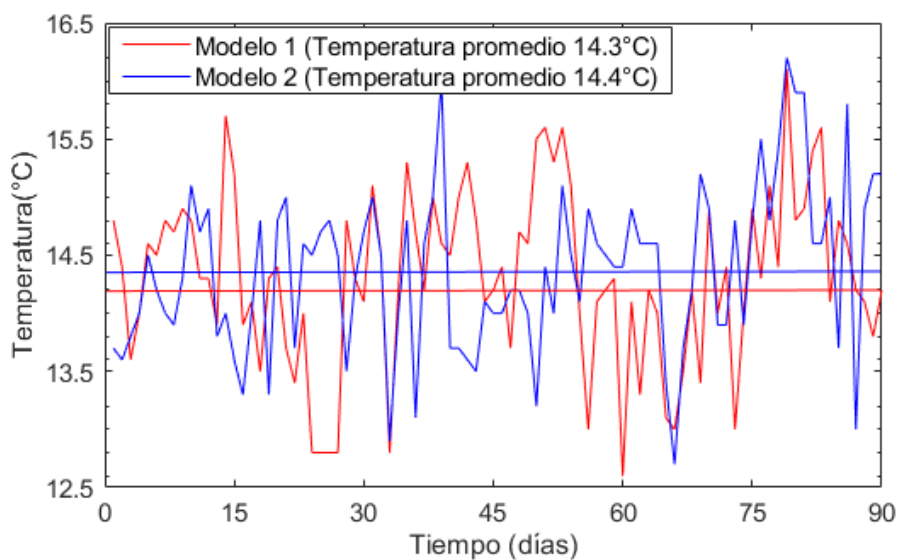


Figura 40 - Temperatura promedio para el modelo 1 y 2

5.2.2 Interpretación del cambio en el régimen de humedad

5.2.2.1 Variación de la humedad volumétrica por efecto de la evapotranspiración y evaporación real.

Las profundidades de análisis y de registro de la humedad volumétrica son tomadas desde la superficie del modelo y corresponde a alturas de 10cm, 30cm y 70cm. Por tanto, para analizar los perfiles de humedad volumétrica con respecto a la evaporación real y a la evapotranspiración se consideraron los días de análisis 0, 44, 50, 54 y 90 para el modelo 1 y para el modelo 2 los días 0, 36, 38, 40 y 90. Estos días corresponden al periodo de tiempo transcurrido desde la siembra del pasto Kikuyo y se escogen por las razones dadas en el numeral 5.2.1.1.

La figura 41 presenta el perfil de humedad para el modelo 1 y la figura 42 el perfil de humedad del modelo 2.

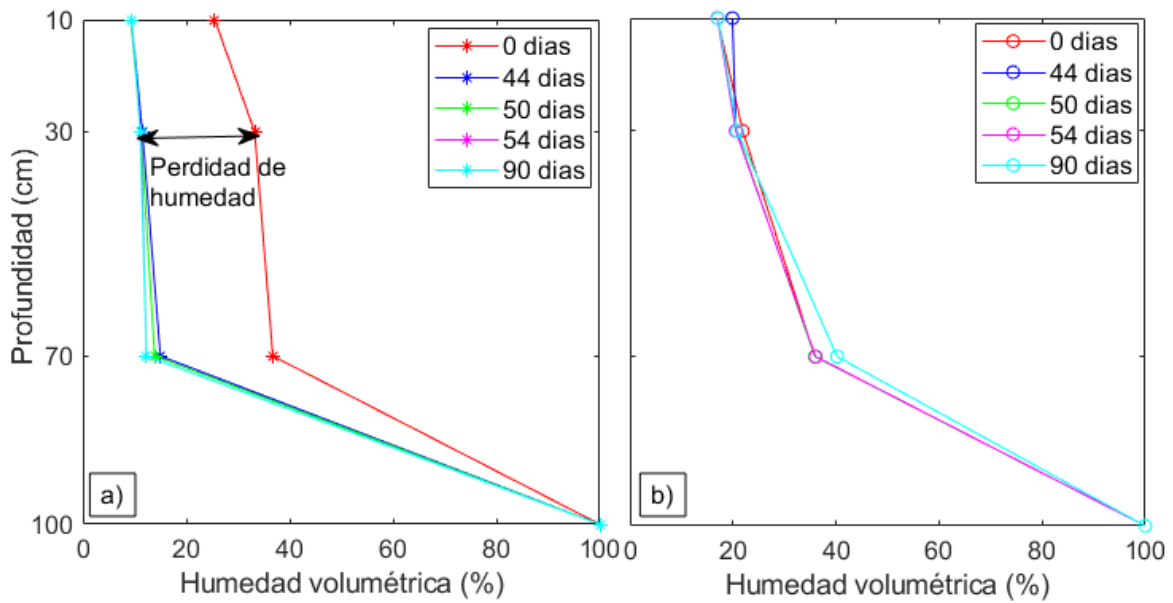


Figura 41 - Variación de la humedad volumétrica con la profundidad para el modelo 1; a) variación en el régimen de humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación en el régimen de humedad por efecto de la evaporación real.

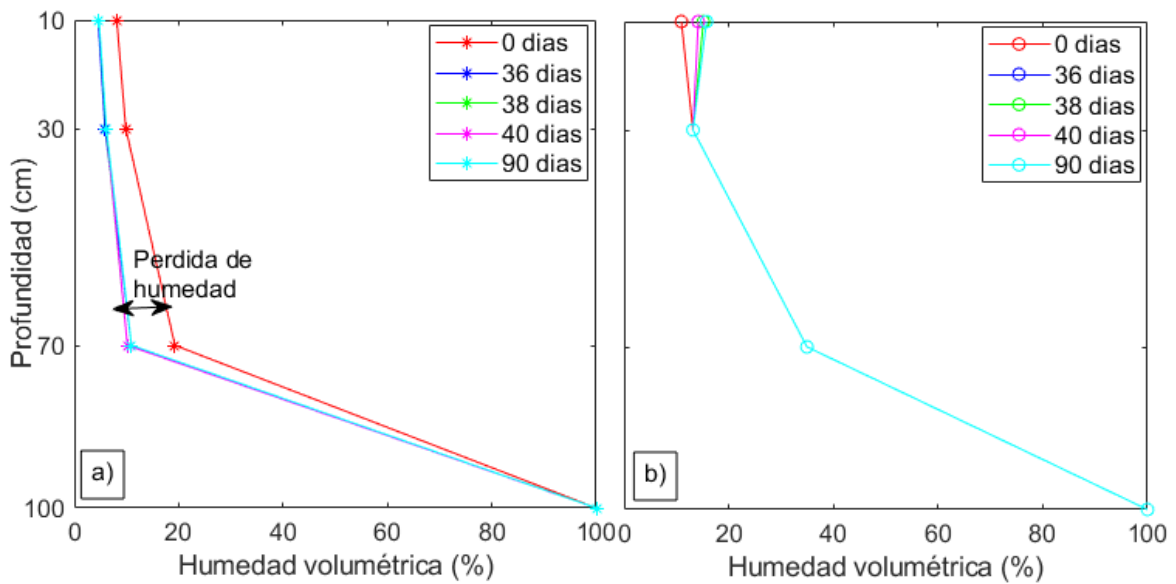


Figura 42- Variación de la humedad volumétrica con la profundidad para el modelo 2; a) variación en el régimen de humedad por efecto de la evapotranspiración; b) variación en el régimen de humedad por efecto de la evaporación real.

En las figuras 41a y 42a se observa un cambio abrupto en la humedad volumétrica del suelo presente en los prototipos destinados a medir la evapotranspiración, los cuales son el resultado de dos efectos: el primero corresponde a la absorción del agua por parte de las plantas (transpiración) y el segundo a la mayor exposición de las columnas de suelo a la radiación solar, debido a que en el modelo planteado las columnas de suelo se encuentran en la superficie, por tanto, presentan mayor irradiación, mientras que un terreno natural la radiación solar únicamente se refleja sobre la superficie del terreno.

Si se analiza el cambio de humedad volumétrica a los 10 cm de profundidad, se observa que el modelo 1 pasa de tener una humedad volumétrica inicial del 25.5% a una final de 9.5%. Esta humedad se mantiene constante a partir del día 44, mientras tanto, en el modelo 2 la humedad volumétrica inicial es de 8.1% y termina en 4.7%, este cambio de humedad se logra después de 36 días de siembra del pasto.

Para una profundidad de 30cm, el cambio de humedad pasa de 33.2% a 11.2% en el modelo 1 y de 9.9% a 6.1% en el modelo 2. Para esta profundidad de análisis la estabilización en el régimen de humedad se logra después de 50 en el modelo 1 y pasados 38 días en el modelo 2.

Finalmente, para una profundidad de 70cm se registra una humedad volumétrica inicial de 36.8% y una final de 12.3% para el modelo 1 y para el modelo 2 la humedad volumétrica pasa de 19.3% al 11%. De igual forma, que en los modelos anteriores el régimen de humedad se estabiliza a los 54 para el modelo 1 y de 40 días para el modelo 2.

Para el periodo comprendido entre los 44 y 54 días en el modelo 1, el cambio de humedad producto de la evapotranspiración es muy pequeña en comparación con el día 0, por esta razón se puede decir que la humedad volumétrica alcanza un punto de equilibrio para el modelo 1 después de los 54 días. Mientras tanto, para el modelo 2 la variación de humedad volumétrica desde los 36 días hasta los 40 días presenta un comportamiento similar que en el modelo 1, por tanto, se puede decir que para el modelo 2 el equilibrio en la humedad volumétrica se genera después de los 40 días de siembra.

Esta diferencia en el lapso del tiempo para que el modelo 1 y 2 alcance un equilibrio en la humedad volumétrica está asociada al crecimiento del pasto donde influyen dos aspectos

importante: el primero se relaciona con las condiciones climáticas, donde la mayor diferencia entre el modelo 1 y 2 está dado principalmente por la radiación solar, siendo esta mayor en el modelo 2 que en el modelo 1 y la segunda se puede atribuir a la porosidad del suelo, en el modelo 2, el suelo tiene una porosidad de 43.3%, mientras que la porosidad del suelo en el modelo 1 es del 45.3%, esta pequeña diferencia puede influir enormemente en la capacidad de la raíz del pasto Kikuyo en alcanzar mayores profundidades y lograr su desarrollo en un periodo de tiempo más corto. Este hecho es congruente con lo estudiado por (García et al., 2014) quienes afirmaron que la porosidad del suelo es una de las propiedades que condiciona el crecimiento del pasto.

Por otra parte, en las figuras 41b y 42b se observa que los prototipos destinados a medir la evaporación real presentan una pequeña oscilación en los perfiles de humedad volumétrica, producto de las condiciones climáticas y ascensión capilar por efecto de un equilibrio hídrico.

5.2.2.2 Variación de la humedad volumétrica por efecto de las condiciones climáticas diarias

En las figuras 34 y 35 se observa unas pequeñas oscilaciones las cuales indican una variación debido a los cambios diarios en las variables ambientales. Para interpretar este comportamiento, se tomó como referencia la humedad volumétrica registrada a los 10cm de profundidad del prototipo de evaporación real del modelo 1 para un periodo de 24 horas. Los datos analizados corresponden a los valores registrados por la estación meteorológica de Guaymaral desde las 0:00 horas del día 22 de febrero de 2023 hasta las 24:00 horas de ese mismo día.

La figura 43 presenta tres curvas de análisis, en la primera de ella se relaciona la humedad volumétrica del suelo con la temperatura del aire. En la segunda se relaciona la temperatura del aire con la humedad relativa y en la tercera y última curva se relaciona la radiación solar con la velocidad del viento

Por otro lado, no se considera la precipitación diaria dado a que las columnas de pasto estuvieron cubiertas, por tanto, el ingreso de agua al sistema únicamente se cuantifica a través de los frascos de Mariotte, cuya función es mantener un nivel de aguas freáticas constante en los modelos.

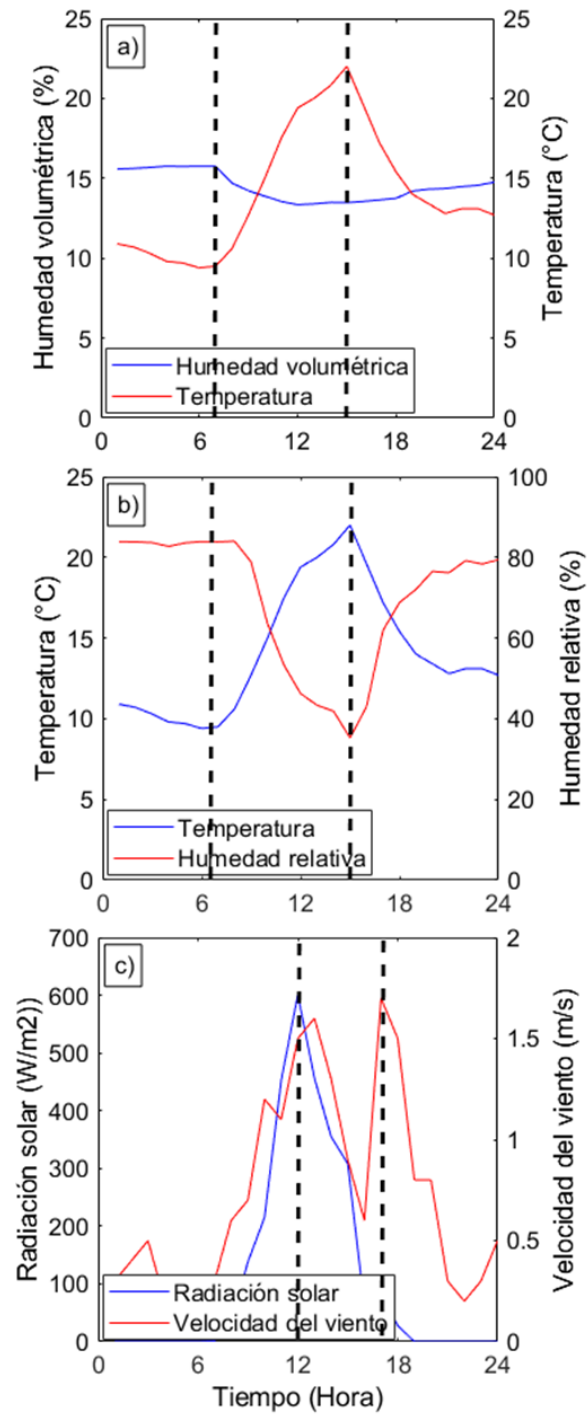


Figura 43 - Análisis de la variación diaria de la humedad volumétrica del suelo por efecto de las condiciones atmosféricas; a) Relación entre la humedad volumétrica y la temperatura del aire; b) Relación entre la temperatura del aire y la humedad relativa; c) Relación entre la radiación solar y la velocidad del viento.

En la figura 43a se observa, que hay un comportamiento inverso entre la humedad volumétrica del suelo y la temperatura de aire, es decir, cuando la temperatura del aire es máxima la humedad volumétrica registrada en el suelo es mínima, esto se traduce en que a mayor temperatura de aire la evaporación presente en el sistema es mayor. Este mayor grado de evaporación se produce a las 15:00 horas, en congruencia con la temperatura del aire que es máxima en ese momento. Por otro lado, se observa que la temperatura del aire mínima se registra entre las 6:00 y 7:00 horas de la mañana, en este mismo periodo de tiempo se registra la humedad volumétrica máxima en el sistema, la cual empieza a decrecer a medida que aumenta la temperatura del aire.

En la figura 43b se observa que la temperatura del aire y la humedad relativa presentan un comportamiento inverso, similar al observado en la figura 43a, lo que conlleva, a que, en la hora de máxima temperatura de aire, la humedad relativa es menor y por el contrario la hora donde se da la menor temperatura del aire, la humedad relativa es máxima. Debido a lo anterior, se puede decir que la humedad volumétrica en el sistema actúa en congruencia a la humedad relativa, donde se puede observar que a las 07:00 horas la humedad relativa es máxima al igual que la humedad volumétrica registrada en el suelo y de la misma manera, a las 15:00 horas tanto la humedad relativa como la humedad volumétrica son mínimas.

En la figura 43c se observa como primera medida que la velocidad del viento presenta dos picos máximos, el primero se presenta en el intervalo entre las 11:00 a 14:00 horas y el segundo a las 17:00 y 18:00 horas. Por otro lado, hay presencia de radiación solar entre las 07:00 hasta las 18:00 horas, siendo a las 12:00 horas donde se presenta la radiación solar máxima. Dado lo anterior, si se analiza la humedad volumétrica registrada en el suelo se observa que en el intervalo entre las 07:00 horas a las 18:00 horas la humedad volumétrica es mínima esto está en congruencia a las horas donde hay presencia de radiación solar y donde se registró las mayores velocidades de viento.

Debido a lo anterior, se puede decir que la variación de la humedad volumétrica del suelo es función de las variables ambientales. A mayor temperatura del aire, la humedad volumétrica es mínima. A mayor humedad relativa mayor es la humedad volumétrica registrada y que igual forma que en presencia de radiación solar y velocidad del viento mayor es la evaporación y, por ende, menor la humedad volumétrica en el suelo. Este

comportamiento es igual al estudiado por (Wilson et al., 1994), (Wilson et al., 1997) y (Fredlund et al., 2012) quienes analizaron el efecto del clima en el cambio de la succión de los suelos.

5.2.2.3 Análisis de la variación de la succión en el tiempo

Con los valores de humedad volumétrica del suelo reportados para el modelo 1 y 2. Se procedió a determinar los valores de succión alcanzados tomando como base la rama húmeda de la curva de retención de humedad ajustada con el programa RECT y cuyos parámetros se reportan en la tabla 6.

La rama húmeda se tomó como base para el cálculo de la succión, debido a que se busca seguir el cambio en el régimen de humedad del suelo, el cual, inicia con una humedad residual en el proceso de compactación, luego a través de los frascos de Mariotte se regula la humedad por ascensión capilar, posterior se inicia un proceso de desecación por efecto de la evapotranspiración o evaporación real y, por último, se presenta nuevamente un equilibrio de humedad volumétrica por capilaridad. Las figuras 44 y 45 presentan los valores de succión alcanzados para el modelo 1 y 2 respectivamente.

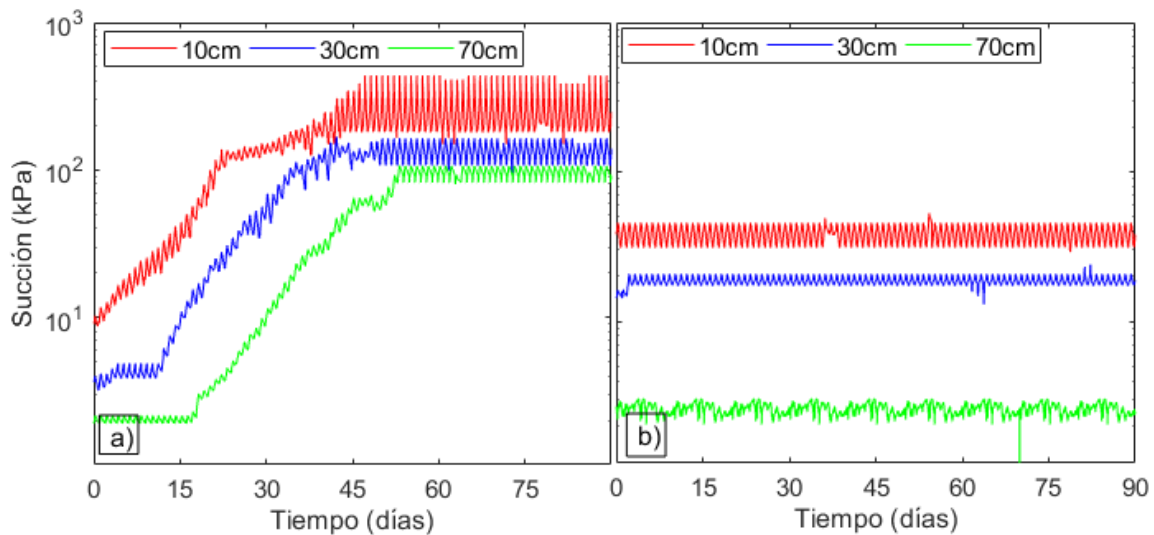


Figura 44 – Valores de succión desarrollados para el modelo 1; a) Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración; b) Succión desarrollada por efecto de la evaporación real.

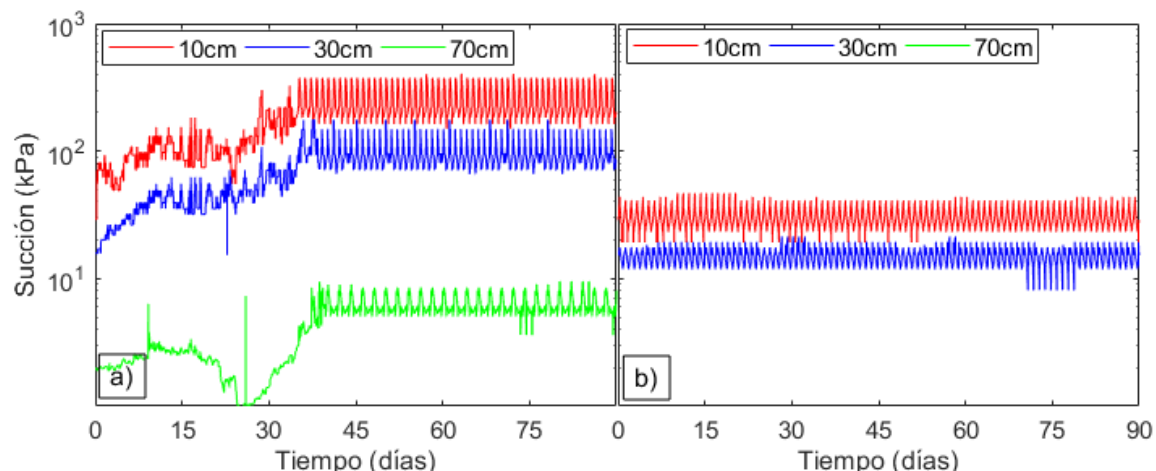


Figura 45 - Valores de succión desarrollados para el modelo 2; a) Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración; b) Succión desarrollada por efecto de la evaporación real.

De las figuras 44a y 45a se observa que la succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración alcanza sus máximos valores para el modelo 1 después de los 54 días, y para el modelo 2 después de los 40 días. A partir de estos días los valores de succión permanecen estables. Valores en concordancia a los registros de humedad volumétrica del suelo registrados, de igual manera se observan oscilaciones en la succión que son efecto del cambio de humedad volumétrica diario que es producto de la interacción suelo – planta – clima. Para efectos de reportar ordenes de magnitud, la tabla 12 presenta los valores de succión máximas y mínimas alcanzados por efecto de la evapotranspiración para el modelo 1 y 2, considerando las profundidades de análisis y el primer y último día de permanencia de los modelos.

De la tabla 12 se puede decir que para el modelo 1 que alberga el suelo bien gradado se desarrolla una succión máxima de 436.9 kPa, medida a los 10 cm de profundidad, mientras que para el modelo 2 que contiene un suelo mal gradado, la succión máxima alcanza un valor de 373.9 kPa a la misma profundidad, dado lo anterior, podemos concluir que el incremento de succión de 63 kPa es efecto de la granulometría del material y de la variación de las condiciones climáticas. De la misma manera ocurre a los 30 y 70cm de profundidad, donde se observa un incremento de succión en el suelo 1 con respecto al suelo 2 de valores de 16.1 kPa y de 99.8 kPa respectivamente.

Tabla 12 – Succión desarrollada por efecto de la evapotranspiración del modelo 1 y 2.

Profundidad (cm)	Valores de succión por efecto de la evapotranspiración (kPa)							
	Modelo 1				Modelo 2			
	0 días		90 días		0 días		90 días	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
10	10.2	8.7	436.9	181.1	81.1	29.0	373.9	163.6
30	4.0	3.2	163.9	107.9	17.1	15.8	147.8	70.9
70	2.2	1.9	106.1	81.9	2.0	1.9	6.3	3.6
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En las figuras 44b y 45b, se observa que la succión desarrollada por efecto de la evaporación real es constante durante los 90 días de análisis. Valores que se encuentran en concordancia a los registros de humedad volumétrica del suelo registrados, así mismo, se observan oscilaciones en la succión que son efecto al cambio de humedad volumétrica diario que es producto de la interacción suelo – clima. Para efectos de reportar ordenes de magnitud, la tabla 13 presenta los valores de succión máximas y mínimas desarrollados para el modelo 1 y 2, considerando las profundidades de análisis y para el primer y último día de permanencia de los modelos.

Tabla 13 - Valores de succión desarrollados por efecto de la evaporación real del modelo 1 y 2.

Profundidad (cm)	Valores de succión por efecto de la evaporación real (kPa)							
	Modelo 1				Modelo 2			
	0 días		90 días		0 días		90 días	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
10	45.5	31.1	45.5	31.1	43.7	8.7	43.7	19.2
30	16.3	14.3	20.7	17.4	17.6	3.2	19.3	11.9
70	2.9	2.2	2.6	2.3	1.0	2.2	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

De la tabla 13 podemos decir que la diferencia de succión desarrollada a los 90 días de análisis por efecto de la evaporación real del suelo para el modelo 1 con respecto al

modelo 2 es del orden de 1.8kPa, 3.1 kPa y 1.6 kPa para las profundidades de 10cm, 30cm y 70 cm respectivamente.

5.2.2.4 Influencia de la succión osmótica en los modelos

Se hicieron pruebas de conductividad eléctrica tanto para agua común, como para la solución compuesta por agua y fertilizante, con el objetivo de evidenciar si hay aporte de succión osmótica por presencal del fertilizante. Este proceso se evidencia en la figura 46.

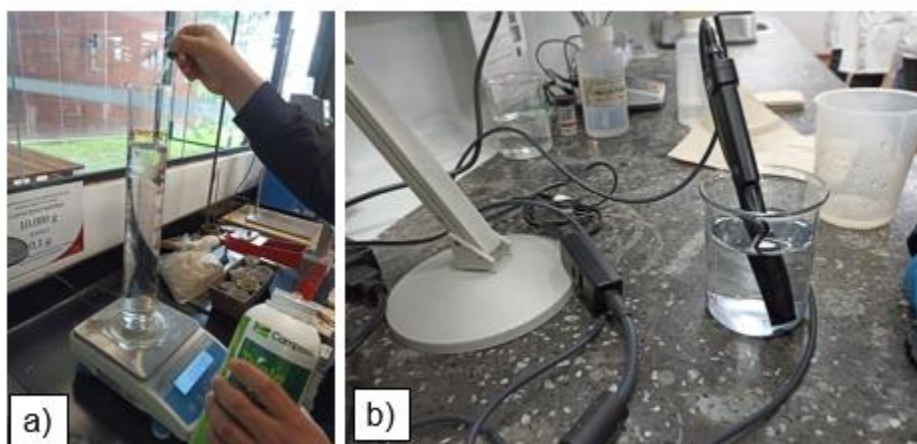


Figura 46 - Conductividad eléctrica del agua y compuesto formado por agua y fertilizante; a) dosificación fertilizante; b) lectura de la conductividad eléctrica del agua usando un conductímetro.

La tabla 14 presenta los valores medidos de conductividad eléctrica tanto para agua común como para el compuesto y los cálculos de succión osmótica realizados con la ecuación (12).

Tabla 14 - Valores de succión osmótica y conductividad eléctrica del agua y del compuesto.

Parametros	Agua	Compuesto
Condcutividad electrica (ms/cm)	0.25	2.79
Succion osmotica (kPa)	0.01	0.07
Temperatura (°C)	25.10	25.10

De la tabla 14 se observa que el agua común aporta 0.01kPa de succión y que la solución de fertilizante en agua en dosificación del 0.5% tan solo aporta 0.07 kPa de succión. Por esta razón, el aporte de la succión osmótica por efecto del fertilizante no es representativo en el incremento de la succión total generada por el efecto de la evapotranspiración y de la evaporación real, por tanto, se puede decir que las succiones alcanzadas se debieron únicamente a la succión matricial.

5.2.2.5 Variación de la succión con la profundidad

Considerando las profundidades de análisis y los valores de succión máxima desarrollada para el prototipo de evapotranspiración y evaporación del modelo 1 y 2, se elabora un perfil de succión considerando un tiempo de análisis de 90 días, tiempo en donde la succión desarrollada tanto para el modelo 1 como para el modelo 2 es constantes. Si se considera que las condiciones atmosféricas son las mismas en el prototipo con pasto (evapotranspiración) y en el prototipo sin pasto (evaporación real), se podría estimar la succión máxima alcanzada por efecto de la transpiración del pasto Kikuyo. La figura 47 presenta los perfiles de succión máximos para el modelo 1 y modelo 2.

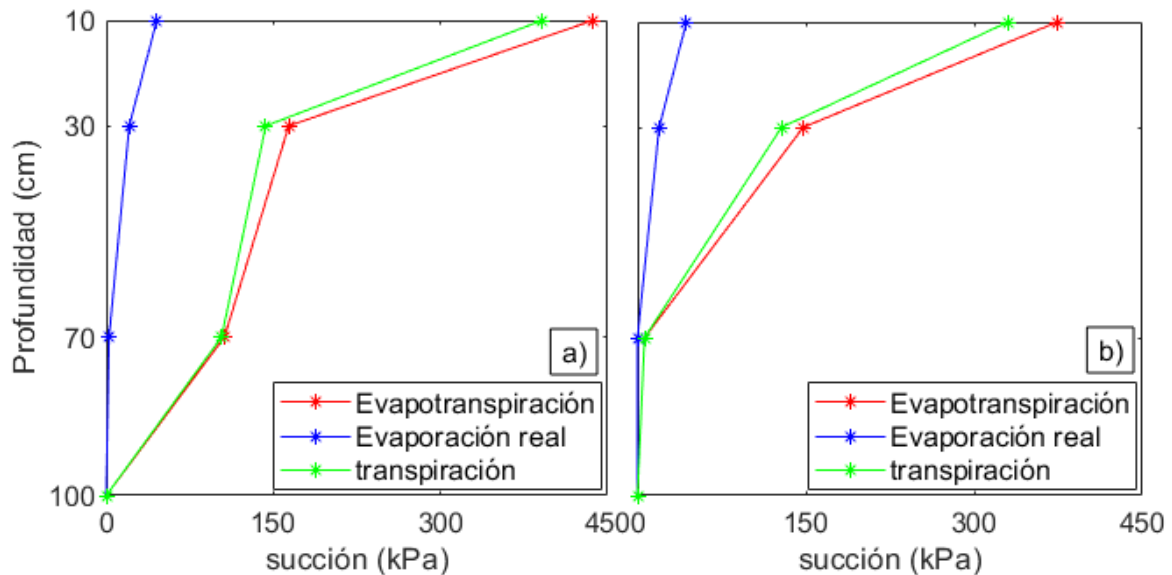


Figura 47 - Perfil de succión máxima por efecto de la evapotranspiración, evaporación real y transpiración del pasto; a) perfil de succión en el modelo 1; b) perfil de succión en el modelo 2.

De la figura 47 se puede observar que efectivamente en el prototipo destinado para medir la evapotranspiración alcanza mayores grados de succión en comparación con el prototipo destinado para medir la evaporación real del suelo. Como se dijo anteriormente si se considera una igualdad de condiciones en ambos prototipos, se puede determinar la succión máxima por efecto de la transpiración del pasto en donde se reportan valores de succiones del orden de 391.5 kPa, 143.2 kPa y 105.5 kPa para profundidades de 10cm, 30cm y 70 cm respectivamente para el modelo 1 y para el modelo 2 valores de succión del orden de 330.2 kPa, 128.5 kPa y 6.3 kPa para profundidades de 10cm, 30cm y 70cm respectivamente. Es importante señalar que la succión determinada por efecto de la transpiración se determina únicamente para tener ordenes de magnitud y por eso se consideró que las condiciones en el prototipo con pasto y en el prototipo sin pasto son iguales, aunque en la realidad para poder estimar la succión producto del cambio de la humedad volumétrica por efecto de la transpiración del pasto se debe realizar a través de un modelo de balance hídrico (Campbell & Diaz, 1988).

El perfil de succión presentado en la figura 47 es similar al reportado por (Garg et al., 2015) quienes en su investigación analizaron la contribución relativa de los procesos de transpiración de la *schefflera heptaphylla* y evaporación en la succión de una arena limosa bajo condiciones atmosféricas controladas y para un tiempo de monitoreo de 7 días.

5.3 Efecto de la distribución del tamaño de las partículas en la succión.

Los suelos de análisis corresponden a una arena bien gradada y a una arena mal gradada, los parámetros utilizados para clasificar un suelo a través del sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS) son el coeficiente de uniformidad (C_u) el cual, para una arena debe ser mayor a 6 y el coeficiente de curvatura (C_c) el cual, para un suelo bien gradado debe estar dentro de un rango de 1 a 3. Con base a lo anterior, para analizar el efecto de la distribución del tamaño de las partículas de suelo en la succión generada por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real, se escogieron estos parámetros de la granulometría de los suelos de análisis, los cuales fueron reportados en la tabla 3. Adicionalmente, se incluyó una tercera variable de comparación, la cual es el diámetro de partícula por el cual pasa el 10% del material D_{10} .

Las figuras 48, 19 y 50 presentan la relación entre la succión máxima registrada a los 10cm, 30cm y 70cm por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real con el coeficiente de curvatura, coeficiente de uniformidad y D_{10} .

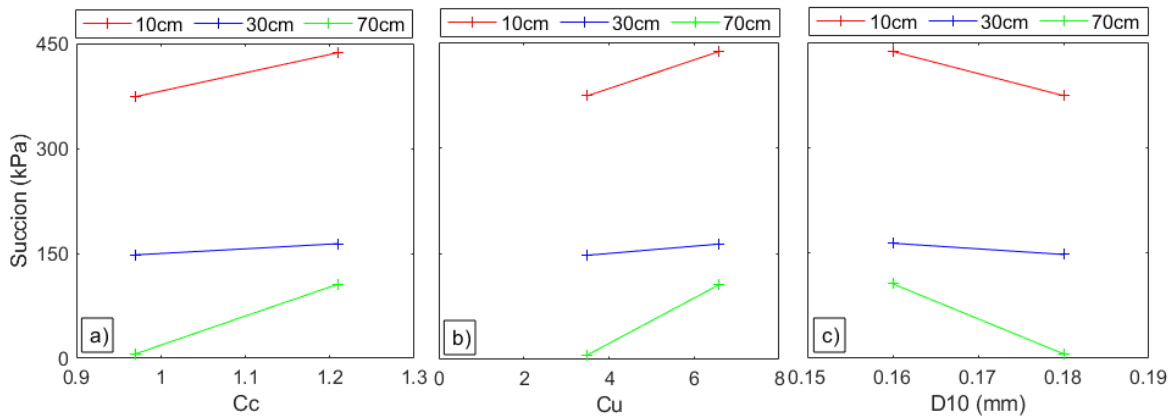


Figura 48 – Relación entre la succión máxima efecto de la evapotranspiración y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al C_c ; b) Variación por efecto del C_u ; c) Variación por efecto del D_{10} .

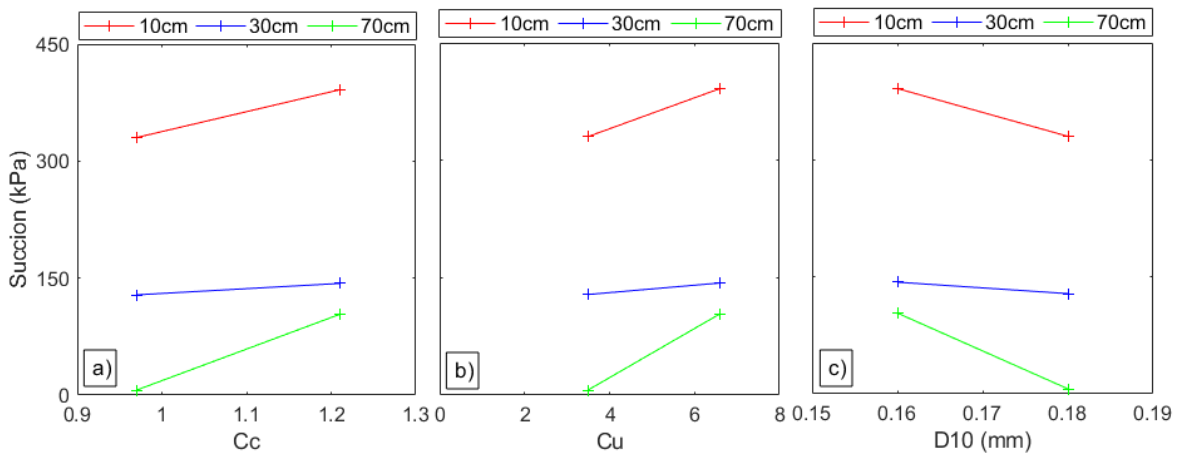


Figura 49 – Relación entre la succión máxima efecto de la transpiración y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al C_c ; b) Variación por efecto del C_u ; c) Variación por efecto del D_{10} .

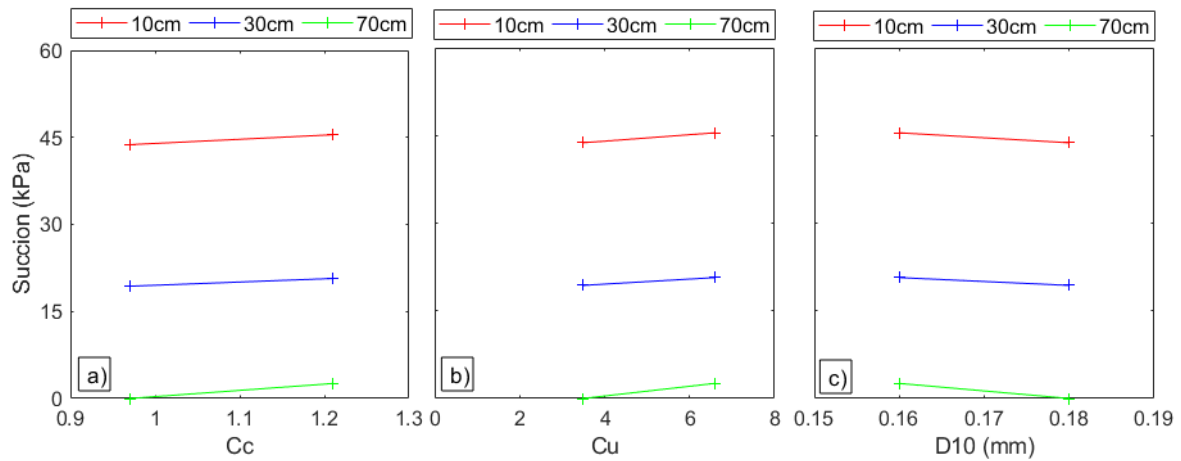


Figura 50 – Relación entre la succión máxima efecto de la evaporación real y la granulometría del suelo; a) Variación por efecto al Cc; b) Variación por efecto del Cu; c) Variación por efecto del D10.

En las figuras 48a, 49a y 50a se observa una relación directa entre la succión máxima generada por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real con el coeficiente de curvatura (Cc), la cual, es mayor a medida que el coeficiente de curvatura aumenta y es menor cuando este parámetro disminuye. Esta linealidad se puede observar en todos niveles de profundidad analizados.

Para suelos bien gradados el coeficiente de curvatura se encuentra entre un rango de 1 a 3, debido a lo anterior, si la succión desarrollada es función de esta variable, y como se observa en las en las figuras 48a, 49a y 50a, para valores de Cc por debajo de 1 la succión es menor, por tanto, se espera que para valores mayores a 3, la succión disminuya. Esto quiere decir, que la succión es máxima en un rango de coeficiente de curvatura entre 1 y 3

Por otra parte, se observa que las pendientes de las curvas succión vs coeficiente de curvatura son diferentes para cada profundidad analizada, lo cual está en concordancia con los perfiles de humedad volumétrica y de succión del suelo presentados en las figuras 41, 42 y 47, cuyos valores también dependen de la evapotranspiración.

En las figuras 48b, 49b y 50b se observa una relación directa entre la succión máxima generada por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real con el coeficiente de uniformidad (Cu), la cual es mayor a medida que el coeficiente de curvatura aumenta y es menor cuando este parámetro disminuye. Esta linealidad se puede observar en todos niveles de profundidad analizados.

Finalmente, en las figuras 48c, 49c y 50c se observa que la relación existente entre la succión y el diámetro de partícula por el cual ha pasado el 10% del material es inversa. Lo sé que significa que a menor valor de D_{10} la succión es mayor. Esto debido a que un menor valor de D_{10} conlleva un menor tamaño de poro, lo que a su vez ocasiona una mayor tensión superficial y, por ende, una mayor succión matricial. Lo cual es congruente con lo estudiado y analizado por (Fredlund et al., 2012) y (N Lu & Likos, 2004).

Los resultados obtenidos son coherentes y están en congruencia con lo estudiado por (Alonso et al., 1989) quienes concluyen que las características granulométricas de los suelos en conjunto con las propiedades físicas como la forma y la textura, determinan la cantidad y el tamaño de los poros del suelo, las cuales a su vez controlan la componente capilar de la succión matricial.

5.4 Estimación de la evapotranspiración potencial y de referencia

La estimación de la evapotranspiración potencial se realizó a través del modelo propuesto por Penman en 1948, el cual se detalla en la sección 3.4.1, adicionalmente se usó la técnica del tanque evaporímetro para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) y de referencia (ET_o) en los dos modelos de análisis.

La evapotranspiración de referencia se determinó a partir de la evapotranspiración potencial registrada por el tanque evaporímetro (TE), por medio de la expresión (29)

$$ET_o = K_p * ETP \quad (29)$$

El coeficiente K_p se determinó a través de la ecuación propuesta por (Allen, 2006) la cual se presenta en la ecuación (30)

$$Kp = 0.108 - 0.02586u^2 + 0.0422\ln(fet) + 0.134\ln(Hr) - 0.000631[\ln(fet)]^2\ln(Hr) \quad (30)$$

Donde

U^2 velocidad del viento (m/s)

Hr Humedad relativa

Fet Distancia al borde de la superficie a 1000m que es la maxima permitida para la estimacion del coeficiente Kp de (Allen, 2006).

La figura 51 presenta la estimacion de la evapotranspiracion potencial determinada por medio del taque evaporimetro, la evapotranspiracion de referencia estimada por el coeficiente Kp de (Allen, 2006).y la evapotranspiracion potencial calculada por el modelo propuesto por Penman 1948.

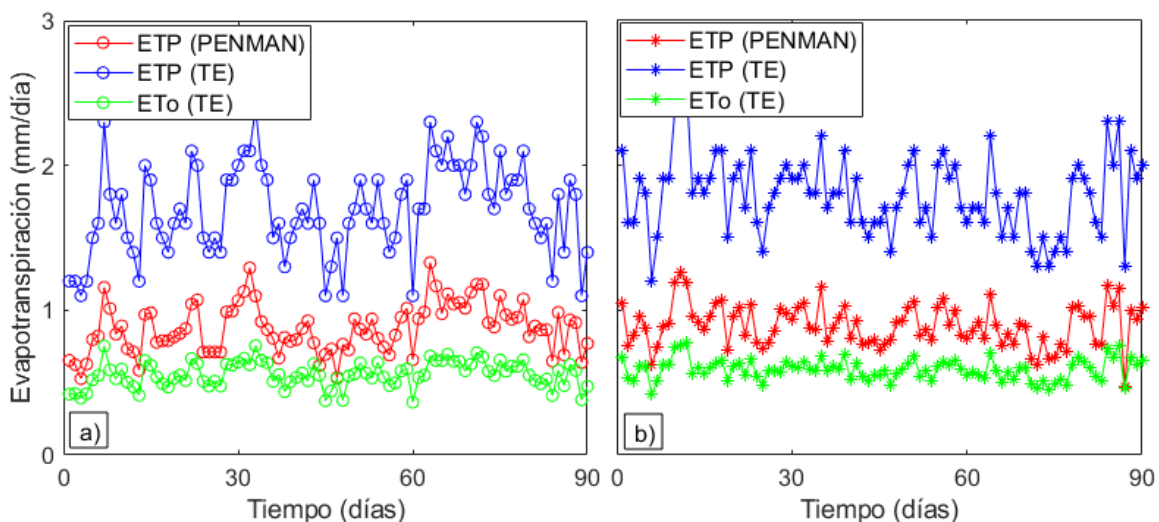


Figura 51 - Evapotranspiración potencial (ETP) y de referencia (ETo) para los modelos de análisis) ETP y ETo para el modelo 1; b) ETP y ETo para el modelo 2

En la figura 51 se observa que la ETP determinada por el método del tanque evaporímetro es mayor que la estimada por el modelo de Penman 1948, esto se debe el método del tanque evaporímetro integra las variables climáticas en una única medida la

cual se determina a través del cambio de altura generada por la evaporación de una superficie libre de agua. Por el contrario el método de Penman considera las condiciones atmosféricas de forma independiente, adicionalmente permite integrar la influencia de la cobertura vegetal a través del coeficiente Albedo (Fredlund et al., 2012).

Por otra parte, se observa que la Eto es menor que la ETP estimada a través del tanque evaporímetro y que el modelo de Penman tanto para el modelo 1 como para el modelo 2. Sin embargo, para conocer con un mayor grado de precisión la evapotranspiración, transpiración y evaporación real presente en los modelos es necesario realizar un balance hídrico del suelo que permita considerar variables como la cantidad de agua que ingresa al sistema ya sea por percolación o por ascensión capilar, las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos y el efecto de la cobertura vegetal (Campbell & Diaz, 1988).

6 CONCLUSIONES

Cuando se habla del aporte de las coberturas vegetales en las propiedades hidromecánicas de los suelos, normalmente suele estudiarse el efecto de las raíces en el incremento de la resistencia al corte, incremento que viene acompañado por un aporte en el refuerzo de la raíz y en la resistencia a la tracción que esta genera, pero poco se habla de la contribución en la succión por efecto de la evapotranspiración de las plantas. Debido a lo anterior este trabajo se centró en estudiar y analizar el incremento de la evapotranspiración generada por el pasto Kikuyo en los suelos granulares. A continuación, se presenta las conclusiones obtenidas del desarrollo de este estudio:

- Se establece un nuevo método experimental para el estudio de la variación en el régimen de humedad volumétrica del suelo, y en conjunto con la curva de retención de humedad, se pudo estimar el incremento de succión generada por efecto de la evapotranspiración y evaporación real en los dos suelos analizados.
- Del registro diario de la variación volumétrica se evidenció un proceso de desecación del suelo por efecto de la transpiración del pasto Kikuyo, el cual alcanza un punto de estabilización cuando el pasto logra su máximo desarrollo.
- De los resultados obtenidos de la variación diaria del régimen de humedad volumétrica del suelo, se pudo observar que la humedad del suelo no es solo afectada por la absorción de las raíces de las plantas (interacción suelo – planta) sino que también es producto de las condiciones atmosféricas (interacción suelo – clima).
- De la interacción suelo – clima, se pudo comprobar que el cambio en el régimen de humedad del suelo tiene una tendencia inversa con la temperatura del aire y una proporcionalidad directa con la humedad relativa. Adicionalmente, se demostró que la humedad volumétrica es mínima cuando la radiación solar y velocidad del viento son máximas.
- Para los dos suelos granulares de estudio se pudo evidenciar que el incremento de succión generada por efecto de la evapotranspiración y evaporación real en un suelo bien gradado es mayor que el generado en un suelo mal gradado y que estos valores son congruentes con la relación de vacíos del suelo. Debido a que

un suelo bien gradado genera un mejor empaquetamiento de las partículas, lo que conduce a que se presente una menor relación de vacíos y una menor porosidad y, por ende, al tener una menor cantidad y un menor tamaño en los poros del suelo, las fuerzas capilares y la tensión superficial son mayores, lo que conlleva a obtener succiones matriciales más elevadas que las desarrolladas con tamaño de poros más grandes.

- Se pudo evidenciar que el aporte de la succión osmótica generado por el compuesto (agua + fertilizante) es nulo y que los mayores valores de succión alcanzados son aportados únicamente por el componente matricial.
- Para los suelos de estudio, se obtuvo una relación lineal entre la succión máxima desarrollada por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real con el coeficiente de curvatura (C_c) y con el coeficiente de uniformidad (C_u).
- Para los suelos de estudio, se obtuvo una relación lineal inversa entre la succión máxima desarrollada por efecto de la evapotranspiración, transpiración y evaporación real con el diámetro de partículas por el cual pasa el 10% del material (D_{10}).
- De la estimación de la evapotranspiración realizada a través de modelos teóricos, se observó que estos modelos no incorporan las propiedades físicas de los suelos analizados. Con referencia a los resultados obtenidos en esta investigación se evidencia que la granulometría del material influye directamente en el contenido de agua que el suelo puede retener y en la variación de humedad producto de la ascensión capilar.

7 RECOMENDACIONES

Con el ánimo de profundizar lo aquí investigado se recomienda lo siguiente:

- Realizar un balance hídrico de los modelos, para estimar de forma más precisa la evapotranspiración, evaporación real y la transpiración de las plantas, dado a que los modelos teóricos utilizados para estimar estas variables no incorporan las propiedades físicas de los suelos analizados.
- Elaborar modelos adicionales variando la granulometría del material considerando suelos con diferentes coeficientes de uniformidad (C_u), coeficientes de curvatura (C_c) y diámetros por el cual pasa el 10% de material (D_{10}) esto con el fin de tener más puntos de análisis y verificar la relación directa entre la succión y estas variables.
- Existe la necesidad de mejorar la instrumentalización de los modelos de columna de suelos propuesta, debido a que se considera necesario realizar un balance térmico del sistema para que en conjunto con un balance hídrico poder converger en un modelo matemático para validar la información obtenida en este trabajo.
- Comparar la temperatura dentro de los modelos con la temperatura in-situ a las mismas profundidades con el fin de poder analizar de forma más profunda la variación de la humedad volumétrica del suelo y la injerencia de la mayor irradiación solar presente en los modelos.
- Elaborar modelos con un tiempo de permanencia mayor a 90 días para verificar y analizar los valores de succión generados por el efecto de la evapotranspiración cuando el pasto cumpla su edad de vida o cuando se alcance el punto de marchitez.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO Riego y Drenaje*, 297 pp.
- Alonso, E. E., Gens, A., & Hight, D. (1989). Groundwater effects in geotechnical engineering. In E. T. Hanrahan, T.L.L.orr, & T. F. Widdis (Eds.), *Proceedings of the ninth European conference on soil mechanics and foundation engineering* (Issue June 2017, pp. 1087–1146).
- Alsherif, N., Wayllace, A., & Lu, N. (2015). Measuring the Soil Water – Retention Curve Under Positive and Negative Matric Suction Regimes. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4)(September), 442–451. <https://doi.org/10.1520/GTJ20140258>
- Bathurst, J. C., Bovolo, C. I., & Cisneros, F. (2010). Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecological Engineering*, 36(3), 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.05.001>
- Bernal, J. (2003). Manual de nutrición y fertilización de pastos. In *Manual de nutrición y fertilización de pastos*.
- Betancourt, R. F., & Salazar, G. A. (2018). Análisis de los efectos que causa la implementación de la ingeniería sostenible en el medio ambiente de la ciudad de Bogotá [Universidad la gran Colombia]. In *Suparyanto dan Rosad (2015)*. <http://hdl.handle.net/11634/47475>
- Bishop, A. W., & Blight, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, 13(3), 177–197. <https://doi.org/10.1680/geot.1963.13.3.177>
- Bourrier, F., Kneib, F., Chareyre, B., & Fourcaud, T. (2013). Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering*, 61(1 PARTC), 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.05.002>
- Cambel, A. B. (1956). Book Reviews. *Journal of Jet Propulsion*, 26(2), 127–128.

<https://doi.org/10.2514/8.6921>

Campbell, G. S., & Diaz, R. (1988). Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. Drought research priorities for the dryland tropics. *ICRISAT*, 15–26.

Carvajal-cardenas, D. A., & Lozada, C. (2023). Physical modeling of desiccated slopes in fine soil using a geotechnical centrifuge. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 00(00), 1–8. <https://doi.org/10.1080/19386362.2023.2165893>

Chiaradia, E. A., Vergani, C., & Bischetti, G. . (2016). Forest Ecology and Management Evaluation of the effects of three European forest types on slope stability by field and probabilistic analyses and their implications for forest management. *Forest Ecology and Management*, 370, 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.050>

Chirico, G. B., Borga, M., Tarolli, P., Rigon, R., & Preti, F. (2013). Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.103>

Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia Adaptation to Climate Change in Colombia. *Revista de Ingeniería*, 26, 74–80. <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/abs/10.16924/revinge.26.9>

Dineen, K. (1997). *The Influence of Soil Suction on the Shear* [University of London]. The influence of soil suction on compressibility and swelling%0A

Dorsey, N. E. (1940). *Properties of ordinary water-substance in all its phases*. Reinhold.

Fredlund, D. G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils. *Can Geotech J*, 16(1), 121–139. <https://doi.org/10.1139/t79-011>

Fredlund, D. G. (2000). The 1999 R.M. Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963–986. <https://doi.org/10.1139/t00-026>

Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated

- Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103(5), 447–466.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000423>
- Fredlund, D. G., Rahardjo, F. H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1987). Soil Mechanics Principles for Highway Engineering in Arid Regions. *Transportation Research Record*, 0(1137), 1–11.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Reprinted from Unsaturated Soils sponsored by the Geotechnical Engineering Division. In ASCE (Ed.), *An Overview of Unsaturated Soil Behaviour* (Issue January).
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic ' curve '. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t94-061>
- García, S., Islam, M., Clark, C., & Martin, P. (2014). Kikuyu-based pasture for dairy production: a review. *Crop and Pasture Science*, 65(5), 787–797.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1071/CP13414>
- Garg, A., Leung, A. K., & Ng, C. W. W. (2015). Comparisons of soil suction induced by evapotranspiration and transpiration of *S. Heptaphylla*. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), 2149–2155. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0425>
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control*. John Wiley & Sons.
- Hernández, T. (2004). *Sembrar sin arar. Cultivos de leguminosas, pastos y otras especies sobre praderas de kikuyo con cero labranza*. (Primera Ed).
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Science.
- Huertas, J., Rodríguez, D., Madroñero, S., & Torres, N. (2018). IX Congreso Iberoamericano de Control de la Erosion y los Sedimentos. *Perdida de Suelo Por*

Erosión Hídrica En Suelos Con Plantacion de Erythroylum Coca En El Municipio de Ricaurte Nariño, Colombia., 591–603.

Lazarides, Michael, Bernadette, H. (1993). *Handbook of Economic Plants in Australia* (CSIR (ed.)).

Lu, N, & Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. Wiley.
<https://books.google.com.co/books?id=Rv1RAAAAMAAJ>

Lu, Ning, Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed - form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46, 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2009WR008646>

Lu, Ning, & Likos, W. J. (2004). *UNSATURATED SOIL MECHANICS*. Jhon Wiley \$ Sons, INC.

Marín, R. J., & Osorio, J. P. (2016). Evaluación de la estabilidad de taludes cuantificando el efecto de la vegetación. In Sociedad Colombiana de geotecnia (Ed.), *XV CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA & II CONFERENCIA INTERNACIONAL ESPECIALIZADA EN ROCAS BLANDAS. CARTAGENA 5 AL 7 DE OCTUBRE DE 2016*. (p. 8). Sociedad Colombiana de geotecnia.
<https://onepetro.org/ISRMICSR/proceedings-abstract/ICSR16/AII-ICSR16/ISRM-ICSR-2016-054/177231>

Martín, B., & Montico, S. (2005). *Fertilización foliar en pasturas: Una alternativa*. 2720, 2–4.

Matyas, E. L., & Radhakrishna, H. S. (1968). Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, 18(4), 432–448.
<https://doi.org/10.1680/geot.1968.18.4.432>

Meza, V. E. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38.
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>

Osorio, D., & Roldan, J. (2006). *Volvamos al campo. Cultivo de pastos y forrajes* (p. 104).

Grupo Latino LTDA,.

Sánchez, L., & Villaneda, E. (2009). *Renovación y manejo de praderas en sistemas de producción de leche especializada en el trópico alto colombiano* (Corpoica (ed.); Primera ed). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12867>

Schofield, R. . (1935). Third international congress of soil science. In E. C. 4 THOMAS MURBY & CO., 1, FLEET LANE (Ed.), *The pF the water in soil* (pp. 37–48).

Taylor, S. A., & Ashcroft, G. L. (1972). *Physical edaphology. The physics of irrigated and nonirrigated soils.*

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Willey and Sons, INC.

Tratch, D. J. (1995). *A Geotechnical Engineering Approach to Plant Transpiration and Root Water Uptake* [University of Saskatchewan]. <http://hdl.handle.net/10388/7605>

Vahedifard, F., Mortezaei, K., Leshchinsky, B. A., Leshchinsky, D., & Lu, N. (2016). Role of suction stress on service state behavior of geosynthetic-reinforced soil structures. *Transportation Geotechnics*, 8, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.02.002>

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed - form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

Vanapalli, S. ., Fredlund, D. G., Pufahl, D. ., & Clifton, A. . (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t96-060>

Villaneda Vivas, E., & Sánchez Matta, L. (2009). *Renovación y manejo de praderas en sistemas de producción de leche especializada en el trópico alto colombiano.*

Wilson, G. W., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(2), 151–161. <https://doi.org/10.1139/t94-021>

Wilson, G. W., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (1997). The effect of soil suction on

evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1)(1990), 145–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/t96-078>

Yoshimi, Y., & Osterberg, J. O. (1963). Compression of Partially Saturated Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 89(Issue 4), 1–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000523>