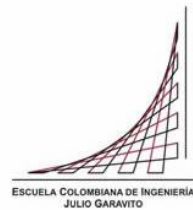


Maestría en Ingeniería Civil

Estudio de la interacción suelo - atmósfera en el suelo blando de la ciudad de Bogotá.

Andrés Felipe Mejía Ortiz

Bogotá, D.C., 16 de diciembre del 2019



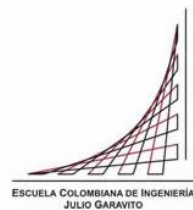
Estudio de la interacción suelo - atmósfera en el suelo blando de la ciudad de Bogotá.

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

PhD Catalina Lozada López

Directora

Bogotá, D.C., 16 de diciembre del 2019



La tesis de maestría titulada “Estudio de la interacción suelo-atmósfera en el suelo blando de la ciudad de Bogotá”, presentada por Andrés Felipe Mejía Ortiz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.

Directora de la tesis

PhD Catalina Lozada López

Jurado

PhD Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Jurado

PhD Juan Carlos Ruge Cárdenas

Bogotá, D.C., 16 de diciembre del 2019

Dedicatoria

A mi familia, ese grupo de personas por las cuales recuerdo que el valor de los esfuerzos individuales son resultado del amor desinteresado, el amor para ser.

Gracias a la vida por las oportunidades, a los miedos, a la duda; al deseo de aprender, de conocer y conocerse.

Agradecimientos

A los que creen en ti no por lo que sabes si no por tu pasión, perseverancia y lo que eres. Agradecimiento total a todas esas personas que conforman mi familia y que con su apoyo material, espiritual o emocional me ayudaron en este proceso.

Agradecimiento muy especial a las personas que conocí en el camino y se convirtieron en más que compañeros. A Catalina por su guía y orientación, a Diego, Yesica, Jordi y Marco por el apoyo. Finalmente, gracias a todas las personas que de algún modo u otro colaboraron en esta etapa.

Resumen

En este trabajo de grado se estudiaron los cambios producidos en el contenido de agua volumétrico del suelo de la sabana de Bogotá para cuatro profundidades en función del tiempo, dichos cambios fueron generados a partir de la interacción entre la atmósfera y el suelo debido al cambio de las variables atmosféricas. Se realizaron seis modelos de flujo de agua que permitieron relacionar la variabilidad atmosférica y predecir los cambios de humedad y potencial de succión del suelo a través de los resultados de un modelo numérico. Los resultados de la modelación numérica fueron comparados con las humedades medidas con sensores electrónicos que son parte de un proyecto desarrollado en la Escuela Colombiana de Ingeniería. Los resultados numéricos obtenidos se compararon con los datos experimentales por medio del cálculo de errores estadísticos dando como resultado una buena estimación de los resultados medidos con los simulados.

Abstract

In this grade work were studied the changes produced in the volumetric water content of the soil of the Bogotá savannah for four depths as a function of time, these changes were generated by the interaction between the atmosphere and the soil due to the change of atmospheric variables. Six water flow models were carried out that allowed relate the atmospheric variability and predict the humidity changes and potential of soil suction through the results of a numerical model. The results of the numerical modeling were compared with the humidity measured with electronic sensors that are part of a project developed at the Colombian School of Engineering. The numerical results obtained were compared with the experimental data through the calculation of statistical errors resulting in a good estimation of the results measured with the simulated ones.

Tabla de Contenido

Dedicatoria	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	13
Capítulo I Estado del Arte	15
1.1. Factores Climáticos	15
1.2. Incidencia de la evaporación en el flujo de agua.....	17
1.3. Influencia de las variables climáticas en el comportamiento del suelo	20
1.4. Importancia para la ingeniería geotécnica	28
1.5. Campos experimentales para el estudio de la interacción suelo-atmósfera	29
1.6. Modelos para la predicción de variaciones en propiedades del suelo	31
1.7. Hydrus - 1D	32
1.8. Ecuaciones que rigen el flujo de agua en el suelo	36
1.9. Calculo del error entre series simuladas y medidas en el tiempo.....	40
Capítulo II Problema de Investigación.....	42
2.1. Situación problema	43
2.2. Importancia.....	46
2.3. Objetivos de la investigación	48
Capítulo III Metodología	48
3.1 Datos medidos y registrados en campo	50
3.1.1 Descripción de los sensores de humedad EC-5.....	53
3.2 Predicción del contenido volumétrico de humedad θ a partir de un modelo de flujo en una dimensión	56
3.3 Estimación del error.....	58
Capitulo IV Resultados	59
4.1 Propiedades del suelo de la Escuela	59
4.2 Propiedades hidráulicas del suelo	62
4.3 Estimación de parámetros hidráulicos de la arcilla con RETC	66
4.4 Condiciones atmosféricas entre el 11 de enero y el 11 de julio del 2019	68

4.5	Relación entre las humedades medidas y la humedad relativa y temperatura ambiente	74
4.6	Evaporación potencial a partir de las variaciones atmosféricas entre el 11 de enero y el 11 de julio del 2019.....	76
4.7	Definición de parámetros del modelo numérico de flujo a partir de la comparación entre los resultados simulados y medidos en campo.....	77
4.8	Resultados del modelo numérico de flujo en 1 dimensión.....	83
4.8.1	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 1	84
4.8.2	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 2	87
4.8.3	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 3	88
4.8.4	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 4	90
4.8.5	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 5	91
4.8.6	Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 6	93
4.9	Variación del potencial de succión a partir de los modelos de flujo.....	95
Capítulo V Análisis de resultados.....		96
5.1	Análisis de los modelos a partir del cálculo del error.....	96
5.2	Análisis a partir de la dispersión	104
Capítulo VI Conclusiones.....		106
Bibliografía.....		108

Lista de Figuras

Figura 1 Límites de los pisos altitudinales en las diferentes vertientes de las cordilleras colombianas. fuente: (narváez-bravo & león-arístizabal, 2001).....	15
Figura 2 Parámetros utilizados para caracterizar las condiciones climáticas en la cuenca del río bogotá. fuente: forero et al. 1981.	16
Figura 3 Curva de retención de humedad. fuente: fredlund d. g., 2000.....	22
Figura 4 Zona no saturada y saturada del suelo. fuente: adaptado de fredlund d. g., 2000.	23
Figura 5 Relación entre evaporación real er y evaporación potencia ep versus la disponibilidad de agua para atenas. fuente: wilson, et al., 1994.	26
Figura 6 Representación del problema y adaptación al modelo numérico.	35
Figura 7 Parámetros curva swcc (adaptado de: s. k. vanapalli et al., 1996).	39
Figura 8 Probable variación del contenido de agua en diferentes etapas de la curva swcc (tomado de: s. k. vanapalli et al., 1996).....	40
Figura 9 Interacción suelo-atmósfera. fuente: lozada, 2016.	45
Figura 10 Esquema del campo experimental.	51
Figura 11 Vista en planta de la zona de estudio.	51
Figura 12 Vista en perfil de la zona de estudio.	52
Figura 13 Estación meteorológica guaymaral (rmcab).	52
Figura 14 Preparación en seco y humedecimiento en la superficie.....	54
Figura 15 Preparación por relaciones de peso.	55
Figura 16 Curva de calibración sensores de humedad ec-5.....	56
Figura 17 Lugar del sondeo para el proyecto campo experimental eci.	60
Figura 18 Medidor de potencial de agua o wp4.	62
Figura 19 Método de papel filtro.....	63
Figura 20 Medidas de θ vs potencial de succión en metros.	64
Figura 21 Medidas de θ vs potencial de succión en metros.	68
Figura 22 Humedad relativa entre el 11/01/19 y 11/07/19.	70
Figura 23 Precipitación entre el 11/01/19 y 11/07/19.....	70
Figura 24 Temperatura entre el 11/01/19 y 11/07/19.....	71
Figura 25 Velocidad del viento entre el 11/01/19 y 11/07/19.	71
Figura 26 Radiación solar entre el 11/01/19 y 11/07/19.	72
Figura 27 Variación de la humedad relativa vs humedad registrada - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.	74
Figura 28 Variación de la temperatura ambiente vs humedad registrada - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.....	75
Figura 29 Ep entre el 11/01/19 y 11/07/19.	76
Figura 30 Modelos preliminares para mes 1, nodo a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm y d) 40 cm.	79
Figura 31 Rmse calculado para los modelos preliminares.	81
Figura 32 Mape calculado para los modelos preliminares.....	82
Figura 33 Mae calculado para los modelos preliminares.....	83
Figura 34 Variación θ para el primer mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.....	85
Figura 35 Variación θ para el segundo mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.	87
Figura 36 Variación θ para el tercer mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.....	89
Figura 37 Variación θ para el cuarto mes del modelo – a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.....	90
Figura 38 Variación θ para el quinto mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.	92
Figura 39 Variación θ para el sexto mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.	94

Figura 40 Variación de la succión en el tiempo para 10 cm de profundidad.	95
Figura 41 Rmse para cada modelo.	97
Figura 42 Mape para cada modelo.....	101
Figura 43 Mae para cada modelo.....	103
Figura 44 Dispersión entre humedades medidas y simuladas.	105

Lista de Tablas

Tabla 1 Valores obtenidos calibración sensores de humedad. densidad seca 1,342 g/cm ³	55
Tabla 2 Perfil geotécnico costado norte bloque I ₂ (proyecto campo experimental eci).	59
Tabla 3 Resultados de ensayos en la arcilla del proyecto campo experimental eci.	61
Tabla 4 Consolidación en el limo arcilloso del proyecto campo experimental eci.....	61
Tabla 5 Medidas de θ vs succión para la curva swcc.....	64
Tabla 6 Calculo de θ_s con relaciones de fase.	65
Tabla 7 Calculo de θ_r con relaciones de fase.....	65
Tabla 8 Parámetros de entrada en el software retc.....	66
Tabla 9 Optimización de parámetros hidráulicos con retc.....	67
Tabla 10 Resumen variables atmosféricas por meses.....	69
Tabla 11 Valores de ep entre el 11/01/19 y 11/07/19.....	77
Tabla 12 Modelos preliminares mes 1.....	78
Tabla 13 Modelos de flujo con su respectivo periodo de tiempo.....	84
Tabla 14 Máximos y mínimos contenidos volumétricos de agua θ encontrados.	104

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Infiltración a partir del balance hídrico.....	20
Ecuación 2 Tasa de evaporación (dalton 1802).....	24
Ecuación 3 Ecuación de penman-monteith.....	25
Ecuación 4 Ecuación general ep (sartori, 2000)	25
Ecuación 5 Modificación de la ecuación de dalton (lozada, caicedo, & thorel, 2016)	25
Ecuación 6 Evaporación real sobre potencial	26
Ecuación 7 Evaporación real (wilson 1990)	27
Ecuación 8 Parámetro ae' (wilson 1990).....	27
Ecuación 9 Ecuación de flujo (richards, 1931)	32
Ecuación 10 Forma general permeabilidad no saturada	33
Ecuación 11 Condición inicial del modelo hydrus-1d.....	33
Ecuación 12 Condición límite superior dependiente de condiciones atmosféricas	34
Ecuación 13 Ecuación de penman-monteith.....	34
Ecuación 14 hA en función de variables atmosféricas.....	35
Ecuación 15 Ecuaciones curva swcc (van genuchten – mualem, 1980)	37
Ecuación 16 Parámetro de ajuste m (mualem 1976).....	38
Ecuación 17 Conductividad hidráulica (modelo van genuchten – mualem)	38
Ecuación 18 Ecuación del error Rmse	41
Ecuación 19 Ecuación del error Mape	41
Ecuación 20 Ecuación del error Mae	41

Introducción

El estudio de la relación que existe entre la atmósfera y el suelo es fundamental para comprender una serie de procesos hidro-térmicos que condicionan el comportamiento y propiedades del suelo. En la parte más superficial del suelo la cual está en contacto directo con la atmósfera, constantemente se desarrollan cambios de masa y energía produciendo consigo el cambio de estado del agua (Bras R., Entekhabi D., 1992). Dichos cambios de estado en el agua producen cambios en algunas de las propiedades y características del suelo debido al flujo ascendente o descendente al que se ve sometida el agua a través de un medio poroso como lo es el suelo (Wilson, Fredlund, & Barbour, 1994).

Los principales cambios a los cuales se ve sometido el suelo como resultado del flujo de agua producido por la interacción entre el suelo y las condiciones atmosféricas, son una serie de ciclos de humedecimiento y secado asociados a la infiltración y evaporación, los cuales conllevan cambios y deformaciones volumétricas relacionadas con la dilatación y contracción del suelo, problemas de asentamientos, disminución de la estabilidad, cambios de succión entre otros (Fredlund & Rahardjo, 1993; Sheng, 2011).

Por lo tanto, es de interés investigar dicha interacción para el caso particular del suelo blando de la ciudad de Bogotá. La importancia del estudio del suelo de Bogotá se debe a sus características particulares tanto hídricas como de comportamiento mecánico. Este suelo presenta una permeabilidad muy baja, altos niveles de succión y una baja consistencia, lo que hace que el suelo sea susceptible a las condiciones climáticas (Vesga, Caicedo, & Mesa, 2003).

En este trabajo de grado se estudiaron los cambios producidos en el flujo de agua en el suelo debidos a las condiciones atmosféricas. Para esto se compararon las mediciones experimentales de contenido de humedad con los resultados obtenidos a través de un balance hídrico en una dimensión realizado en el software de elementos finitos Hydrus 1D. Los datos experimentales se tomaron de los sensores de humedad ubicados en el campo experimental de la Escuela.

Para el desarrollo de esta investigación, inicialmente se determinaron los parámetros y características propias del suelo de la Escuela Colombiana de ingeniería. Se caracterizó el suelo en condición no saturada realizando la curva de retención de humedad la cual permite

establecer la variación de la succión en función del contenido de humedad. El ajuste de esta curva se realizó adoptando el modelo Van Genuchten - Mualem, los parámetros de ajuste de la curva se utilizaron como los valores de entrada en los modelos de flujo. Para realizar estos modelos, se tomaron como variables de entrada para la condición de frontera superior los datos atmosféricos de 6 meses de una estación meteorológica ubicada a 75m de los sensores de humedad.

En total se realizaron 6 modelos de flujo, cada uno de ellos correspondientes a un periodo de tiempo de un mes. Como resultado de estos modelos se obtuvo la variación del perfil de humedad volumétrica para 4 profundidades diferentes y la variación del potencial de succión para una profundidad. Dichas humedades, fueron comparadas con las medidas de humedad reales obtenidas con los sensores electrónicos con el fin de estimar la precisión de los modelos. Por último, se relacionaron los resultados obtenidos del perfil de variación de humedad con las condiciones atmosféricas.

Capítulo I Estado del Arte

1.1. Factores Climáticos

En los últimos años los factores ambientales han tomado un gran peso dentro de las consideraciones de proyectos tanto en el ámbito de la ingeniería como en otros ajenos a este campo (Fang & Daniels, 2006). El principal motivo se debe a las grandes variaciones climáticas y a la incertidumbre que se ha generado en lo concerniente a la intensidad y duración de los periodos secos y de lluvia (IPCC, 2014).

Los países localizados geográficamente en el trópico, como es el caso de Colombia, se encuentran expuestos a continuos cambios atmosféricos (Meehl et al., 2000). Es por esta condición, que gran parte de los suelos ubicados en estos territorios se ven sometidos a constantes cambios de temperatura y humedad.

Colombia en particular presenta una gran variabilidad de climas, pisos térmicos, pluviosidad, etc. En general, una gran variabilidad en las condiciones atmosféricas, ya que estas son particulares para cada región. Una de las razones asociadas a estos cambios climáticos, evidentemente es el variado relieve que presenta el territorio colombiano.

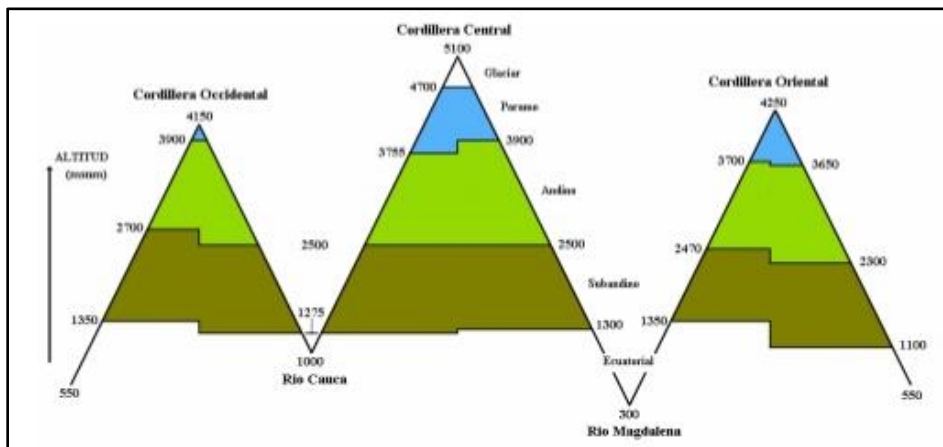


Figura 1 Límites de los pisos altitudinales en las diferentes vertientes de las cordilleras colombianas. Fuente: (Narváez-Bravo & León-Arístizabal, 2001).

Forero (Forero et al., 1981) presento la variación de la humedad relativa del ambiente en función de la altitud sobre el nivel del mar:

PISO ALTITUDINAL (msnm)		ÍNDICE DE HUMEDAD	
NOMBRE	RANGO DE ALTITUD	NOMBRE	RANGO DE VALOR
Cálido	0 - 1000	Muy húmedo	> 100
Templado	1000 - 2000	Húmedo	20 a 100
Frío	2000 - 3000	Sub-húmedo	5 a 20
Sub-páramo	3000 - 3500	Sub-húmedo seco	-5 a 5
Páramo	3500 - 4800	Semiárido	-20 a -5
		Árido	-40 a -20
		Muy árido	< -40

Figura 2 Parámetros utilizados para caracterizar las condiciones climáticas en la cuenca del río Bogotá. Fuente: Forero et al. 1981.

Se observa en la Figura 2 un gran rango de humedades relativas, estas varían ampliamente a lo largo y ancho del territorio ya que están ligadas con la temperatura del aire (del ambiente), las precipitaciones y la altitud. De manera similar ocurre con la temperatura ambiente. En algunos puntos la temperatura puede superar los 30 °C, mientras que en otras regiones como los páramos y el altiplano Cundiboyacense, esta puede decrecer a menos 0 °C. En cuanto a la precipitación, se tienen registros medios de pluviosidad tan bajos como 500 mm/año, y hasta de más de 6000 mm/año en los bosques lluviosos del choco (IDEAM, 2006).

Sumado a estas condiciones de variabilidad muy propias del territorio, una de las últimas investigaciones realizada por el IDEAM (IDEAM, 2010) reveló para Colombia un aumento de la temperatura media del orden de 0,13 °C/década para el periodo comprendido entre 1971-2000. Contemplando los escenarios de cambio climático, proyectan que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en: 1,4 °C para el 2011-2040, 2,4 °C para 2041-2070 y 3,2 °C para el 2071-2100. A lo largo del siglo XXI, los volúmenes de precipitación decrecerían entre un 15% y 36% para amplias zonas de las regiones Caribe y Andina y existirían incrementos de precipitación hacia el centro y norte de la Región Pacífica. La humedad relativa disminuiría especialmente en La Guajira, Cesar, Tolima y Huila.

Para la agencia europea del medio ambiente:

“Según la región, el cambio climático podría provocar un mayor almacenamiento de carbono en las plantas y en el suelo debido al crecimiento de vegetación o mayores emisiones de carbono a la atmósfera. Ya existen indicios de que el contenido de humedad del suelo se está viendo afectado por el aumento de las temperaturas y los cambios en las pautas de precipitación”. (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2016).

Es evidente que la variabilidad climática o atmosférica ha tomado mayor importancia en las últimas 3 décadas. Diferentes ciencias que estudian la interacción clima-suelo como la meteorología, la agricultura, la hidrología entre otras; realizan un gran esfuerzo e invierten bastante tiempo en tratar de establecer como estos cambios pueden afectar de una u otra manera diferentes propiedades, factores o parámetros de estudio particulares para cada ciencia.

1.2. Incidencia de la evaporación en el flujo de agua

Uno de los primeros en estudiar el fenómeno de la evaporación fue Dalton. Este lo realizó mediante investigación práctica y teórica al monitorear la tasa de agua que se evaporaba en un tanque, en función de la variación de temperatura, velocidad del viento y otras variables en el tiempo. Dalton estableció en la ley de presiones parciales (John Dalton, 1802), que la evaporación es directamente proporcional al déficit de presión de vapor, el cual depende netamente de las variables climáticas como la humedad relativa del aire y la temperatura ambiente. El enfoque teórico de estas formulaciones se basa en el equilibrio de masas y el equilibrio térmico que ocurre en la interfaz, entre, en este caso el agua y la atmósfera.

Posteriormente algunos autores fueron más allá y agregaron algunas consideraciones al estudio de la evaporación. El gran reto en las nuevas investigaciones consistía en evaluar cómo se desarrollaba la evaporación del agua que se encuentra en una masa de suelo. Dicha evaporación es conocida comúnmente como evaporación real. Se encontró que para una masa de suelo completamente saturada la evaporación real es igual a la evaporación potencial; sin embargo, cuando la saturación del suelo es menor al cien por ciento, la evaporación real disminuye en comparación a la evaporación potencial.

Algunos modelos simplificados intentan relacionar directamente la evaporación real con la potencial mediante un factor de reducción k (FAO, 1986). Relación que no es muy precisa para ciertos casos, ya que, si bien se conoce que la evaporación real es menor que la potencial, también hay que considerar que esta depende de factores propios del suelo como la composición mineralógica, capacidad de retención de humedad, porosidad, entre otras.

Uno de los trabajos que significó un gran avance en el estudio de la interacción suelo-atmósfera con un carácter geotécnico, fue el que desarrolló Wilson en 1990. El interés surgió gracias a la necesidad de evaluar el flujo de agua en la zona no saturada de un suelo. Para determinar esta condición Wilson estableció que es necesario realizar el balance de agua infiltrada y evaporada en la superficie del terreno (Wilson, Fredlund, & Barbour, 1994).

Conseguir esto es una tarea que en la práctica es mucho más compleja de lo que parece; ya que, para determinar la tasa real de agua evaporada en una masa de suelo, es necesario evaluar variables como la temperatura del aire, la temperatura del suelo, la radiación solar, la velocidad del viento durante la evaporación entre otras. Mediante ensayos de laboratorio en suelos tipo arena, Wilson en 1990 logró validar el método propuesto por Penman para estimar la evaporación real (Penman, 1948). Este era el primer caso en donde a partir de ensayos empíricos se realizaba una formulación teórica para calcular la evaporación real.

Sin embargo, en décadas pasadas e inclusive en la actualidad, los métodos formulados para determinar la evaporación real dependen de ciertas condiciones particulares adoptadas según cada metodología. Por ejemplo dada la dificultad de medir la variación de la temperatura ambiente en tiempo real a lo largo de la ejecución del ensayo, en varias formulaciones se optó por realizar las pruebas a una temperatura constante y controlada en laboratorio (Wilson, 1990). Condición que en un entorno real es muy poco probable encontrar.

Otro factor que limita el uso de los métodos para medir la evaporación real es que los coeficientes de las ecuaciones son producto de ensayos empíricos, lo que significa que dependen de factores propios del estudio como la pendiente del terreno, la cantidad de muestra analizada, la naturaleza del material ensayado, en general de condiciones muy particulares y en ocasiones difíciles de reproducir o medir incluso en un laboratorio.

Los resultados obtenidos a partir de los estudios, revelaron de manera general que el suelo presenta un cambio en sus parámetros a partir de la evaporación real producida por los cambios climáticos. El resultado fue generalizado para la mayoría de ensayos; independientemente de las condiciones o la manera en cómo se evaluó la evaporación en determinado suelo, al final se obtuvo que las variaciones atmosféricas si producen cambios sustanciales en las condiciones del suelo.

Las variaciones más significativas se presentaron en la parte exterior del suelo, es decir la que está más expuesta a la acción de la evaporación. La influencia de la evaporación será menor en profundidad en la medida que el suelo se encuentre saturado.

El principal cambio que presenta la masa de suelo es el cambio en su humedad, la cual puede variar ampliamente dentro de la zona no saturada. Además, indirectamente la variación de la humedad en profundidad condiciona de cierta forma la posición en la cual se encuentra el nivel freático en campo. Esta situación es la condición del suelo no saturado, en el cual el comportamiento del mismo dependerá del estado de saturación o humedad que presente el suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993).

El fenómeno de evaporación es un factor que produce una condición de saturación parcial en los suelos. Durante el fenómeno, se produce el flujo de agua tanto en estado líquido como gaseoso lo que permite al aire entrar a ocupar los espacios vacíos dentro del suelo.

Cuando el suelo se encuentra en un estado de 3 fases como la fase sólida, líquida y de vapor de agua, permite que en la zona no saturada se generen tensiones negativas (Warren Murcotte Forsythe, 1985) entre el aire y el agua. Es así como se produce el fenómeno de succión en la zona no saturada de un suelo. Esta condición es de suma importancia ya que puede inducir asentamientos por salida de agua (Victoria Elena Meza Ochoa-Fabián Hoyos Patiño, 2012), ya que cuando se produce el cambio en el esfuerzo efectivo se desarrollan las deformaciones volumétricas. Fredlund, Huang y Xing enuncian de manera directa una relación entre los cambios en la succión con cambios en la relación de vacíos (Fredlund, Xing, & Huang, 1994).

1.3. Influencia de las variables climáticas en el comportamiento del suelo

En la interfaz entre la superficie del terreno y la atmósfera se desarrollan una serie de procesos hidro-térmicos producto de la interacción entre el suelo y el clima; generando cambios de masa y energía en el sistema suelo-atmósfera. (Bras R., Entekhabi D., 1992).

Uno de los resultados de dichos procesos de interacción es el cambio de estado del agua. El cambio de estado del agua permite a su vez que se presenten cambios en la superficie del suelo, debido a que el agua presenta un flujo descendente en estado líquido o un flujo ascendente en forma de vapor. Entender este fenómeno es fundamental si se quiere analizar el comportamiento del suelo en la zona parcialmente saturada, ya que, la cantidad de agua presente en el suelo condicionara el estado de esfuerzos del mismo debido al cambio en las presiones internas.

La ecuación que predice la cantidad de agua que es suministrada por un sistema atmosférico es la ecuación de balance de agua, con esta se puede estimar la cantidad de agua que es infiltrada dentro de una masa de suelo. El balance de agua en la superficie se puede calcular como:

Ecuación 1 Infiltración a partir del balance hídrico

$$I = P - ER - T - R$$

Donde:

I es la infiltración,

P es la precipitación,

ER es la evaporación real,

T es la transpiración,

R es la escorrentía.

En un medio sin cobertura vegetal, con una pendiente entre media y suave, la infiltración de agua estará definida como la diferencia entre la precipitación y la evaporación real.

Cuando la precipitación es mayor que la evaporación, el terreno tendera a estar en una condición de saturación y el flujo de agua será descendente. La cantidad de agua que determinado suelo puede retener es función de su permeabilidad o también llamada capacidad hidráulica. Cuando la cantidad de agua que entra al sistema es mayor que el valor de la permeabilidad se espera que el material no sea capaz de filtrar el líquido desde la superficie hacia profundidad, por tanto, una lámina de agua se desarrollara en superficie, bajo este entorno se tendrá una condición de saturación en donde la totalidad de los vacíos están ocupados por agua.

Por otro lado, bajo ciertas condiciones climáticas la evaporación puede superar la precipitación generando un flujo ascendente, lo cual indica que el agua se transporta del suelo a la atmósfera en forma de vapor. La zona no saturada del suelo forma una transición entre el vapor de agua en la atmósfera y el agua subterránea. Cuando las moléculas de agua entran en contacto con las moléculas de aire caliente en la superficie ganan energía cinética por lo cual cambian a un estado gaseoso y se desarrolla flujo desde el suelo hacia la superficie libre donde la presión es atmosférica.

Durante este proceso el suelo pierde humedad, desarrollándose tensiones negativas en el interior de las partículas del suelo. Existe un punto en el cual la succión desarrollada por el agua excede la tensión desarrollada entre las partículas sólidas del suelo, permitiendo que el aire ingrese a ocupar los vacíos del suelo. De esta manera se genera un efecto de succión entre el aire y el agua que ocupan los vacíos en una masa de suelo, razón por la cual el suelo desarrolla cierta capacidad de retener agua y disminuye la evaporación.

La curva de retención de humedad es la que define la relación entre el contenido de humedad y la succión, además indica el potencial de succión que desarrolla el suelo como respuesta interna de los capilares para resistir la salida de agua ante los cambios ejercidos por factores externos como la evaporación. A menor contenido de humedad, menor será la cantidad de agua en el interior del suelo y mayor será la energía requerida para secar el material. Dicha energía requerida se puede expresar como el potencial de succión que desarrolla el suelo (Lu & Khorshidi, 2015).

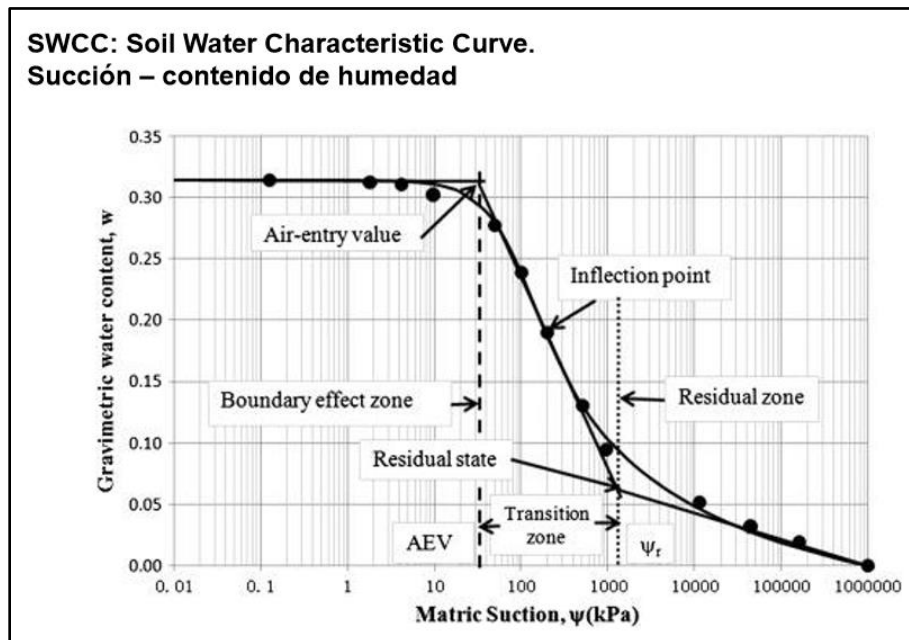


Figura 3 Curva de retención de humedad. Fuente: Fredlund D. G., 2000.

Conocer el potencial de succión es un aspecto determinante debido a que el estado de presiones condiciona la respuesta del suelo. Un aumento en las presiones positivas por ejemplo induce una disminución en la resistencia al corte y un aumento en las presiones negativas o succión supone un aumento en la resistencia al corte.

Una de las grandes dificultades que representa conocer el estado de succión interna de un suelo es que estos incrementos no son lineales (S. K. Vanapalli, Fredlund, Pufahl, & Clifton, 1996). Se han formulado diferentes modelos para representar el estado no saturado de diversos tipos de suelo, resaltando que los modelos son idealizados y poseen parámetros muy propios dependiendo de la metodología que el autor propone. Rajeev, Chan y Kodikara estudiaron en Australia la relación que existía entre el comportamiento expansivo de suelos residuales con los cambios de humedad y temperatura que sufría el suelo desde la superficie del terreno hasta 2 metros de profundidad, encontrando fuerte correlación entre cambios en la conductividad térmica e hidráulica del suelo con fuertes variaciones atmosféricas de temperatura y precipitación, lo que significó en contracciones y expansiones volumétricas en el suelo adyacente a una red de tubería la cual estaba siendo monitoreada (Rajeev, Chan, & Kodikara, 2012).

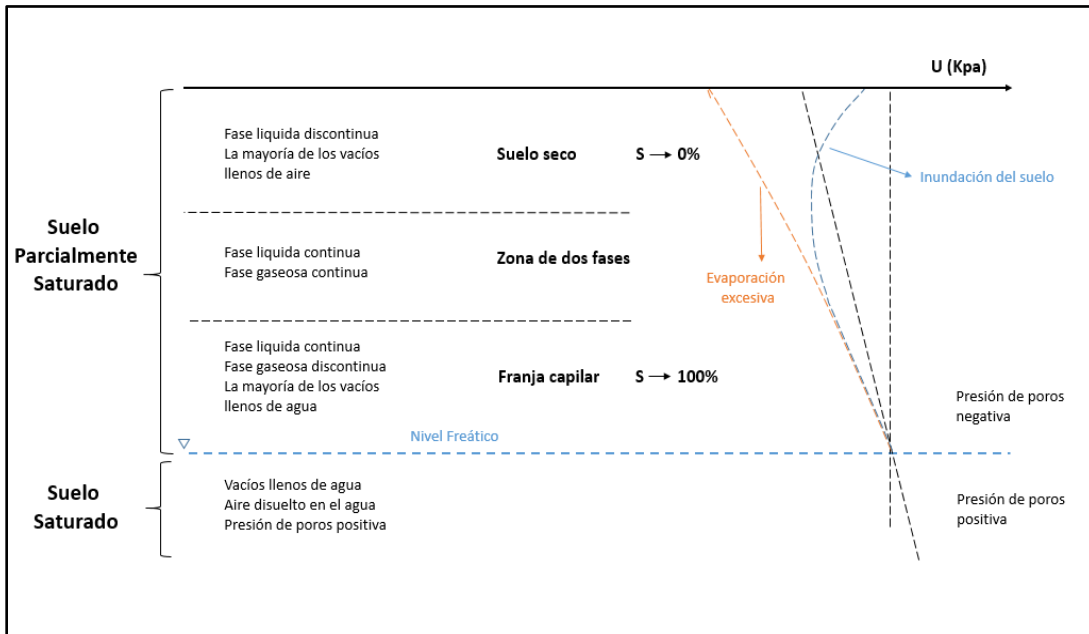


Figura 4 Zona no saturada y saturada del suelo. Fuente: adaptado de Fredlund D. G., 2000.

Es así como las condiciones climáticas afectan las presiones de poros en el interior del suelo. Como resultado existen cambios de volumen y cambios en la resistencia al corte. Muchos suelos exhiben expansión durante el humedecimiento mientras que otros pueden presentar agrietamiento en épocas de intenso verano. Otros tienen como característica particular la significativa pérdida de resistencia al corte durante el humedecimiento, disipando las presiones de poros negativas durante fuertes lluvias causando fallas en taludes, reducciones en la capacidad portante y en el módulo resiliente de carreteras. Estos fenómenos muestran la importancia de considerar las variaciones atmosféricas en el estudio de suelos no saturados, ya que los suelos no saturados no son solo una propiedad, son un estado al cual puede llegar cualquier tipo de suelo que esté sometido a ciertas condiciones externas (Fredlund & Rahardjo, 1993; Sheng, 2011).

1.3.1. Evaporación potencial

Se denomina evaporación potencial (*EP*) al proceso físico en el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso. Esta generalmente se expresa en unidades de mm/t,

siendo t una unidad de tiempo, comúnmente un día o determinada cantidad de horas, mientras que las siglas mm representan mililitros de agua.

Se han desarrollado diferentes formulaciones y ecuaciones con el fin de estimar la tasa de evaporación potencial. Formulaciones como las de Dalton (John Dalton, 1802), Bowen (Bowen, 1926), Penman (Penman, 1948) y ecuaciones como las de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) y Turc (Turc, 1954) son las más destacadas.

El primero en determinar una ecuación para predecir la tasa de evaporación de un cuerpo de agua fue Dalton en 1802. Dicha relación indica que la tasa de evaporación depende de la diferencia entre la presión de saturación de vapor en la superficie evaporante y la presión de vapor de la masa de aire sobre la superficie (esta diferencia se conoce como el Déficit de Presión de Vapor, DPV).

Es decir, la evaporación depende de la diferencia entre la cantidad de vapor de agua que puede retener el ambiente y la cantidad de vapor de agua que contiene el ambiente en ese momento.

Posteriormente, esta relación fue modificada para considerar la tasa a la cual el viento transporta las moléculas de agua evaporada. La ecuación para determinar la tasa de evaporación según Dalton es:

Ecuación 2 Tasa de evaporación (Dalton 1802)

$$\frac{dm_{vap}}{dt} = f(V_w)(\bar{u}_{vo} - \bar{u}_v)$$

Donde:

\bar{u}_{vo} es la presión de saturación de vapor a la temperatura de la superficie del agua.

\bar{u}_v es la presión de vapor del aire.

$f(V_w)$ es una función de la velocidad promedio del viento V_w .

En base a la ley de Dalton diversos autores han planteado diferentes variaciones, las cuales han tenido por objeto predecir con una mayor precisión la tasa de evaporación potencial. Los ajustes realizados en cada formulación son generalmente calibrados a partir de diferentes ensayos y pruebas. Una de las ecuaciones más adoptadas es la formulación de Penman-Monteith (Bornhofen, Benin, Galvan, & Flores, 2015) donde:

Ecuación 3 Ecuación de Penman-Monteith

$$\frac{dm_{vap}}{dt} = \left[\frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{\rho c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a)} \right]$$

Donde R_n es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, ρ es la densidad media del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicrométrica, y r_s y r_a son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

De manera general las ecuaciones presentan la forma de la ecuación propuesta por Sartori (Sartori, 2000):

Ecuación 4 Ecuación general EP (Sartori, 2000)

$$\frac{dm_{vap}}{dt} = (A_s + B_s V_w)(\bar{u}_{vo} - \bar{u}_v)$$

Donde A_s y B_s son constantes calibradas empíricamente.

Una de las mayores limitantes de la ecuación de Dalton es el requerimiento de conocer la temperatura en la superficie, lo cual es necesario para calcular \bar{u}_{vo} . Para resolver esta limitación, aproximaciones como la relación de Penman (Penman, 1948) y la relación de Bowen (Bowen, 1926) combinan diferentes relaciones físicas y empíricas para obtener la evaporación potencial. Sin embargo, por ser formulaciones empíricas estas también tienen algunas limitaciones y no son válidas para cualquier entorno o situación particular.

Lozada (Lozada, Caicedo, & Thorel, 2016) utilizando una cámara de simulación climática establece una modificación de la ecuación de Dalton basada en resultados experimentales en donde la función de velocidad de viento no es lineal sino exponencial:

Ecuación 5 Modificación de la ecuación de Dalton (Lozada, Caicedo, & Thorel, 2016)

$$f(V_w) = 0,068 e^{1,168V_w}$$

Es posible realizar a partir de ensayos en campo calibraciones a la ley de Dalton en base a datos reales tomados mediante la instrumentación, para mejorar las predicciones de la tasa de evaporación potencial.

1.3.2. Evaporación real

Se denomina evaporación real (*ER*) a la cantidad de agua líquida en una masa de suelo que mediante la acción de las condiciones meteorológicas cambia de estado a vapor de agua y es retenida por la atmósfera.

La tasa de evaporación real depende de las condiciones climáticas en la superficie del suelo y de las propiedades del suelo como la conductividad hidráulica y la difusividad del suelo, estas últimas asociadas directamente a la curva de retención de humedad propia del material.

Wilson en 1994 analizó la tasa de evaporación real en muestras de arena. La siguiente imagen muestra el cambio en la tasa de evaporación real *ER* y potencial *EP* versus la disponibilidad de agua en la superficie de una arena.

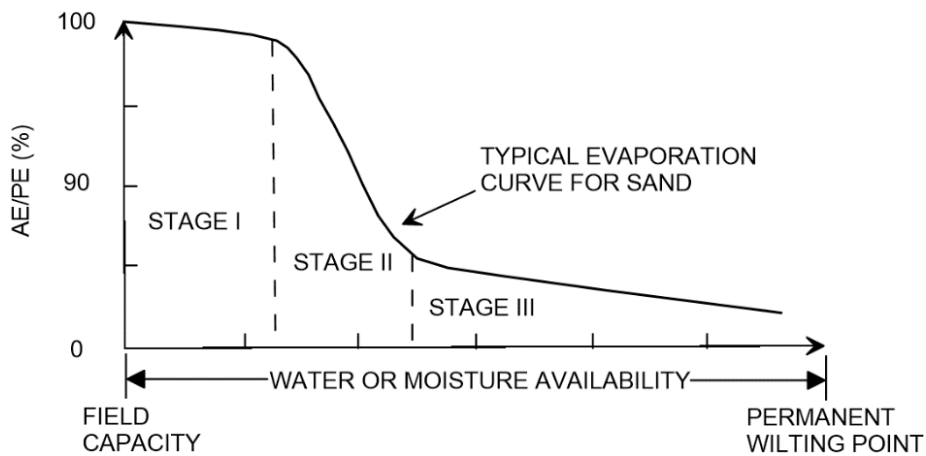


Figura 5 Relación entre evaporación real *ER* y evaporación potencial *EP* versus la disponibilidad de agua para Arenas. Fuente: Wilson, et al., 1994.

En la primera fase de la prueba, el suelo se mantiene en condición saturada y la tasa de evaporación real es igual a la evaporación potencial.

Ecuación 6 Evaporación real sobre potencial

$$\frac{ER}{EP} = 100\%$$

En esta etapa, los valores de succión son menores y la conductividad hidráulica es cercana a la conductividad hidráulica saturada.

A medida que el suelo se seca, la succión mátrica excede el Valor de Entrada de Aire (*VEA*), generando una restricción del flujo de agua líquida. Esto explica el comienzo de la segunda etapa.

El Valor de Entrada de Aire es el punto de la curva de retención de humedad en la que el aire comienza a entrar a los vacíos más grandes del suelo y la succión aumenta. En esta etapa, el grado de saturación y la tasa de evaporación disminuyen. A medida en que la superficie del suelo se seca y no hay agua líquida disponible, el transporte de agua se explica por la difusión de moléculas de aire hacia la superficie. Finalmente, en la tercera etapa, la tasa de evaporación alcanza un valor residual. El proceso de difusión de vapor también puede explicar esta etapa.

Para determinar la evaporación real en los suelos, la ecuación propuesta por Penman fue modificada por Wilson (1990). Esta ecuación reemplaza la presión de saturación de vapor por la presión de vapor en la superficie del suelo. La ecuación que describe la evaporación real *ER* es:

Ecuación 7 Evaporación Real (Wilson 1990)

$$ER = \frac{\Gamma Q_n + \eta AE'}{\Gamma + \eta A}$$

Donde:

Γ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor versus la temperatura del aire,

Q_n es la radiación neta en la superficie del suelo [mm/día],

η es la constante psicométrica,

A es el inverso de la humedad relativa en la superficie del suelo ($A=1/HR_s$),

HR_s es la humedad relativa en la superficie del suelo,

AE' es un coeficiente que relaciona el efecto del viento y el *DPV*:

Ecuación 8 Parámetro AE' (Wilson 1990)

$$AE' = 0,35(1 + 0,146V_w)\bar{u}_{vs} \left(\frac{1}{HR_a} - \frac{1}{HR_s} \right)$$

Donde:

V_w es la velocidad del viento,

\bar{u}_{vs} es la presión de vapor en la superficie del suelo en [mm Hg];

HR_a es la humedad relativa del aire,

HR_s es la humedad relativa en la superficie del suelo.

Esta ecuación es la forma general de la ecuación de Penman cuando la superficie del suelo está saturada ($HR=100\%$).

La ecuación propuesta por Wilson en 1990 es la más utilizada para estimar la tasa de evaporación real del suelo, sin embargo, al ser una ecuación ajustada en laboratorio tiene ciertas restricciones.

En el ensayo realizado por los autores mencionados anteriormente se utilizó arena, la temperatura fue constante y controlada en laboratorio. Por lo tanto, los coeficientes empíricos de calibración y ajuste pueden no ser iguales para predecir la tasa de evaporación bajo otras condiciones.

1.4. Importancia para la ingeniería geotécnica

Para el caso puntual de la ingeniería geotécnica, son diversos los estudios que se han realizado sobre el cambio de las propiedades geotécnicas a partir de las variaciones atmosféricas. Investigaciones del cambio en la microestructura a partir de ciclos de humedecimiento y secado (Guntiñas Rodríguez María Elena, 2009), el cambio en la resistencia por el efecto ambiental (S. Vanapalli & Mohamed, 2007), el comportamiento del suelo tras el congelamiento, entre otras, han permitido reconocer la influencia de la atmósfera sobre cambios en el suelo.

El entendimiento de la interacción suelo atmósfera es una tarea complicada dado que es un problema acoplado donde se involucran procesos de transferencia de masa y calor. La correlación que existe entre las diferentes variables se debe a los cambios de estado del agua y su paso de un medio poroso como lo es el suelo a la atmósfera o viceversa. Un aumento en la temperatura genera una reducción en el contenido volumétrico de humedad y por ende un aumento en la succión; sin embargo, cuando la succión aumenta, el suelo aumenta la capacidad de resistir la evaporación, y por tanto la tasa de pérdida de humedad disminuye.

Blight y otros autores (G. Blight, 2009; Geoffrey Blight, 2013) desarrollaron un modelo de interacción el cual involucra todas las variables atmosféricas y las propiedades del suelo y fue aplicado en diversos casos de estudio con suelos no saturados, con el fin de comprender de mejor manera el comportamiento de los mismos a partir de las variaciones atmosféricas.

Esta metodología fue aplicada para el estudio de afectaciones generadas a partir de la variabilidad atmosférica, como por ejemplo la estabilidad de un depósito de lixiviados en Sudáfrica o las grietas en las vías de tren de alta velocidad en París. Los resultados obtenidos fueron buenos en general, se logró relacionar los cambios atmosféricos con cambios en el comportamiento del suelo como cambios volumétricos o formación de grietas.

Sumados a estos casos de estudio, existen otras investigaciones en donde se evaluó el comportamiento particular del suelo ante variaciones climáticas. Se han realizado pruebas en laboratorio, modelos a escala reducida, modelación en centrifuga geotécnica y mediciones en campo.

A pesar de esto, una limitante que poseen en general la mayoría de investigaciones, es que hay cierta desviación en entre los resultados obtenidos a partir de la modelación y la realidad que el suelo presenta en campo.

1.5. Campos experimentales para el estudio de la interacción suelo-atmósfera

Con el ánimo de comprender de mejor manera la relación existente entre el clima y los cambios que esta produce en la masa de suelo, se ha optado por desarrollar estudios en campos experimentales expuestos a la intemperie.

En la última década esta ha sido una tendencia que se ha incrementado fuertemente. La ventaja que estos campos tienen con respecto a los ensayos de laboratorio, centrifuga geotécnica y modelación en cámaras climáticas, es que estos permiten predecir la tasa de evaporación real con datos reales medidos en campo. Para esto, en las diferentes investigaciones de este tipo se ha recurrido a la ayuda de diversas herramientas que permiten tomar información tanto de los datos climáticos como de las variaciones en las propiedades en el suelo. Las herramientas

incluyen sensores con diferente tipo de tecnología, usados comúnmente en meteorología y agronomía para los cuales se han desarrollado softwares especializados que facilitan la recolección de información en campo.

Basados en los modelos propuestos por Blight y Wilson para predecir la evaporación a partir del balance hidro-térmico, Cui, Lu, Delage y Riffard implementaron un campo en Boissy-le-Chatel, Francia el cual permitía predecir los cambios en el contenido de humedad de manera teórica. Uno de los aspectos favorables de este trabajo es que se encontró una buena correlación entre los valores calculados a partir de los modelos teóricos y los valores registrados en campo (Delage, Riffard, Lu, & Cui, 2005).

La zona de estudio constaba de un área en panta de 615 m^2 y contaba con diferentes sensores que permitían medir tanto variables climáticas como del suelo. Para registrar los diferentes parámetros y su respectiva variación se disponía de una estación meteorológica, sensores de temperatura del ambiente, piezómetros y sensores para medir la humedad en el suelo.

Años siguientes Cui realizó un estudio similar basado en la instrumentación de un terraplén construido en Francia. El objetivo de esta investigación consistía en hacer un seguimiento a los desplazamientos tanto horizontales como verticales en el eje del terraplén, además de identificar el comportamiento del mismo en función de las variaciones del flujo de agua a través del mismo (Cui, Gao, & Ferber, 2010). Los datos recolectados a partir de la instrumentación sirvieron para validar los modelos teóricos. Se encontró una buena correlación entre los valores teóricos y los medidos en campo.

Otro caso en el cual se estudió la interacción entre el suelo y la atmósfera a partir del monitoreo de los cambios climáticos y las variaciones en el suelo, es el realizado por Rajeev, Chan, y Kodikara en Australia (Rajeev, Chan, & Kodikara, 2012). Allí se evaluó el comportamiento de suelos expansivos, los cuales conformaban el material de fundación de redes subterráneas de tubería de conducción de gas en Melbourne. Se encontró una relación directa entre las afectaciones en las tuberías con los cambios volumétricos producidos por el humedecimiento y secado de los suelos.

En general los diferentes campos experimentales son una buena herramienta la cual permite realizar un estudio detallado de la interacción entre el clima y las propiedades del suelo. La gran ventaja de su uso radica en que los datos

recolectados son una fuente de información que permite validar la precisión de las ecuaciones existentes hasta el momento para estimar variables como la evaporación potencial, real, la estimación de propiedades del suelo como el contenido de humedad y la succión que condicionan el comportamiento del suelo en la zona no saturada. Además, permiten identificar ciertos patrones de comportamiento particulares de la masa de suelo a través del tiempo, como el cambio en el nivel freático, los cambios de humedad y la variación de la succión, los cuales son fundamentales dentro de las consideraciones geotécnicas para el diseño, construcción y posible comportamiento de estructuras como fundaciones, estructuras de pavimento, redes de tubería subterránea, taludes, entre otras.

1.6. Modelos para la predicción de variaciones en propiedades del suelo

Los modelos numéricos son una herramienta que recientemente han tomado un gran peso dentro de los estudios de ingeniería en particular, debido a que permiten simular diferentes tipos de fenómenos a partir de nodos y elementos a los cuales se les asignan una serie de ecuaciones matemáticas que representan propiedades físicas en el medio natural-real. La gran ventaja que estos modelos presentan frente a estudios de laboratorio o campo es la facilidad de estimar diferentes propiedades en poco tiempo y sin necesidad de invertir grandes cantidades de recursos, ya que, estos predicen dichas propiedades a través de la solución de un sistema de ecuaciones que representan, por ejemplo, un entorno como el suelo y variables externas como las condiciones atmosféricas.

Sin embargo, una de las limitantes que estos modelos numéricos reflejan es la incertidumbre en lo concerniente a las condiciones de contorno, lo que en muchos casos conlleva a la no convergencia del modelo o incluso a estimaciones o predicciones equivocadas. Es por esto que complementar los modelos numéricos con mediciones verídicas en campo realizadas por instrumentos de medición calibrados se convierte en un gran acierto; las variables externas que son medidas y de las cuales se tiene un buen grado de confianza se convierten en una herramienta fundamental en los modelos ya que permiten discretizar de manera más

realista el problema y así es posible obtener una estimación más precisa de las variables deseadas.

Para el caso particular de estudios de interacción entre el suelo y la atmósfera como es el caso particular de esta investigación, existen algunos programas computacionales pertenecientes al campo de la hidrología sub-superficial que permiten simular el flujo de agua en un medio poroso con el fin de predecir las variaciones del suelo en determinado periodo de tiempo. Gran parte de estos modelos se basan en la teoría de elementos o diferencias finitas, dichos programas tienen una serie de parámetros de entrada que representan la geometría del problema, las propiedades del suelo, las condiciones atmosféricas, por nombrar solo algunas. En general se puede decir que dichos programas permiten elaborar modelos realistas a partir de propiedades hidráulicas (que pueden ser constantes en algunos modelos o variables en modelos más complejos), condiciones de frontera que presentan la realidad del problema y condiciones externas que son aquellas inducen cambios en el modelo (Montzka et al., 2011).

1.7. Hydrus - 1D

Hydrus - 1D es un software de elementos finitos que permite simular el flujo de agua en una dimensión para diferentes condiciones de saturación en un medio poroso como lo es el suelo; esto es posible gracias a que el programa resuelve la ecuación de flujo de Richards (Richards, 1931; Šimůnek, Šejna, Saito, Sakai, & van Genuchten, 2013) considerando la variación del contenido volumétrico de humedad en función del potencial de succión y la permeabilidad del suelo. Dicha ecuación está dada por la expresión:

Ecuación 9 Ecuación de flujo (Richards, 1931)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right]$$

Donde:

h es la cabeza de presión, θ es el contenido volumétrico de humedad, t es el tiempo, x la coordenada espacial o posición dentro del modelo, α el ángulo que forma la dirección del flujo con la vertical ($\alpha = 0^\circ$ para flujo vertical, 90° para flujo horizontal y $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para flujo inclinado), K es la permeabilidad o también llamada conductividad hidráulica no saturada que a su vez está dada por la expresión:

Ecuación 10 Forma general permeabilidad no saturada

$$K(h, x) = K_s(x) K_r(h, x)$$

Donde:

K_r es la permeabilidad relativa, la cual es definida de diferentes formas por diversos autores, en función de ciertos parámetros del suelo,

K_s es la permeabilidad en condición saturada.

Mediante este software es posible realizar predicciones en el tiempo de las variaciones en el suelo a partir de variaciones atmosféricas; también se deben seleccionar ciertos criterios como el número de iteraciones, los intervalos de tiempo, la precisión, número de nodos y otros parámetros que si bien no representan aspectos físicos del problema son indispensables para la solución del mismo. A estos parámetros se les suele llamar parámetros del modelo

Teniendo en cuenta esto, para predecir el contenido volumétrico de humedad del suelo (θ) de una manera realista, este programa integra condiciones conocidas a las ecuaciones de diferentes modelos que representan la no linealidad de las propiedades del suelo para calcular las variaciones considerando la variable tiempo (t). Es decir, si tomamos como ejemplo la Ecuación 9 se hace necesario indicar alguna condición conocida en un tiempo dado como parámetro de entrada para la solución de la ecuación; para este caso particular se hace necesario indicar una condición inicial, bien sea en términos de humedad (θ) o en términos de succión (h):

Ecuación 11 Condición inicial del modelo Hydrus-1D

$$\begin{cases} h(x, t) = h_i(x) & t = t_0 \\ \theta(x, t) = \theta_i(x) & t = t_0 \end{cases}$$

Adicionalmente, para el caso particular de esta investigación en donde se desea estudiar el efecto de las variaciones atmosféricas sobre las propiedades del suelo, se tiene una condición para la cual la frontera de contorno superior del modelo es dependiente de las condiciones atmosféricas externas, por tanto, el flujo de agua en el suelo y la correspondiente variación en el contenido de humedad dependerá tanto de la condición inicial impuesta como de las condiciones atmosféricas correspondientes que afectan la interfaz suelo-atmósfera en la superficie. Matemáticamente esto está descrito por la Ecuación 12:

Ecuación 12 Condición límite superior dependiente de condiciones atmosféricas

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \right| \leq E \quad \text{en} \quad x = L \\ y \\ h_A \leq h \leq h_S \quad \text{en} \quad x = L \end{array} \right\}$$

En esta ecuación se restringe el flujo de agua con la primera condición, aquí se expresa que el flujo de agua hacia profundidad debe ser menor o igual al factor E , el cual representa en Hydrus-1D la máxima tasa de infiltración (I) o la máxima tasa de evaporación E_p , calculadas a partir de las condiciones atmosféricas correspondientes.

La tasa de evaporación E_p se determina con la ecuación de Penman-Monteith descrita por la Ecuación 13:

Ecuación 13 ecuación de Penman-Monteith

$$E_p = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{\rho c_p(e_a - e_d)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \right]$$

Es evidente que el flujo y el contenido volumétrico de humedad (θ) son variables dependientes del potencial de succión (h), dicho flujo está restringido entre los valores h_A y h_S los cuales representan el potencial de succión mínimo y máximo desarrollado en la superficie del suelo que está en contacto con la atmósfera. Los valores de h por convención se consideran como números negativos. El valor de h_A se determina a partir de las condiciones de equilibrio térmico y transferencia de

masa-energía entre el agua del suelo y el vapor de agua atmosférico (Šimůnek et al., 2013), mientras que h_s generalmente se establece igual a cero; cuando h_s toma valores positivos representa una pequeña capa de agua acumulada que puede formarse sobre la superficie del suelo durante fuertes lluvias y demuestra que la capacidad de infiltración del suelo fue superada por la precipitación.

Es posible estimar el mínimo potencial de succión h_A en la superficie del terreno que condicionara el flujo de agua y el contenido de humedad (θ), mediante la Ecuación 14 que considera las variables atmosféricas en la interfaz.

Ecuación 14 h_A en función de variables atmosféricas

$$H_r = \exp \left[\frac{h_A M g}{RT} \right]$$

De esta manera se acoplan las ecuaciones que describen el comportamiento no saturado del suelo con los procesos de transferencia de masa y calor que ocurren en la interfaz suelo suelo-atmósfera. Para comprender de mejor manera la física del modelo se presenta en la Figura 6 un bosquejo de los elementos que componen la realidad del problema y su respectiva simplificación a ecuaciones matemáticas para su resolución.

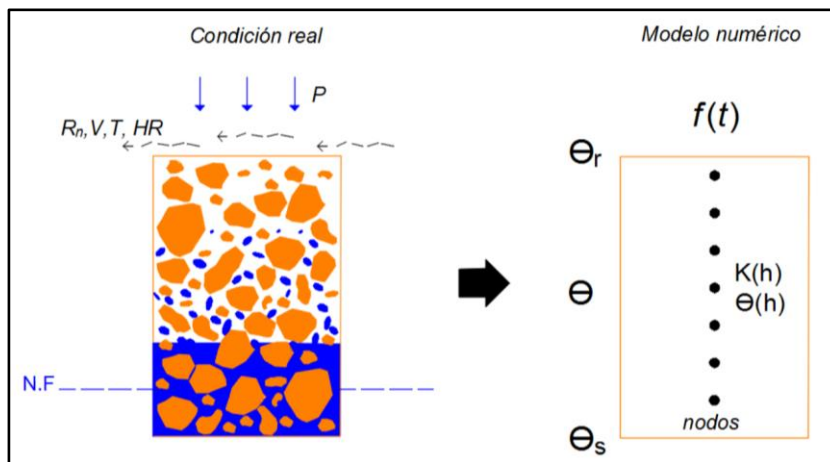


Figura 6 Representación del problema y adaptación al modelo numérico.

En esta figura se puede observar que los elementos que componen el suelo son representados en el modelo numérico por nodos a los cuales son asignados las

ecuaciones que rigen el flujo de agua en el suelo; ecuaciones que fueron comentadas anteriormente y de las cuales se profundizara en el siguiente capítulo. Adicionalmente, se observa en la imagen que la geometría del problema está acotada por una condición de frontera superior e inferior. Estas fronteras de contorno condicionaran el comportamiento que gobiernan la interacción entre el suelo y la atmósfera, ya que, para cada condición específica se asignaran una serie de ecuaciones que corresponden a la realidad física del fenómeno. Es decir, para la condición superior se tiene la imposición de variables atmosféricas cambiantes en el tiempo, por lo tanto, estas serán una función que impondrán cambios en los nodos superiores del modelo donde el suelo está en contacto con la atmósfera. Mientras que en la condición inferior se tiene que para un metro de profundidad hacia abajo el suelo siempre estará en estado de saturación, por lo cual la succión no condicionara el comportamiento del suelo, la función que describe el límite inferior del modelo será θ_s . La variación del perfil de humedad y succión de este modelo estará dada para un metro de profundidad de suelo.

De lo anterior se puede concluir que la respuesta que calcula el modelo numérico que representa las variaciones del suelo en el tiempo estará condicionada por la suma de las ecuaciones que representan el comportamiento del suelo (cada modelo plantea sus ecuaciones), las condiciones externas que imponen cambios o variaciones (en este caso condiciones atmosféricas variables), la geometría modelo, las condiciones iniciales y los parámetros del modelo (número de iteraciones, intervalos de tiempo, numero de nodos, etc...).

1.8. Ecuaciones que rigen el flujo de agua en el suelo

El flujo de agua a través del suelo es condicionado por las propiedades hidráulicas del suelo, por ende, la ecuación de Richards y otras ecuaciones similares dependen de características como la permeabilidad y el contenido volumétrico de humedad ($\theta(h)$ y $K(h)$ respectivamente). Estas son funciones no lineales dependientes de la presión de agua, por lo tanto, se hace necesario acoplar la ecuación de Richards

con ecuaciones que consideren las propiedades no saturadas del suelo con el fin de obtener un sistema de flujo de agua uniforme.

Varios autores han formulado diferentes modelos empíricos con el fin de predecir estas variables no saturadas a partir de ecuaciones matemáticas complejas, dentro de los modelos más destacados se encuentran los de Brooks y Corey (Brooks & Corey, 1964), Jeppson (Jeppson, 1974). Uno de los modelos más aceptados para estimar y predecir dichas propiedades hidráulicas del suelo es el propuesto por Van Genuchten (Genuchten, 1980) quien ajusto los parámetros de distribución de tamaño de poros propuesto por Mualem (Mualem, 1976), satisfaciendo las ecuaciones propuestas en su modelo ajustado a partir de los parámetros de la curva de retención de agua. Así, se estableció el modelo Van Genuchten-Mualem en donde se incorporan todos los parámetros físicos y de forma de la curva característica de retención de humedad o SWCC ($\theta(h)$) y la distribución de tamaño de poros; la conductividad hidráulica o curva de permeabilidad ($K(h)$) es función de la permeabilidad relativa, quien a su vez es dependiente del potencial de succión. Matemáticamente las ecuaciones del modelo Van Genuchten y Mualem están dadas por la Ecuación 15 y Ecuación 17:

Ecuación 15 Ecuaciones curva SWCC (Van Genuchten – Mualem, 1980)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & \text{si } h < 0 \\ \theta_s & \text{si } h \geq 0 \end{cases}$$

Donde:

θ_r es el contenido de humedad residual, físicamente representa el mínimo valor de humedad volumétrica que alcanza determinado suelo y matemáticamente puede ser considerado como un valor mínimo asintótico,

θ_s es el contenido de humedad saturado, físicamente representa el máximo valor de humedad volumétrica que alcanza determinado suelo y matemáticamente puede ser considerado como un valor máximo asintótico,

α es el inverso del valor de entrada de aire (VEA), el cual indica el valor de succión para el cual cambia el comportamiento de la curva SWCC y a partir de allí se

desarrollan grandes valores de succión, matemáticamente describe un punto de inflexión donde se evidencia un fuerte cambio en la pendiente de la curva SWCC, n es un parámetro de ajuste empírico relacionado con la distribución de los tamaños de los poros que componen el suelo, m es un parámetro de ajuste dado por:

Ecuación 16 Parámetro de ajuste m (Mualem 1976)

$$m = 1 - 1/n$$

Para la primera condición enunciada en la Ecuación 15, se considera que existe un potencial de succión y su valor es menor a cero, lo que indica que los poros están ocupados por aire y agua (saturación parcial del suelo); mientras que en la segunda condición las presiones de poros son positivas y se asume que el suelo se encuentra en condición de saturación.

En la Ecuación 17, se tiene en cuenta el cambio en la conductividad hidráulica del suelo en función de la succión, esto mediante los parámetros de la curva SWCC mencionados anteriormente; la permeabilidad no saturada se define en función de la permeabilidad saturada y la saturación efectiva de la forma:

Ecuación 17 Conductividad hidráulica (modelo Van Genuchten – Mualem)

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{l/m})^m \right]^2$$

Donde:

K_s es la permeabilidad en condición saturada,

l es el parámetro de conectividad de poros.

Estos parámetros de ajuste se obtienen de la curva SWCC, la cual relaciona los cambios en el contenido humedad volumétrico con la succión. Todos los modelos mencionados anteriormente desarrollan una metodología muy propia con sus respectivas consideraciones empíricas, en donde se miden las diferentes propiedades de diversas maneras y a su vez se proponen diferentes ecuaciones.

Se presenta en la Figura 6 una curva SWCC con un comportamiento típico, donde se pueden observar los parámetros θ_r , θ_s , α y n . En la parte superior izquierda de

dicha figura se encuentra la zona de saturación del suelo, en la cual no se desarrolla el efecto de succión o sus magnitudes son muy bajas. Esta zona está gobernada por la parte inferior de la Ecuación 15, donde se tiene un valor constante de θ_s . Por otro lado, en la parte inferior derecha de la imagen podemos encontrar una situación antípoda, donde, se tienen valores bajos de humedad hasta llegar al valor residual θ_r , pero los valores de succión son muy elevados.

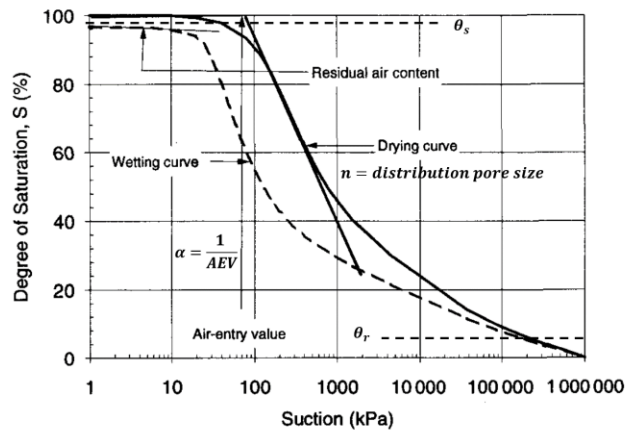


Figura 7 Parámetros curva SWCC (Adaptado de: S. K. Vanapalli et al., 1996).

En la parte central de la Figura 6 el suelo desarrolla una zona de transición, en la cual los vacíos de la estructura del suelo pasan de ser ocupados por agua a ser ocupados por aire gradualmente, a este fenómeno se le conoce como de-saturación. En esta zona el valor de humedad será un valor intermedio entre $\theta_s < \theta_h < \theta_r$ y dependerá del valor de succión h . Para calcular el valor numérico de θ_h se utiliza la parte superior de la Ecuación 15.

Para entender de mejor manera el proceso en el cual el suelo desarrolla succión en sus capilares, Vanapalli presenta una gráfica donde se visualizan las etapas que sufren los poros del suelo durante el fenómeno de de-saturación, esta imagen se presenta en la Figura 8.

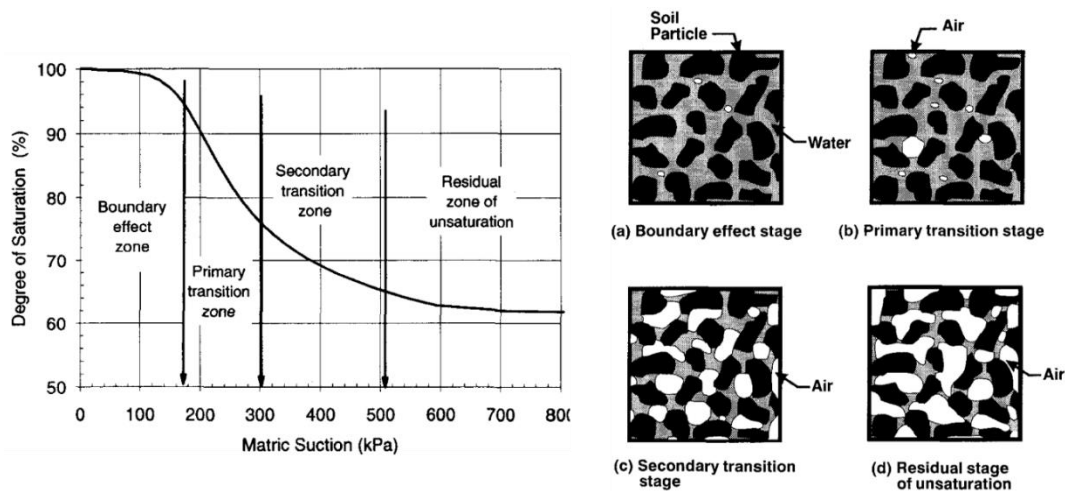


Figura 8 Probable variación del contenido de agua en diferentes etapas de la curva SWCC (Tomado de: S. K. Vanapalli et al., 1996).

Se puede observar que para las 4 etapas o zonas de la curva SWCC hay una imagen de correspondencia en la parte derecha de la imagen, con la nomenclatura a, b, c y d. En (a) representa la zona saturada, aquí todos los vacíos están ocupados por agua. En (b) y (c) inicia el proceso de secado y se permite el ingreso de aire a los vacíos, mientras disminuye el contenido de agua aumenta el valor de succión además el contacto partículas sólidas-agua se vuelve discontinuo. Para instancias finales de la zona de transición se tienen aumentos considerables en la succión ante variaciones mínimas del contenido de humedad. Por ultimo en (d) se tiene la zona residual, para la cual el suelo no presenta una disminución en su humedad ante el fenómeno de secado.

1.9. Cálculo del error entre series simuladas y medidas en el tiempo

Para evaluar la precisión de modelos que involucran la predicción de propiedades, magnitudes u otros tipos de variables en el tiempo, existen ciertos métodos estadísticos que permiten estimar la desviación entre dichos valores estimados a partir de la simulación numérica frente a los valores de dichas variables que han sido medidas o cuantificadas en la realidad. Métodos como la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*), el Error Porcentual Absoluto Medio (*MAPE*) y el Error Absoluto

Medio (*MAE*). El cálculo de estos errores en modelos hidrológicos han permitido calcular de buena manera la diferencia entre valores predichos y medidos a través del tiempo (Xing, Wang, & Ma, 2018).

Al aplicar el método *MAE* y *RMSE* la diferencia entre las variables medidas y predichas se expresa en las mismas unidades de las variables que están siendo producto de comparación, mientras que aplicar el criterio *MAPE* esta diferencia será una medida porcentual. Por ejemplo, para este estudio en particular, al aplicar *RMSE* y *MAE* entre la humedad simulada θ_{sim} y la humedad medida en campo θ_{med} el error estará expresado por la diferencia entre estas humedades en unidades de contenido volumétrico de humedad (θ) para un mismo instante de tiempo (t), mientras que al aplicar *MAPE* el error se expresa como una medida porcentual, ya que, en este método se normaliza el error.

El Error Cuadrático Medio (*RMSE*) se determina mediante la Ecuación 18, el Error Porcentual Absoluto Medio (*MAPE*) se determina con la Ecuación 19 y el Error Absoluto Medio (*MAE*) se calcula mediante la Ecuación 20 las cuales se presentan a continuación:

Ecuación 18 Ecuación del error *RMSE*

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\rho} * \sum_{i=1}^{\rho} (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2}$$

Ecuación 19 Ecuación del error *MAPE*

$$MAPE = \frac{1}{\rho} * \sum_{i=1}^{\rho} \left| \frac{\theta_i - \hat{\theta}_i}{\theta_i} \right| * 100\%$$

Ecuación 20 Ecuación del error *MAE*

$$MAE = \frac{1}{\rho} * \sum_{i=1}^{\rho} |\theta_i - \hat{\theta}_i|$$

Donde:

ρ es la población o el total de datos,

θ_i es el contenido de humedad volumétrico medido en un tiempo t ,

$\hat{\theta}_t$ es el contenido de humedad volumétrico simulado para el mismo instante de tiempo t .

Capítulo II Problema de Investigación

Para la ingeniería civil el suelo juega un papel fundamental bien sea de manera directa o indirecta ya que mediante este se articulan todos los aspectos y elementos que conforman cualquier tipo de obra u proyecto con la superficie de la corteza terrestre. Sin embargo, a ciencia cierta son diversas las incertidumbres en lo referente a como la atmósfera induce una serie de cambios en la superficie del suelo a partir de variaciones en la interfaz suelo-atmósfera.

En estudios agrícolas e hidrológicos se ha encontrado una relación directa entre los cambios evidenciados en los primeros metros de la superficie del suelo cuando se producen cambios atmosféricos. Sin embargo, en estos estudios se estudian parámetros diferentes a los de interés para la ingeniería civil; por lo cual no es posible evaluar la incidencia de las variables atmosféricas en propiedades como la deformabilidad, resistencia, tixotropía, parámetros hidráulicos los cuales juegan un papel fundamental en la relación entre el suelo y estructuras geotécnicas.

Además, dentro de las investigaciones que se han realizado son pocos los casos en los cuales se consideren suelos arcillosos, condición que motiva a plantear la siguiente pregunta de investigación:

¿Como se puede predecir el efecto de las variaciones climáticas en el contenido de humedad a partir de un modelo numérico?

Considerando que gran parte del suelo de fundación de la ciudad de Bogotá es un depósito lacustre y que las variaciones atmosféricas son un factor intrínseco debido a la geografía y geomorfología de la ciudad, es pertinente realizar un estudio detallado de las variaciones en algunas de las propiedades del suelo considerando las variaciones atmosféricas. Con el

fin estudiar la incidencia de la atmósfera sobre los cambios en el suelo de la sabana de Bogotá.

2.1. Situación problema

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea al planeta la cual está compuesta principalmente por una serie de diferentes gases, que en su conjunto denominamos aire. Gracias a dicho manto que cubre a la tierra se pueden llevar a cabo diferentes procesos bióticos de los cuales depende la vida en la tierra ("Meteorología en red | El tiempo," 2017). Además, esta cumple con diferentes funciones, como controlar la cantidad de rayos solares que ingresan a la corteza terrestre y regular la temperatura del planeta.

Las variables atmosféricas además de tener gran importancia para los organismos vivos, también juegan un papel fundamental en los procesos inorgánicos como la formación del subsuelo y está relacionada con muchos de los cambios que se presentan en el mismo. Desde hace millones de años la atmósfera ha inducido mediante diferentes procesos una serie de cambios que han condicionado la formación y sobre todo la pedogénesis de los suelos que conforman la corteza terrestre (Francisco & Jaramillo, 2002). Es decir, la atmósfera además de influir en la formación del suelo, también lo hace en cierto grado en el comportamiento del mismo.

Durante la formación de suelos de tamaños finos (principalmente los que son compuestos por minerales arcillosos), el arreglo de los enlaces entre partículas se realiza en función de la cantidad de agua disponible en el suelo, su pH, la temperatura del ambiente, la energía disponible para el intercambio catiónico, entre otras variables de carácter climático o atmosférico. En el caso de los suelos no saturados, los parámetros mecánicos y el comportamiento dependerán de la relación succión-contenido volumétrico de agua, ejercida por tensión intersticial de los poros en la zona no saturada (Fredlund & Rahardjo, 1993). Otro ejemplo donde se puede observar como el clima condiciona el comportamiento del suelo, es el caso de los suelos residuales en los cuales sus características y comportamiento

dependerán principalmente del grado de meteorización que dicho suelo haya sufrido. El cual es función de la velocidad del viento sobre el material, la energía de impacto del agua precipitada, la cantidad de agua precipitada (y su pH), la temperatura del ambiente entre otras.

Aun después de su formación, el suelo mantiene un contacto directo con la atmósfera, motivo por el cual este permanece en un constante cambio producto de las variaciones ambientales.

Además de la interrelación que existe entre el suelo y la atmósfera, existen otros factores que intervienen en dicha interacción, como por ejemplo la morfología del terreno, los procesos químicos que desarrolla el agua en el medio poroso (suelo) (Breemen & Buurman, 2002) y los diferentes intercambios energéticos y de masas que ocurren directamente entre la atmósfera y la corteza terrestre.

La relación suelo-atmósfera también es recíproca, ya que algunas condiciones particulares que presente la masa de suelo puede generar cambios en las variables atmosféricas. El centro de la atmósfera de la UNAM describe: “la humedad del suelo juega un papel importante en la partición de energía en la superficie y en los mecanismos de retroalimentación con la atmósfera” (UNAM - C. Ciencias de la Atmósfera, 2012)

Lo que refleja que propiedades del suelo como el contenido de humedad inciden de igual modo en los cambios de los factores climáticos como la humedad relativa del ambiente y su temperatura, por nombrar solo algunas.

Esta condición se presenta por el intercambio de energía y masa que se da lugar en la interfaz de la atmósfera y el suelo (G. E. Blight, 1997). Por lo tanto, la humedad relativa, temperatura, corrientes de aire y otros factores climáticos del planeta, se encuentran condicionados por los diferentes procesos de transferencia de calor y masa, los cuales involucran la interacción entre la atmósfera y la corteza terrestre.

En cuanto a los cambios que las variables atmosféricas producen sobre algunos parámetros del suelo y como condicionan el comportamiento del mismo, hay que resaltar que allí intervienen un gran número de variables atmosféricas como la radiación solar, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa del ambiente entre otras. A través de diversos estudios e investigaciones y mediante la realización de diferentes ensayos, se ha podido establecer que las variables que reflejan mayor incidencia en los cambios que sufre el terreno son la temperatura del

ambiente, el balance entre precipitación- evaporación y la velocidad del viento (Delage, Riffard, Lu, & Cui, 2005).

Se ha encontrado que mediante el fenómeno de evaporación se producen cambios en el contenido de humedad del suelo, por el efecto de las variaciones climáticas como cambios en la temperatura ambiente y la dirección e intensidad del viento (Wilson, 1990; Wilson, Fredlund, & Barbour, 1994). Este fenómeno físico es posible debido al intercambio calórico que ocurre en la interfaz entre el suelo y la atmósfera, lo que conlleva a la excitación de las moléculas de agua y así se produzca un cambio de estado líquido a estado gaseoso.

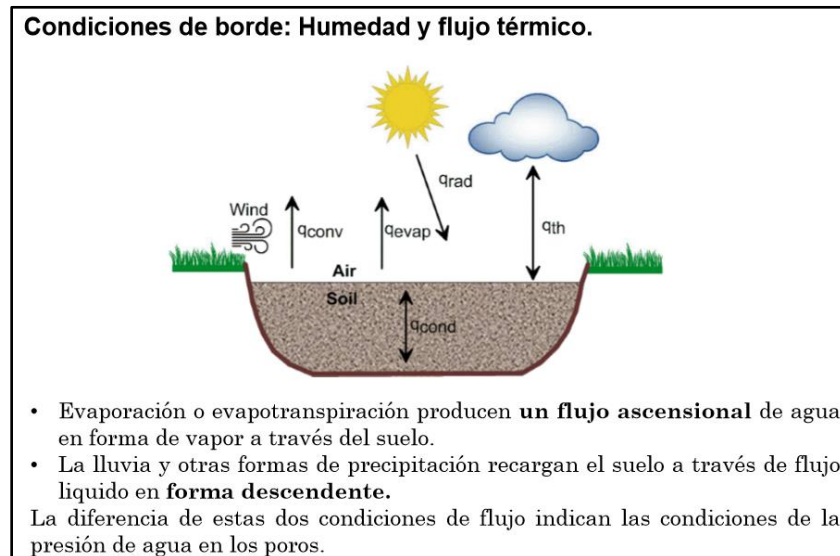


Figura 9 Interacción suelo-atmósfera. Fuente: Lozada, 2016.

Sin embargo, no se conoce con exactitud el patrón de comportamiento entre la atmósfera y el suelo, ya que este es un proceso acoplado en donde intervienen muchos factores en diferente medida; variando para distintos meses, semanas, días e incluso entre horas de un mismo día.

Para comprender la interacción entre la atmósfera y el suelo, no solo basta con identificar los procesos climáticos y atmosféricos, ni tampoco basta con determinar propiedades del suelo, se hace necesario establecer la relación existente entre estos dos. La complejidad de esta tarea radica en la codependencia entre las variables atmosféricas y del suelo.

Debido a lo anterior, en este trabajo se pretende estudiar el flujo de agua en el suelo de Bogotá utilizando algunos de los registros del campo experimental de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Para realizar dicho estudio se realizará un balance hídrico en una dimensión en el software Hydrus-1D considerando las condiciones climáticas reales y las propiedades del suelo. El modelo numérico será calibrado con los valores de humedad medidos y ajustará las propiedades hídricas del suelo.

2.2. Importancia

Uno de los principales problemas ligado al determinar la incidencia de una variable atmosférica en el comportamiento del suelo, radica en que no existe un modelo teórico ni empírico que represente adecuadamente el fenómeno físico de la evaporación en los suelos; principalmente por la dificultad que representa evaluar los procesos de intercambio energético y de masas que ocurre en la interfaz suelo-atmósfera.

Algunos autores realizaron ensayos experimentales con el fin de desarrollar un modelo en donde se relacionara la evaporación y las variables ambientales (Bowen, 1926; J Dalton, 1802; Penman, 1948), otros autores incluyeron las propiedades intrínsecas del suelo con el fin de estudiar la evaporación real (Wilson, 1990; Wilson, Fredlund, & Barbour, 1994). A pesar de esto ninguno logro integrar en su totalidad todos los factores, bien sea por la complejidad que implica medir la variación de las variables climáticas en un problema acoplado, por la propia variabilidad de las propiedades del suelo o porque no se contaba con el desarrollo tecnológico necesario.

Para la ingeniería geotécnica es de gran importancia comprender los cambios que se producen en la masa de suelo, generados a partir de la evaporación del agua retenida en la misma; ya que esta situación genera cambios en el contenido de humedad del suelo, succión y en la posición del nivel freático.

Se han encontrado diversos problemas relacionados con esta condición. El primero de ellos relacionado al continuo proceso de expansión y retracción principalmente en suelos arcillosos, provocando así fenómenos de asentamientos diferenciales en las estructuras de fundación (Wang, Shen, Ho, & Kim, 2013). Otras afectaciones

generadas a partir de los cambios en el suelo a partir de la variación climática, son los daños en elementos estructurales y no estructurales localizados a poca profundidad, deformaciones en redes subterráneas como acueductos, alcantarillados, redes de gas, petróleo entre otros; además de provocar grietas superficiales en la zona de suelo no saturado, como producto de la desecación (Cordero, Cuadrado, Prat, & Ledesma, 2016).

En algunos países se han adelantado estudios con el fin de relacionar la incidencia de los cambios atmosféricos en afectaciones evidenciadas sobre diversas obras. Por ejemplo, An, Cui y Hemmati analizaron los daños sobre las líneas de tren de alta velocidad entre Paris-Lille y Paris-Marsella. Se llegó a la conclusión que estos son generados a partir de la formación de grietas por ciclos de humedecimiento y secado sumados a las grandes cargas de tipo cíclico que producen los trenes (An, Hemmati, & Cui, 2017). Otro problema investigado en lo concerniente a los cambios producidos en el suelo por los cambios climáticos, es el comportamiento de estructuras como las edificaciones. Ante un abatimiento del nivel freático causado por ejemplo por una fuerte sequía, se genera una sobrecarga sobre la fundación de una estructura, además de producirse variaciones en la succión en la zona no saturada. Este fenómeno es recientemente estudiado por la Unión Europea a través del proyecto MAGIC en donde se evalúa el comportamiento y posibles afectaciones sobre una estructura sometida a carga climática (Tarantino et al., 2016).

Los asentamientos diferenciales producto de los cambios en la succión es un problema muy común al presentarse cambios bruscos en el régimen de flujo de agua en la zona no saturada. Nocilla, Grossi y Ponzoni estudiaron el potencial de colapso de una arena en función de los cambios en la humedad para las diferentes precipitaciones del año (Nocilla, Grossi, & Ponzoni, 2016).

Por ende, se hace necesario estudiar con un mayor grado de detalle el proceso de interacción entre los suelos y la atmósfera, con el fin de comprender como los cambios en las variables atmosféricas pueden generar cambios adversos para el comportamiento del suelo, principalmente a través de los cambios en el contenido de humedad, cambios en la succión y en la posición del nivel freático.

2.3. Objetivos de la investigación

2.3.1. Objetivo general

Estudiar el flujo de agua en el suelo blando de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito a través de mediciones de campo de las variables atmosféricas, las características del suelo y un modelo numérico en 1 dimensión.

2.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un modelo numérico en 1 dimensión del flujo de agua a través del suelo a partir de las condiciones atmosféricas reales registradas en campo.
- Ajustar y validar el modelo numérico en 1 dimensión con los resultados obtenidos experimentalmente.
- Determinar la tasa de evaporación potencial y el potencial de succión a partir de las variables meteorológicas ingresadas como parámetros de entrada al modelo de flujo.

Capítulo III Metodología

Para estudiar como la interacción entre las variables atmosféricas, el suelo y el flujo de agua condicionan algunas de las propiedades de la arcilla blanda de la sabana de Bogotá, es necesario en primera instancia conocer las propiedades del suelo en estudio.

Para esto se realizó una revisión de los estudios desarrollados en este lugar, encontrando un perfil geotécnico y ensayos de laboratorio en donde se exponen las características del suelo para el proyecto del campo experimental. Con propiedades como los índices de consistencia, gravedad específica, peso unitario entre otros, se obtuvo una idea general del

posible comportamiento de la arcilla en estudio. Se tomaron parámetros como el coeficiente de permeabilidad no saturada K_s y la curva *SWCC* para realizar los modelos de flujo en una dimensión.

Posteriormente se recolectó mediante el campo experimental de la escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito y la red de monitoreo Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB - estación Guaymaral (Bogotá - Secretaria distrital de ambiente, 2013)), información de los principales cambios atmosféricos que ocurrieron durante el periodo del 11 de enero al 11 de julio del 2019; también, en paralelo se recolectó información acerca de la variación del contenido volumétrico de humedad θ y de la temperatura del suelo para el mismo periodo. Las condiciones atmosféricas que aquí se obtuvieron serían utilizadas en el modelo de flujo de agua en una dimensión como la condición de frontera superior, lo cual permitió una buena idealización del modelo numérico, ya que, las condiciones variables en el tiempo fueron las medidas en tiempo real en campo.

Se seleccionó un software que permitiera simular de manera adecuada el flujo de agua a través del medio poroso a partir de las propiedades hidráulicas del suelo y las condiciones atmosféricas de frontera variables en el tiempo; se escogió Hydrus-1D ya que permite realizar predicciones bastante confiables, además de permitir ajustar los intervalos de tiempo de las predicciones. Se escogió el modelo o Van Genuchten-Mualem como el modelo de comportamiento hidráulico del suelo, debido a que incorpora a los parámetros de la curva *SWCC* el término de distribución de tamaño de poros y considera la variación de la conductividad hidráulica en función del potencial de succión.

Por último, se realizó el modelo de flujo de agua en una dimensión. El principal objetivo de esta modelación consistió en obtener una predicción de la variación de la humedad θ para 6 periodos de un mes cada uno, con el fin de comparar dichos perfiles con los medidos en campo para los mismos periodos de tiempo. De esta manera fue posible validar los parámetros hidráulicos de la arcilla blanda de la ciudad de Bogotá, a partir de la relación entre el modelo numérico y las mediciones en campo. También fue posible analizar la relación entre las principales variaciones climáticas con los procesos de humedecimiento-secado del perfil de suelo, se encontró relación directa entre la tasa de evaporación y el potencial de succión.

3.1 Datos medidos y registrados en campo

Con el ánimo de estudiar las variaciones de propiedades en el perfil de suelo como la humedad volumétrica directamente relacionada con el potencial de succión, se recurrió a la información medida y registrada por el CAMPO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES EN LAS PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS DE LAS ARCILLAS BLANDAS DE BOGOTÁ, proyecto de convocatoria interna 2018 de la Escuela. Esto proporciono una gran base de datos medidos en campo que permitieron comparar la predicción del modelo en una dimensión, con valores reales medidos en campo en la arcilla blanda de la ciudad de Bogotá.

Los datos que se utilizaron para comparar con los resultados del modelo numérico fueron los correspondientes a 4 sensores capacitivos que miden el contenido volumétrico de humedad θ de la arcilla, dichos sensores se encuentran localizados a profundidades de 10, 20, 30 y 40 centímetros. Se presenta en la Figura 10 una imagen del campo experimental donde se pueden apreciar algunos de sus sensores, conexiones y configuraciones.

En la Figura 11 se presenta la vista en planta y en la Figura 12 una vista de perfil de la zona de estudio, en estas imágenes se puede apreciar que se dispone de una excavación con una profundidad de 1,50 metros en la cual se deja expuesta a la atmósfera la capa de suelo blando de la ciudad de Bogotá. Los sensores de humedad están conectados a un sistema de adquisición de datos mediante una serie de cables los cuales están protegidos por una tubería de PVC, el programa de adquisición recolecta información cada 5 minutos, lo cual representa una fuerte base de datos.



Figura 10 Esquema del campo experimental.

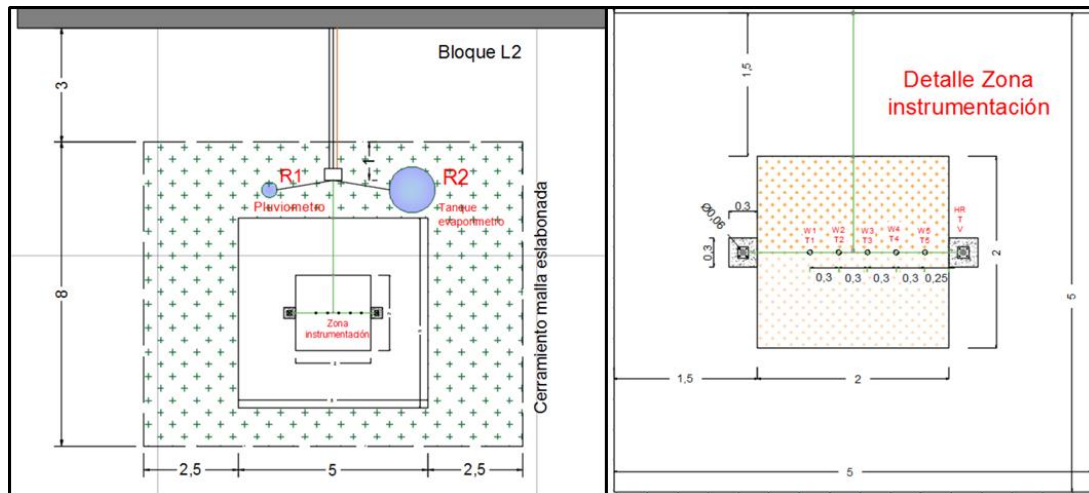


Figura 11 Vista en planta de la zona de estudio.

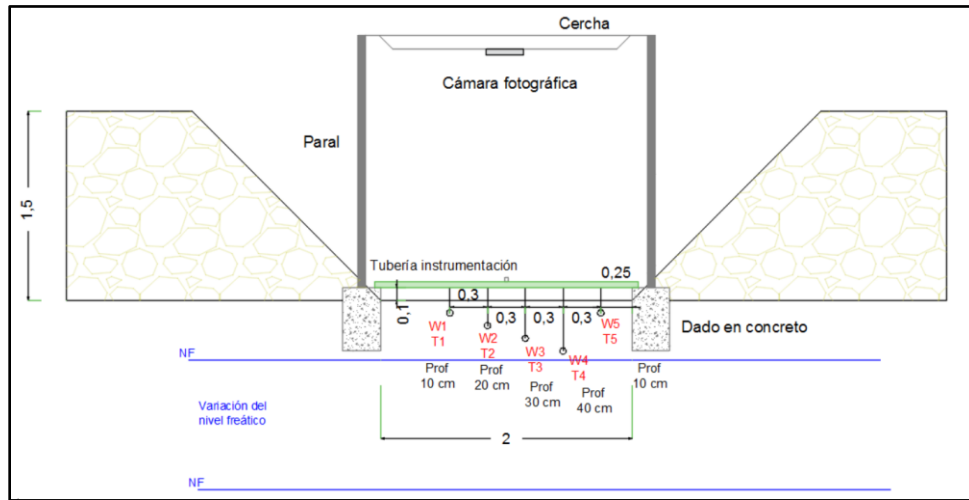


Figura 12 Vista en perfil de la zona de estudio.

Los datos de las condiciones atmosféricas utilizadas como condición de frontera superior en el modelo numérico fueron tomadas de la red de monitoreo Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) para la estación meteorológica de Guaymaral, la cual está ubicada a 75 metros del campo experimental y se muestra en la Figura 13. Las variables climáticas que de esta estación se obtuvieron fueron la precipitación, temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, cada una de estas con una frecuencia de adquisición de 1 hora durante seis meses.



Figura 13 Estación meteorológica Guaymaral (RMCAB).

3.1.1 Descripción de los sensores de humedad EC-5

El EC-5 mide la variación de la capacitancia del suelo y a partir de ella el valor de la constante dieléctrica. La capacidad del suelo altera la resonancia de frecuencia del circuito, relacionándola con el cambio de contenido del agua. Estos datos son alterados por el contenido de sales y la densidad aparente del suelo.

El proceso de calibración se realizó mediante muestras de suelo blando con contenido de humedad gravimétrico conocido. Las muestras se prepararon con agua freática para no afectar las mediciones ya que los sensores son sensibles al contenido de sales del agua. Posterior a la preparación de las muestras, estas se cubrieron durante un día con papel vinipel para homogenizar el contenido de humedad. Inicialmente la calibración de los sensores se realizó en un contenedor metálico.

Se realizaron dos tipos de preparación de las muestras con el fin de seleccionar la manera correcta para calibrar los sensores:

- 1) Preparación en seco y humedecimiento en la superficie: La muestra de suelo natural fue debidamente tamizada, se utilizó material pasa 200. Posteriormente el material fue secado al horno a una temperatura de 40°C. Para obtener determinado valor de contenido de humedad gravimétrica se pesaba determinada cantidad de arcilla seca la cual se introducía en el recipiente y se calculaba la cantidad de agua que debía ser agregada desde la parte superior de la muestra para alcanzar un peso determinado de arcilla seca más agua. Esta mezcla suelo-agua era asociada a un valor determinado de humedad gravimétrica, es decir, se conocía la humedad gracias a la relación por pesos. En este procedimiento se observó una costra superficial que contenía el agua y no permitía el paso de la misma para obtener una muestra homogénea, esto debido a las propias características del suelo esto se puede observar en la Figura 14.



Figura 14 Preparación en seco y humedecimiento en la superficie.

2) Preparación en seco y mezcla con agua por peso: En este procedimiento se preparó la muestra pesando las partículas sólidas secas de arcilla y calculando la cantidad de agua a adicionar para llegar a un contenido de humedad dado. A diferencia con el método de preparación de muestra 1, en este método se mezcló directamente en el recipiente la arcilla con el agua a medida que se vertía y se hacía una mezcla como se muestra en la Figura 15. Una vez la mezcla estaba homogénea se compactaba para alcanzar una densidad seca de $1,342 \text{ g/cm}^3$. Se utilizó esta densidad ya que para densidades mayores se debía forzar el sensor para poder introducirlo en la muestra. Los resultados de este procedimiento fueron satisfactorios obteniendo una muestra homogénea, por lo cual se implementó como técnica de calibración.

Utilizando el segundo procedimiento se realizaron las pruebas y análisis de los datos obtenidos, encontrando valores atípicos en el voltaje obtenido lo cual se atribuyó al material del molde. Por lo tanto, se decidió cambiar el molde por recipientes plásticos con los que se siguió el mismo procedimiento.

Se dispuso cada sensor de humedad EC-5 dentro de una determinada muestra de suelo y así se obtuvo el valor de voltaje para cada contenido de humedad. Posteriormente, con la misma muestra se realizó la variación de la humedad mediante un proceso de secado para obtener más valores de voltaje correspondientes a cada contenido de humedad. Todos los sensores de humedad

tienen la misma longitud de cable por lo tanto se realizó una única curva de calibración para todos.



Figura 15 Preparación por relaciones de peso.

En la Tabla 1 se presentan los valores medidos durante la calibración de los sensores de humedad EC-5.

Tabla 1 Valores obtenidos calibración sensores de humedad. Densidad seca 1,342 g/cm³.

Contenido de humedad gravimétrica (%)	Contenido de humedad volumétrico calculado (%)	Medida en mili voltios (mV)
0,00	0,00	0,397
32,20	43,21	0,575
39,35	52,81	0,764
40,00	53,68	0,797
46,50	62,40	0,864
67,65	90,79	0,879
54,30	72,87	0,879
77,00	103,33	0,906

Se realizó la gráfica de contenido volumétrico de humedad vs mili voltios la cual se presenta en la Figura 16. En esta grafica se puede apreciar que se obtuvo dos ecuaciones de calibración para este tipo de sensores, la primera ecuación se utiliza cuando el voltaje de salida se encuentra entre el 0 y 0,864 mV y la segunda para

voltajes mayores a 0,864 mV. La alimentación de los sensores fue de 3 voltios, la misma que se utilizó en campo.

Para el caso del suelo blando del campo experimental se relacionan las dos ecuaciones que describen el comportamiento del material con los siguientes rangos de humedad:

- La primera ecuación es válida para voltajes entre 0 y 0,864 mV (humedades entre 0% y 63%).
- La segunda ecuación es válida para voltajes mayores a 0,864 mV (humedades mayores al 63%).

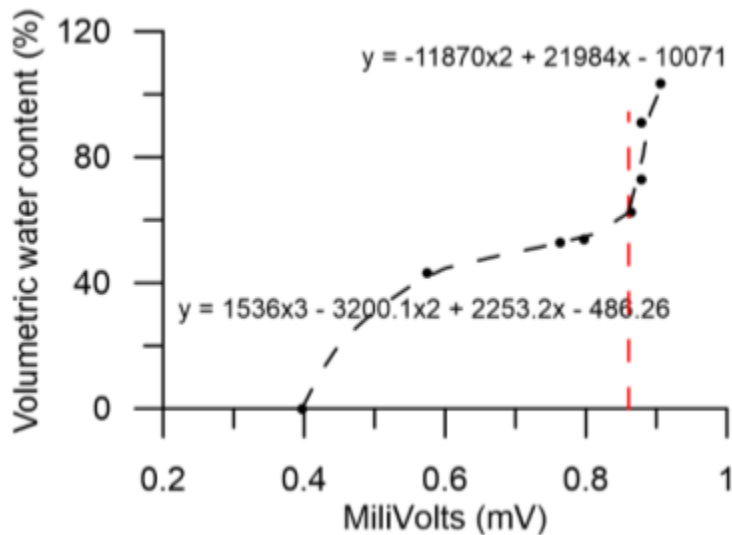


Figura 16 Curva de calibración sensores de humedad EC-5.

3.2 Predicción del contenido volumétrico de humedad θ a partir de un modelo de flujo en una dimensión

Para simular el flujo de agua a través del suelo se realizó un modelo en el software Hydrus-1D. La geometría del modelo consta de una columna de arcilla de un metro de alto, a la cual se le asignaron las propiedades hidráulicas obtenidas a partir de la

caracterización del suelo. Se definieron en total 1000 nodos, que distribuidos equidistantemente a lo largo del perfil equivalen a una resolución de un nodo cada 0,1 centímetros.

Se adoptó el modelo de comportamiento hidráulico del suelo propuesto por Van Genuchten-Mualem considerando el efecto de histéresis, los parámetros de entrada que definen el comportamiento hidráulico del suelo son θ_r , θ_s , α , η , α_w , l y K_s .

Los modelos que se realizaron inician a partir del 11 de enero del 2019, se escogió este día debido que a partir de esta fecha se tienen valores de humedad medidos en campo para realizar una comparación y así estimar la precisión de los modelos. Los parámetros de tiempo se definieron como tiempo inicial 0 días y el tiempo final varía entre 28 y 31 días dependiendo de la duración de cada mes; el intervalo de tiempo se tomó como 0,0014 días, el equivalente a 2 minutos. Este último intervalo de tiempo define que cada 2 minutos se evalúa a partir de la Ecuación 9 el contenido de humedad y el nivel de succión para cada uno de los nodos del modelo.

La condición de frontera superior es las variables atmosféricas, esto con el fin de realizar un modelo verídico a partir de registros reales medidos en campo. La resolución de estas variables de entrada es de una hora, es decir, en el modelo a partir de la humedad relativa, temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento se calculó la tasa de evaporación potencial a partir de la Ecuación 3. Con esta condición de frontera se estimó la diferencia entre la evaporación potencial EP y la precipitación (en los instantes de tiempo en donde se presente) y a partir de la Ecuación 12 se define si la infiltración en la superficie del modelo es descendente en forma agua líquida (l) o ascendente en forma de vapor de agua (E_P). Una condición l indica que el perfil aumentara su contenido de humedad debido a procesos de saturación, mientras que por otro lado una condición E_P se asocia a procesos de disminución del contenido de humedad en el modelo. La condición inferior del modelo se definió como un contenido de agua constante, esto basado en exploraciones geotécnicas donde se encontró el nivel freático aproximadamente a un metro de profundidad.

La condición inicial del modelo se definió como contenidos de humedad, ya que estos son valores conocidos gracias a la medición de los sensores. Se definieron 4

nodos de observación a las profundidades de 10, 20, 30 y 40 centímetros los cuales corresponden a las profundidades donde se encuentran los sensores, esto con el fin de comparar la humedad simulada con respecto a la medida en campo.

3.3 Estimación del error

Con el fin de observar la precisión de los modelos se determinó el error del modelo a través del Error Cuadrático Medio (*RMSE*), el Error Porcentual Absoluto Medio (*MAPE*) y el Error Absoluto Medio (*MAE*). De esta manera es posible observar en que momentos el modelo sobreestima o subestima los valores de humedad medidos por los sensores en campo.

Para esto se comparó para cada instante de tiempo t_i la humedad medida θ_i y la humedad simulada $\hat{\theta}_i$ de esta manera al final de cada modelo es posible estimar el error de todo el modelo considerado la suma de las desviaciones de todos los datos.

Así es posible observar las profundidades para las cuales el modelo es más preciso o para que instantes de tiempo y debido a que factores meteorológicos el modelo pierde precisión o es más susceptible.

Capítulo IV Resultados

4.1 Propiedades del suelo de la Escuela

A continuación, se presenta el perfil geotécnico encontrado en el proyecto “CAMPO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS VARIABLES AMBIENTALES EN LAS PROPIEDADES HIDRO-MECÁNICAS DE LAS ARCILLAS BLANDAS DE BOGOTÁ” en la Tabla 2.

Tabla 2 Perfil geotécnico costado norte bloque L₂ (proyecto campo experimental ECI).

Profundidad (m)		e (m)	DESCRIPCIÓN	No.	γ (T/m ³)	Gs	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0,0	0,2	0,2	Capa vegetal	0	1,00				
0,2	0,3	0,1	Relleno	1	1,8				
0,3	0,6	0,3	Materia orgánica negra	2	1,04				
0,6	0,7	0,1	Limo amarillo oscuro algo plástico	3	1,372	2,64	62,33	48,97	13,36
0,7	1,4	0,7	Limo café oscuro no plástico	4	1,372	2,62			
1,4	2,1	0,7	Limo-Arcilloso habano con gris, plástico	5	1,70	2,70	87,11	42,68	44,44
2,1	2,9	0,8	Limo-Arcilloso gris clara con vetas de oxidación, plástico	6	1,70	2,70	74,5	28,41	46,09
2,9	3,7	0,8		7	1,64	2,69	70,59	40,67	29,92
3,7	3,9	0,2		8	1,47	2,69	64,54	36,6	27,94
3,9	4,1	0,2	Limo-Arcilloso gris oscuro, algo plástica	9			63,19	44,35	18,84

En la Figura 17 se presenta una imagen del sitio dentro de la universidad donde se realizó el sondeo y se obtuvieron las muestras para el proyecto del campo experimental, se puede observar que la vegetación del lugar es mínima y el terreno no presenta inclinación.



Figura 17 Lugar del sondeo para el proyecto campo experimental ECI.

Del perfil se obtiene que los primeros 60 centímetros de suelo están conformados por 20 centímetros de capa vegetal, un relleno con recebo compactado de 10 centímetros de espesor y 30 centímetros de materia orgánica color negro con abundante presencia de raíces. Posteriormente se observan dos capas de limo, el primero de color amarillo oscuro el cual se observó a una profundidad de 0,60 metros y presento algo de plasticidad, mientras que el segundo de color café oscuro no presento plasticidad, los espesores de estos materiales son 10 y 70 centímetros respectivamente.

La sexta capa de suelo aparece a una profundidad de 1,40 metros, y se describe como un limo arcilloso habano con gris con algunas vetas de oxidación, el material presenta plasticidad y una consistencia entre blanda y media. El espesor de esta capa es de 70 centímetros, sin embargo, los materiales que se encuentran bajo esta también son capas con propiedades y características muy similares.

A partir de 2,10 metros de profundidad se encontró una capa de 1,80 metros de limo arcilloso gris claro con las mismas vetas de oxidación presentes en la sexta capa de arcilla; además sus límites de consistencia presentaron valores muy similares a los

del limo arcilloso habano con gris encontrado a 1,40 metros, principalmente en la parte superior del estrato es decir entre 2,10 y 2,9 metros.

Por último, a una profundidad media de 4,0 metros se observa un limo arcilloso gris con tonalidades mucho más oscuras, en cuanto a su plasticidad cabe resaltar que fue mucho menor comparada con las capas de arcilla de estratos superiores.

A continuación, se presenta en la Tabla 3 los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en el proyecto del campo experimental para el limo arcilloso habano con gris plástico encontrada a una profundidad media de 1,50 metros.

Tabla 3 Resultados de ensayos en la arcilla del proyecto campo experimental ECI.

Y (T/m ³)	G _s	Contenido limo (%)	Contenido arcilla (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	S _u (KPa)	Azul de metileno
1,70	2,70	46	54	87,11	42,68	44,44	15,14	30	Ama

Se puede observar que para una profundidad de 1,50 metros el suelo efectivamente es un limo arcilloso plástico de consistencia entre media-blanda y presenta una actividad media. Los valores de los límites de consistencia concuerdan con los expuestos en la microzonificación sísmica de Santa fe de Bogotá 1997 y la Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones del 2010 (Andes & Ingeominas, 1997; ESCOBAR, GONZÁLEZ MARANTES, PUERTO, & LINDON, 2010).

También para dicho proyecto se encontró un ensayo de consolidación unidimensional y la determinación de la permeabilidad saturada K_s a partir de la curva de módulo de deformación volumétrico. Dichos resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Consolidación en el limo arcilloso del proyecto campo experimental ECI.

C _c	C _s	e _o	σ'p (KPa)	K _s (m/s)
0,91	0,18	1,79	186,21	1,47 E-09

4.2 Propiedades hidráulicas del suelo

Se determinó la curva característica de humedad del suelo *SWCC*, la cual define el comportamiento hidráulico del mismo. Para esto se realizaron medidas del contenido volumétrico de agua y el respectivo valor de succión que se desarrollan en los poros al interior de suelo. Se utilizaron dos técnicas diferentes para construir la curva, esto debido al amplio rango de succiones. Las técnicas utilizadas fueron un potenciómetro de punto de rocío WP4 y el método del papel filtro.

Se tomaron medidas aumentando progresivamente la humedad de las muestras hasta alcanzar la saturación, posteriormente se secó progresivamente el material, esto con el fin de evaluar el comportamiento de histéresis en el camino de humedecimiento y en el camino de secado. En la Figura 18 se presenta una imagen del WP4. Se tomaron 8 medias por el camino de humedecimiento y 8 por el camino de secado con este instrumento, todos para valores de succión altos.

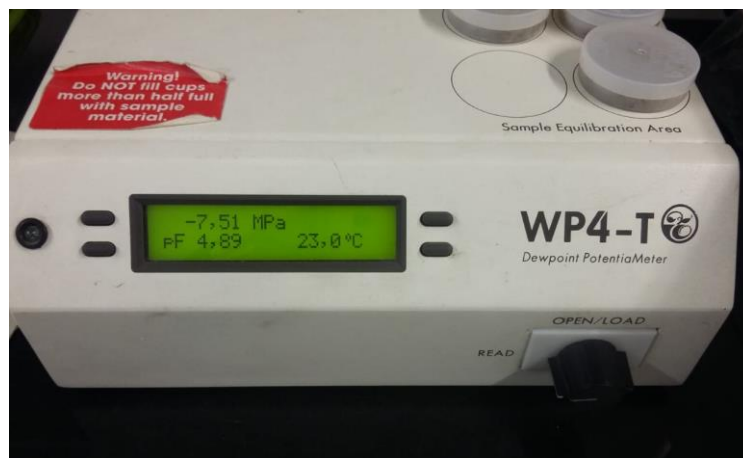


Figura 18 Medidor de potencial de agua o WP4.

La técnica del WP4 consiste en utilizar un aparato electrónico denominado medidor de potencial de agua, cuyo funcionamiento interno permite medir la succión de pequeñas muestras a través del equilibrio térmico entre un pequeño espejo y la muestra de suelo.

Con el método de papel filtro se tomaron registros de 2 puntos por vía de secado y 2 por vía de humedecimiento, estos corresponden a valores bajos de succión donde el WP4 no presenta buena precisión.



Figura 19 Método de papel filtro.

El procedimiento con esta técnica consiste en conseguir el equilibrio entre la humedad de 2 pastillas de suelo inalterado y un papel filtro calibrado tipo Whatman número 42; el periodo de equilibrio térmico es de una semana. Al final de este periodo es posible relacionar el contenido de humedad alcanzado por el papel con un valor de succión mediante una tabla de calibración. En la Figura 19 se presenta una imagen del procedimiento del método del papel filtro.

En total se obtuvieron 20 puntos de succión con su respectivo valor de humedad θ , 10 de estos puntos se tomaron por vía de secado y 10 por vía de humedecimiento. Dichos registros se presentan en la Tabla 5, en donde se muestra un valor de θ con su respectivo valor de succión tanto en mega pascales como en potencial de succión expresado en columna de metros de agua. También se especifica el método usado, WP4 o papel filtro.

Tabla 5 Medidas de θ vs succión para la curva SWCC.

Método	Secado			Humedecimiento		
	θ (m ³ /m ³)	Suc. (Mpa)	h (m)	θ (m ³ /m ³)	Suc. (Mpa)	h (m)
WP4	0,088	77,950	7945,973	0,033	98,180	10008,155
WP4	0,097	61,710	6290,520	0,070	95,370	9721,713
WP4	0,129	15,240	1553,517	0,087	66,230	6751,274
WP4	0,168	10,930	1114,169	0,107	9,930	1012,232
WP4	0,179	9,220	939,857	0,187	3,410	347,604
WP4	0,224	5,260	536,188	0,238	2,090	213,048
WP4	0,261	3,000	305,810	0,266	1,170	119,266
WP4	0,272	2,310	235,474	0,273	0,970	98,879
P. filtro	0,420	1,561	159,095	0,397	0,547	55,761
P. filtro	0,513	0,527	53,721	0,513	0,153	15,637

Con estos registros se elaboró la curva SWCC que se presenta en la Figura 20. En el eje de las abscisas se presenta el contenido volumétrico de agua expresado en metros cúbicos de agua por metro cúbico de suelo, mientras que en el eje de las ordenadas se presenta la succión en metros de agua. La escala logarítmica del eje de succión indica el amplio rango de esta magnitud.

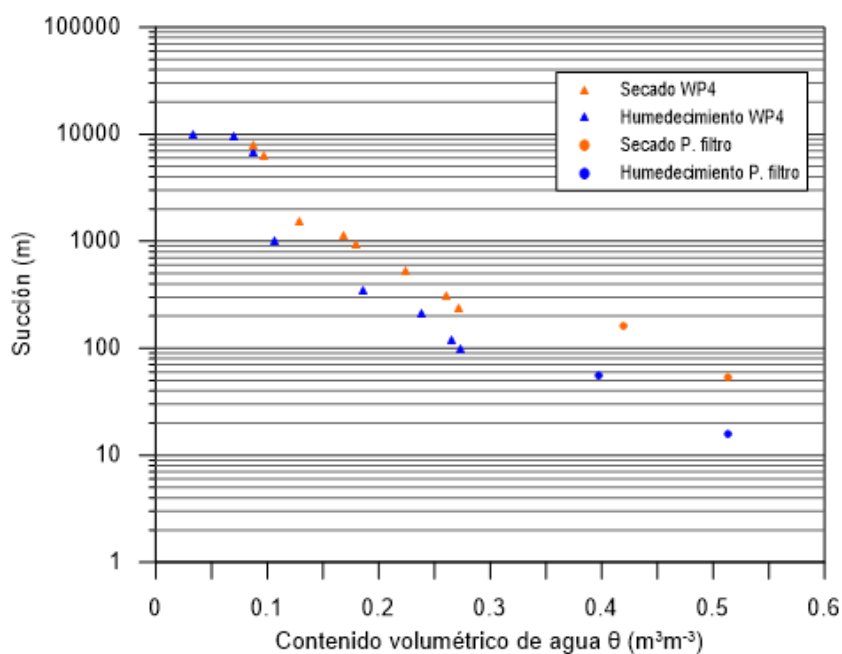


Figura 20 Medidas de θ vs potencial de succión en metros.

Con el fin de definir el comportamiento hidráulico de la arcilla se estimaron preliminarmente de la curva SWCC los parámetros del modelo Van Genuchten-Mualem. Estos parámetros son el inverso del valor de entrada de aire α , el parámetro empírico relacionado con la distribución de los tamaños de los poros que componen el suelo n , el parámetro de ajuste m , el contenido de volumétrico de agua saturada θ_s y el residual θ_r .

Para estimar θ_s se saturaron 3 muestras de arcilla húmedas por un periodo de una semana. Con dichas muestras se estimó el valor del contenido volumétrico de agua encontrando un valor medio de 0,6. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Calculo de θ_s con relaciones de fase.

No.	W_m	V_m	Y_m	W_s	W_w	V_s	θ	S
	(g)	(cm ³)	(g/ cm ³)	(g)	(g)	(cm ³)	(-)	(%)
1	93,68	55,719	1,681	60,52	33,16	22,415	0,595	99,6
2	94,33	56,033	1,683	61,12	33,21	22,637	0,593	99,4
3	94,01	55,439	1,696	60,31	33,70	22,337	0,608	101
							0,60	100

El contenido volumétrico de agua residual θ_r se determinó secando las mismas muestras con las que se calculó θ_s . Para esto se secaron las tres muestras al aire libre sobre un horno por una semana, posteriormente se introdujeron a un horno a 110 °C por un día para estimar el contenido de agua residual obteniendo los resultados presentados en la Tabla 7. El valor de θ_r se determinó como 0,04.

Tabla 7 Calculo de θ_r con relaciones de fase.

No.	W_m	V_m	Y_d	W_s	W_w	V_s	θ	S
	(g)	(cm ³)	(g/ cm ³)	(g)	(g)	(cm ³)	(-)	(%)
1	62,54	39,458	1,585	60,52	2,02	22,415	0,051	11,9
2	62,69	40,025	1,566	60,93	1,76	22,567	0,044	10,1
3	61,55	39,875	1,544	60	1,55	22,222	0,039	8,78
							0,04	10,2

Para determinar los valores de α , m y n se utilizó un software que permite optimizar los parámetros de la SWCC cuyo nombre es RETC. Esto con el fin de obtener de

manera precisa dichos parámetros, ya que, debido a la no linealidad de la ecuación del modelo Van Genuchten-Mualem presentada en la Ecuación 15, calcular dichos valores con hojas tradicionales de cálculo implica perder precisión en la estimación de parámetros.

4.3 Estimación de parámetros hidráulicos de la arcilla con RETC

Gracias al software RETC que permite analizar parámetros de la curva *SWCC* y la curva de conductividad hidráulica se obtuvieron los parámetros α y n mediante la optimización de mínimos cuadrados que utiliza este programa para estimar los coeficientes desconocidos en los modelos hidráulicos. En este programa se seleccionó el modelo Van Genuchten-Mualem y como parámetros de entrada conocidos se ingresaron los valores θ vs succión (en metros) presentados en la Tabla 5. Adicionalmente se asumieron valores iniciales de α y n para que el software realice un proceso iterativo hasta encontrar los valores de α y n que se ajusten de mejor manera a partir de los valores de θ y succión. Los valores de entrada que se ingresaron son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8 Parámetros de entrada en el software RETC.

No	Parámetro	Secado		Humedecimiento	
		Initial value	Index	Initial value	Index
-	Name				
1	θ_r (m^3/m^3)	0,0400	0	0,0400	0
2	θ_s (m^3/m^3)	0,6000	0	0,6000	0
3	α	0,0330	1	0,0500	1
4	η	1,4000	1	1,4000	1
5	l	0,5000	0	0,5000	0

En la Tabla 8 el valor de index puede ser 0 o 1, es cero para indicar que este parámetro es conocido y no se desea ajustar, mientras que el valor de uno indica que se desea ajustar dicho parámetro a partir de la optimización de mínimos cuadrados. Los parámetros 1 y 2 son los valores presentados en la Tabla 7 y Tabla 6, por lo tanto el valor de index se ingresa como 0. El parámetro l (parámetro 5 de

la Tabla 8) es el parámetro de conectividad de poros el cual típicamente se toma como 0,5 según Mualem (Mualem, 1976), por esto el valor de index también se considera como 0. Como los parámetros 3 y 4 son los que se desean ajustar mediante la optimización de mínimos cuadrados el valor de index se ingresa como 1 y se suponen de manera inicial los valores 0,033 y 0,050.

Una vez realizado el ajuste se obtienen los valores presentados en la Tabla 9.

Tabla 9 Optimización de parámetros hidráulicos con RETC.

No. ITER	Secado			Humedecimiento		
	SSQ	α	η	SSQ	α	η
0	0,01622	0,0330	1,4000	0,01171	0,0500	1,4000
1	0,01257	0,0281	1,4002	0,00385	0,0420	1,4975
2	0,00856	0,0202	1,4438	0,00378	0,0419	1,5407
3	0,00632	0,0143	1,5170	0,00346	0,0416	1,5609
4	0,00526	0,0133	1,5658	0,00346	0,0416	1,5728
5	0,00524	0,0132	1,5728	0,00346	0,0416	1,5728
6	0,00524	0,0132	1,5733			
7	0,00524	0,0132	1,5733			

RETC evalúa los valores supuestos de α y n más los valores ingresados de θ y succión en la ecuación Van Genuchten-Mualem. De esta manera construye las curvas ajustadas a los valores calculados experimentalmente hasta encontrar una pareja de valores que satisface el sistema matemático. El proceso iterativo finaliza una vez que se obtiene tres veces el mismo valor de la suma de los cuadrados SSQ. El proceso se realiza independientemente para la vía de secado y para la vía de humedecimiento. Se obtuvieron valores ajustados de α de 0,0132 para el camino de secado y de 0,0416 para el camino de humedecimiento, mientras que el valor medio de n se toma como 1,573.

En Figura 21 se muestra la curva SWCC ajustada con los parámetros mencionados anteriormente. El ajuste consiste en construir las curvas discontinuas de color naranja y azul que representan la variación de la succión en función de los cambios de humedad, expresados en contenido volumétrico de agua. La función que describe la variación de estas líneas es la ecuación del modelo Van Genuchten-Mualem (Ecuación 15). Las curvas se elaboraron a partir de los parámetros

ajustados y mostrados en la Tabla 9; la trayectoria de estas curvas con estos parámetros ajustados son las que mejor se ajustan a los valores de succión y humedad θ medidos en laboratorio.

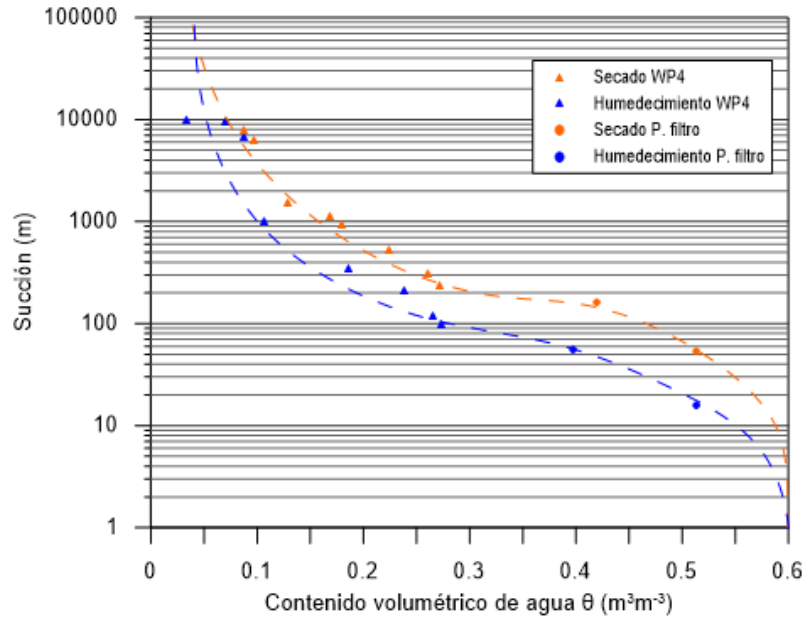


Figura 21 Medidas de θ vs potencial de succión en metros.

Con esta curva, es posible estimar cualquier valor de succión que presenta la arcilla al conocer el grado de humedad que esta presenta. Los parámetros de esta curva son datos de entrada para el modelo de flujo de agua en una dimensión en conjunto con la permeabilidad saturada K_s tomada de los estudios del campo experimental.

4.4 Condiciones atmosféricas entre el 11 de enero y el 11 de julio del 2019

La condición de frontera superior del modelo numérico de flujo está definida por las variaciones atmosféricas que se presentaron durante el periodo de tiempo en estudio, el cual es del 11 de enero al 11 de julio del 2019, es decir 6 meses. Las condiciones atmosféricas se obtuvieron de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) en la estación meteorológica de Guaymaral. De esta estación meteorológica se tomaron los registros de humedad relativa ambiente, precipitación,

temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar. Estos registros son presentados en la Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26.

La resolución temporal de estas medidas es de una hora para cada variable atmosférica. Esto quiere decir que, en total para 181 días analizados correspondientes a medio año, se cuenta con un registro de 4344 para cada una de ellas. En la Tabla 10 se presenta un resumen de las variables atmosféricas registradas por la estación meteorológica e ingresadas para cada modelo.

Tabla 10 Resumen variables atmosféricas por meses.

#	Humedad relativa (%)			Precipitación (mm)		Temperatura °C			Radiación (W/m ²)			Velocidad del viento (m/s)		
	Max	Min	Med	Max	Acu	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med
-														
1	87	23	67	16,6	55,9	24,8	6,6	14,8	1175	0	185	4,7	0	1,1
2	87	22	66	22,8	65,4	25,7	6,1	15,4	1171	0	188	3,6	0	1,1
3	86	32	68	7,3	88,8	25,2	6,9	15,8	1174	1	170	4,2	0	1,0
4	86	30	70	16,5	182,7	24,5	5,3	15,3	1063	1	155	3,9	0	1,0
5	87	41	70	12,3	121,5	22,8	8,7	15,0	854	1	158	4,0	0	1,1
6	86	30	67	4,1	45,9	22,9	5,8	14,5	1007	1	169	4,8	0,5	1,6

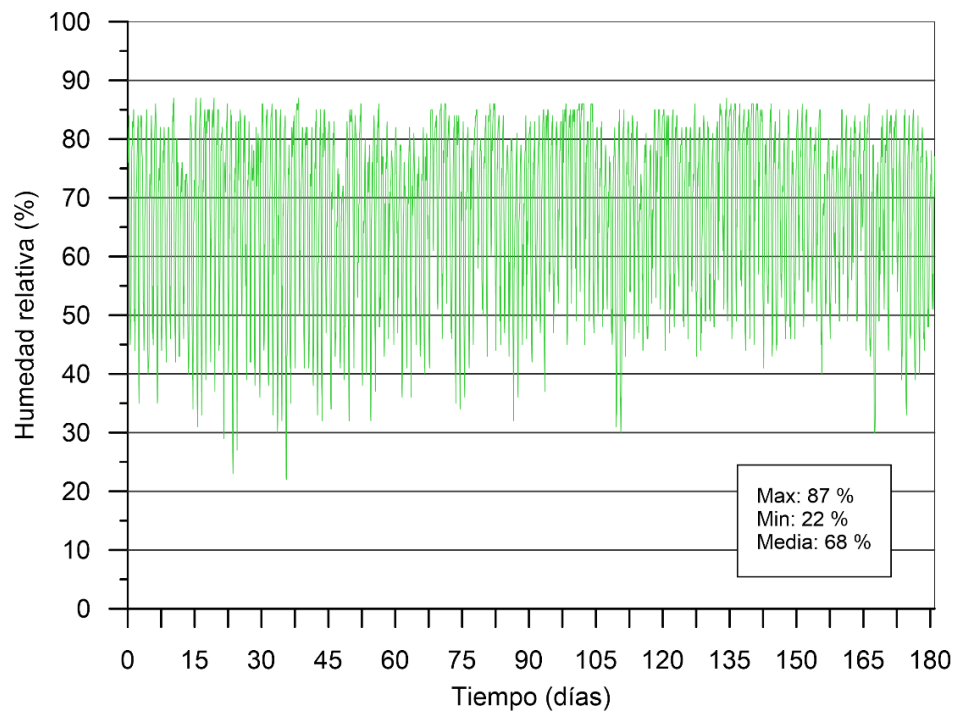


Figura 22 Humedad relativa entre el 11/01/19 y 11/07/19.

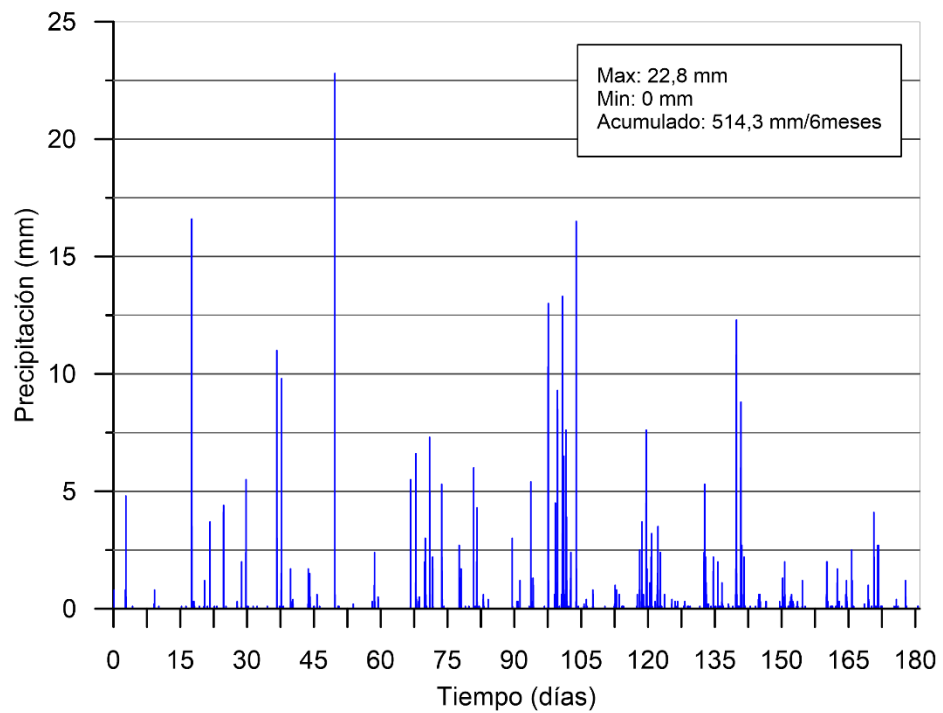


Figura 23 Precipitación entre el 11/01/19 y 11/07/19.

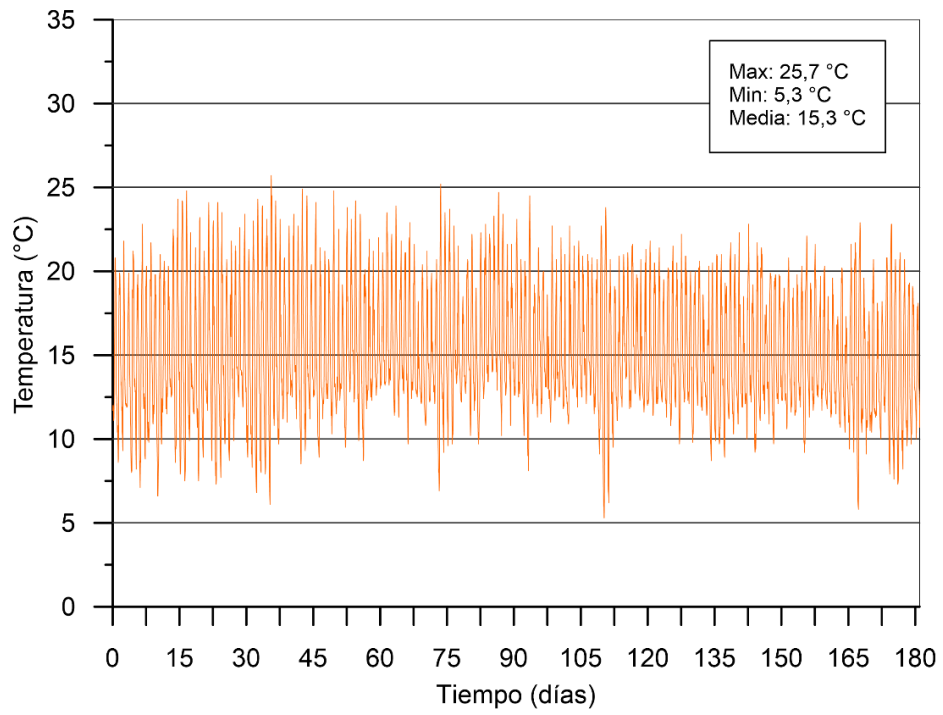


Figura 24 Temperatura entre el 11/01/19 y 11/07/19.

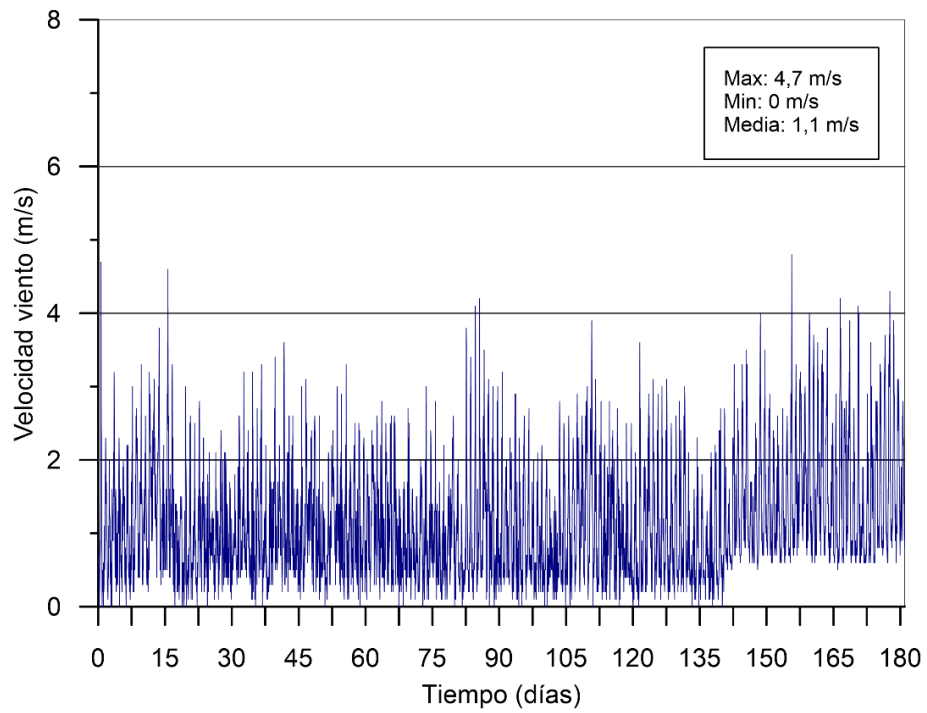


Figura 25 Velocidad del viento entre el 11/01/19 y 11/07/19.

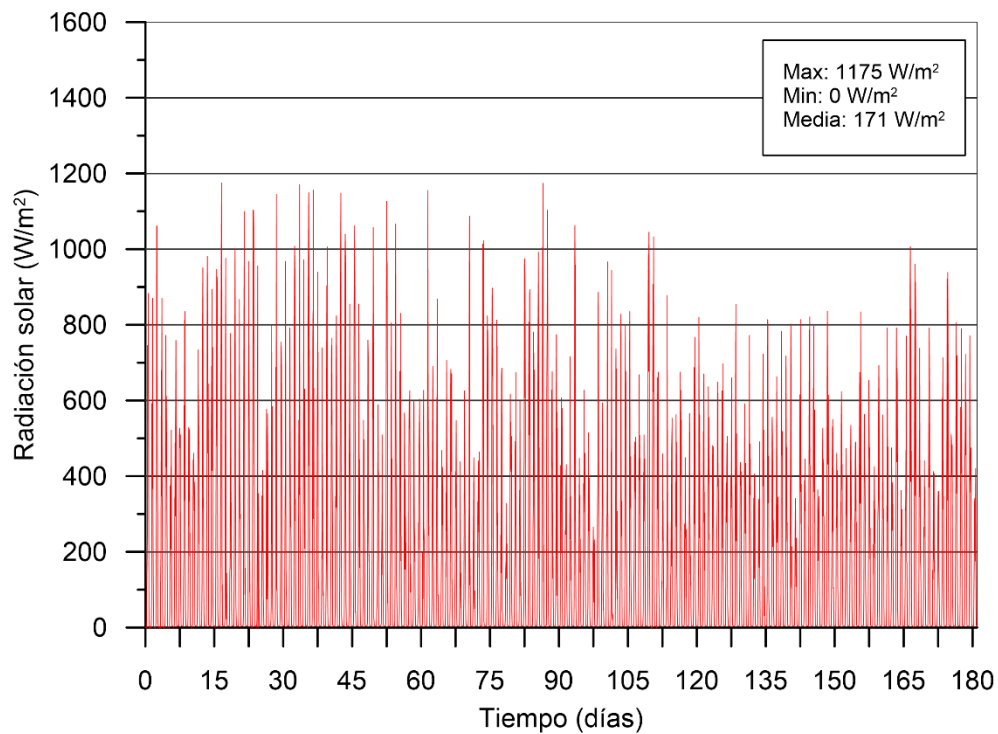


Figura 26 Radiación solar entre el 11/01/19 y 11/07/19.

De acuerdo con las tendencias de las variables climáticas, se observa que el mes más caluroso fue el comprendido entre el 11 de marzo y el 11 de abril con una media de 15,8 °C, mientras que el mes donde se presentó la media de temperatura más baja fue entre el 11 de junio y el 11 de julio con un valor de 14,5 °C. El máximo registro de temperatura fue de 25,7 °C y se presentó en el mes de febrero, mientras que por otro lado la menor temperatura se alcanzó una noche del mes de abril con un valor de 5,3 °C como se puede observar en la Figura 24.

Durante los primeros dos meses de estudio las condiciones atmosféricas fueron cambiantes y se caracterizaron por presentar situaciones opuestas en por ejemplo en la temperatura y humedad ambiente, esto se puede evidenciar en la gran amplitud de la Figura 22 y la Figura 24. En donde para los primeros días se observa la gran variabilidad entre valores máximos y mínimos, gran número de registros pasan drásticamente de valores elevados de temperatura y humedad a valores mínimos inclusive en un mismo día; en contraste con esta situación, para los 2

meses comprendidos entre el 11 de abril y el 11 de junio el rango de valores es más estrecho lo cual indica una menor variabilidad.

En cuanto a los registros de lluvia se evidencia que el mes más lluvioso fue el comprendido entre el 11 de abril y el 11 de mayo, con un total de 182,7 mm/mes. En Colombia dicho mes se caracteriza por su pluviosidad (Instituto de Hidrología, 2007), las continuas lluvias fueron fuertes en intensidad y duración; sin embargo, el máximo registro horario se presentó finalizando febrero con un valor de 22,8 mm/h. El mes que presentó menos días con lluvias fue el mes entre el 11 de enero y el 11 de febrero y el mes que presentó el menor acumulado con un total de 45,9 mm/mes fue el 11 de junio - 11 de julio.

Los meses donde el suelo se vio más expuesto a la acción de la radiación del sol fueron los 3 primeros meses de este estudio, en donde se obtuvieron los máximos valores como se puede observar en la Figura 26.

En cuanto a la velocidad del viento no se ve un comportamiento bien definido, los mínimos se presentan en la madrugada y los valores máximos se pueden alcanzar entre las 10 y las 16. El promedio de esta magnitud para los primeros 5 meses es de 1,0 y 1,1 m/s y aumenta para los últimos 40 días hasta un valor medio de 1,6 m/s en donde no se registró ningún valor inferior a 0,5 m/s como se puede observar en la Figura 25.

Haciendo un análisis de los registros diarios la tendencia de la radiación solar y la temperatura ambiente es similar, aumentando a partir de entre las 5 y 6 de la mañana que es el momento del día en el cual se evidencian los primeros rayos del sol. La radiación solar alcanza sus valores máximos diarios entre las 12 y 13 del mediodía, horas que corresponden al punto donde existe una mayor incidencia del sol. La máxima temperatura diaria se alcanza entre las 12 y 14 horas, el desfase que existe entre la máxima temperatura diaria y la máxima radiación solar se puede explicar cómo el tiempo que le lleva al aire del ambiente calentarse para alcanzar su valor máximo. Tanto la radiación solar como la temperatura ambiente decrecen a partir de las 15 horas hasta alcanzar valores mínimos entre las 3 y 4 de la madrugada. Caso contrario ocurre con la humedad relativa, en donde los valores mínimos se presentan durante el mediodía, y sus máximos durante la madrugada.

4.5 Relación entre las humedades medidas y la humedad relativa y temperatura ambiente

En la Figura 27 y Figura 28 se puede observar la variación de la humedad relativa del ambiente y temperatura en función de la variación del contenido volumétrico de humedad medido en el suelo blando de la escuela Colombiana de ingeniería, para 4 profundidades diferentes.

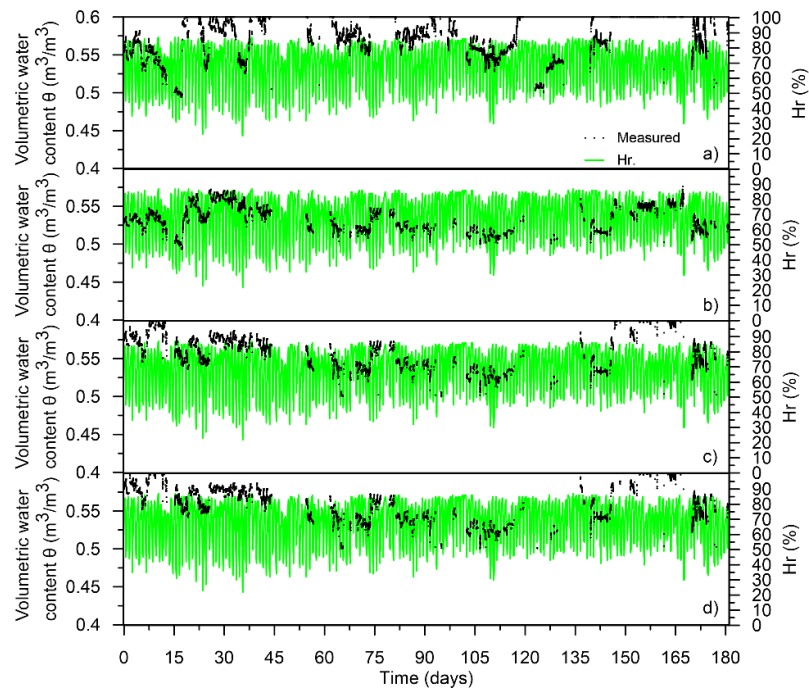


Figura 27 Variación de la humedad relativa vs humedad registrada - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Se puede observar en la Figura 27 un aumento sustancial en el contenido de humedad del suelo entre los días 17 y 40, aumento proporcional al aumento ocurrido con la humedad relativa, principalmente en horas de la madrugada. Esta situación produjo que en la interfaz entre el suelo y la atmosfera se desarrollara una transferencia de agua entre el aire saturado de agua y la superficie del suelo. Entre los días 60 y 75 se observa una disminución en el contenido de humedad del suelo para las cuatro profundidades, situación asociada al aumento de los mínimos registrados en la humedad relativa del ambiente para ese mismo periodo de tiempo.

Entre los días 90 y 120 el rango de variación de la humedad relativa ambiente fue menor, es decir la amplitud de los registros oscila entre un margen mas reducido, lo cual significa que la variación de la humedad del suelo fuera un tanto menor comparada con los primeros días del modelo.

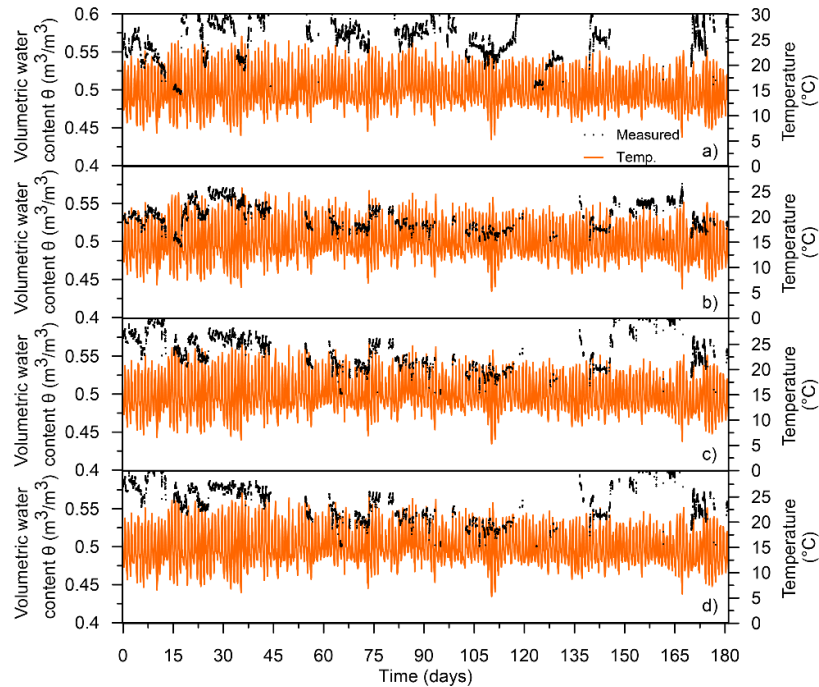


Figura 28 Variación de la temperatura ambiente vs humedad registrada - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

En cuanto a las variaciones producidas en la humedad del suelo debido a la variación de la temperatura, presentadas en la Figura 28, se puede observar una disminución en el contenido de humedad entre los días 50 y 90, en correspondencia con la disminución en la mínima temperatura promedio registrada en ese periodo de tiempo.

Sin embargo, no se encuentra correspondencia entre el aumento de humedad del suelo entre el periodo de tiempo comprendido entre los días 140 y 165, y lo ocurrido con la humedad relativa y la temperatura; ya que estas últimas permanecieron constantes en su valor medio. Contemplando lo expuesto anteriormente se evidencia que para comprender la dinámica entre el suelo y la atmosfera no solo basta con realizar un análisis de variables independientes, es necesario realizar un análisis donde intervengan y se consideren todas las variables atmosféricas y las propiedades del suelo, esto debido a la complejidad del sistema acoplado suelo-atmosfera.

4.6 Evaporación potencial a partir de las variaciones atmosféricas entre el 11 de enero y el 11 de julio del 2019

A partir de las condiciones atmosféricas obtenidas se obtuvo a partir del modelo numérico la tasa de evaporación potencial con la ecuación de Penman-Monteith descrita en la Ecuación 13.

En la Figura 29 se presenta la tasa de evaporación potencial EP en mm de vapor de agua por hora. Si bien esta tasa de evaporación potencial EP no es la cantidad de agua que se evapora directamente de la superficie del suelo, la cual se denomina evaporación real ER , esta tasa EP describe la misma tendencia que la ER tal como se puede observar en la Figura 5. Inclusive la ER puede ser igual a la EP cuando el suelo se encuentra saturado como se observa en la Ecuación 6.

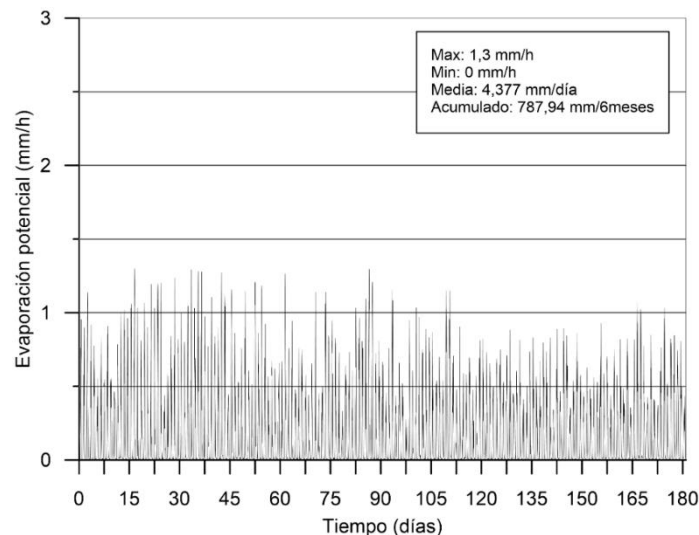


Figura 29 EP entre el 11/01/19 y 11/07/19.

Se puede observar en la Figura 29 que las máximas tasas de evaporación se presentaron en los dos primeros meses, en correspondencia con los valores de radiación solar y temperatura para dichos meses, los cuales tienen los registros más elevados y los máximos promedios mensuales y por día como se puede observar en la Figura 26 y la Figura 24. En el mes comprendido entre el 11 de enero al 11 de febrero (días 0 hasta 30) se obtuvo un total de 134, 83 mm de agua evaporada y su

promedio diario fue de una tasa igual a 5,076 mm/día, la más alta en este estudio. En contraste con esto, el mes en donde una menor cantidad de agua cambio de un estado líquido a un estado de vapor fue el mes comprendido entre el 11 de abril al 11 de mayo, es decir entre los días 90 y 120, en donde la evaporación fue de 121,54 mm y el promedio diario fue de 4,051 mm/día. Se presenta en la Tabla 11 un resumen de las tasas de evaporación total para cada mes y el promedio diario para cada uno de ellos.

Tabla 11 Valores de *EP* entre el 11/01/19 y 11/07/19.

Mes	Periodo	EP mensual	EP diario
-	mes	(mm)	(mm/día)
1	11 enero – 11 febrero	152,28	5,076
2	11 febrero – 11 marzo	139,64	4,655
3	11 marzo – 11 abril	139,04	4,635
4	11 abril – 11 mayo	121,54	4,051
5	11 mayo – 11 junio	126,81	4,227
6	11 junio – 11 julio	134,83	4,494

4.7 Definición de parámetros del modelo numérico de flujo a partir de la comparación entre los resultados simulados y medidos en campo

Para definir los parámetros del modelo con los cuales se realizaron todas las modelaciones, se desarrollaron 5 modelos en donde se simuló la variación del perfil de contenido volumétrico de agua θ para el periodo comprendido entre el 11 de enero al 11 de febrero. Para estos 5 modelos se variaron parámetros del modelo como el número de nodos, el intervalo de tiempo, la permeabilidad y la condición inicial. Esto con el fin de definir con cuales parámetros de modelo se obtenían los perfiles de humedad que se ajustaran de mejor manera a las mediciones de campo.

En la Tabla 12 se presenta de manera resumida dichos modelos preliminares con sus respectivos parámetros.

Tabla 12 Modelos preliminares mes 1.

Modelo	Nodos	# iterac.	Δt (días)	θ_0 (m ³ / m ³)	Ks (m/día)
1	100	1982	4,16667*E-2	0,60-0,60	1,27*E-4
2	1000	23040	1,3888*E-3	0,53-0,56	1,27*E-4
3	1000	23040	1,3888*E-3	0,56-0,60	1,27*E-4
4	1000	23040	1,3888*E-3	0,56-0,60	1,27*E-3
5	1000	23040	1,3888*E-3	0,56-0,60	6,35*E-4

En el modelo número 1 se optó por asignar una resolución de número de nodos a la columna de suelo de 1 nodo cada 1 centímetro, es decir, 100 nodos en total, además de un intervalo de tiempo de 0,004166 días el equivalente a aproximadamente 6 minutos. Al observar el resultado final de dicho modelo se observó que el número de iteraciones es bastante bajo con un total de 1982, producto de la relación entre el intervalo de tiempo y el número de nodos asignados. Por lo tanto, se decidió aumentar el número de nodos en los siguientes modelos y disminuir el intervalo de tiempo a un tiempo menor a 5 minutos, debido a que 5 minutos es la resolución de registro de los sensores de humedad y se deseaba tener más datos simulados que medidos con el fin de realizar una mejor comparación. Además, el modelo presenta una humedad mucho mayor que la medida en campo para los sensores a las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros como se observa en la Figura 30, por lo cual también se cambió la condición inicial del modelo.

A partir del modelo 2 y los demás modelos, se adoptó por definir un total de 1000 nodos que representaban la columna de suelo de 1 metro de alto, la distribución de nodos de los modelos del 2 al 5 fue entonces de 1 nodo cada 0,1 centímetros. También, el intervalo de tiempo se definió como 0,001388 días lo equivalente a 2 minutos, de este modo se aumentó la precisión de los modelos. Con estos dos parámetros del modelo se llegó a tener en promedio un total de 23040 iteraciones por modelo.

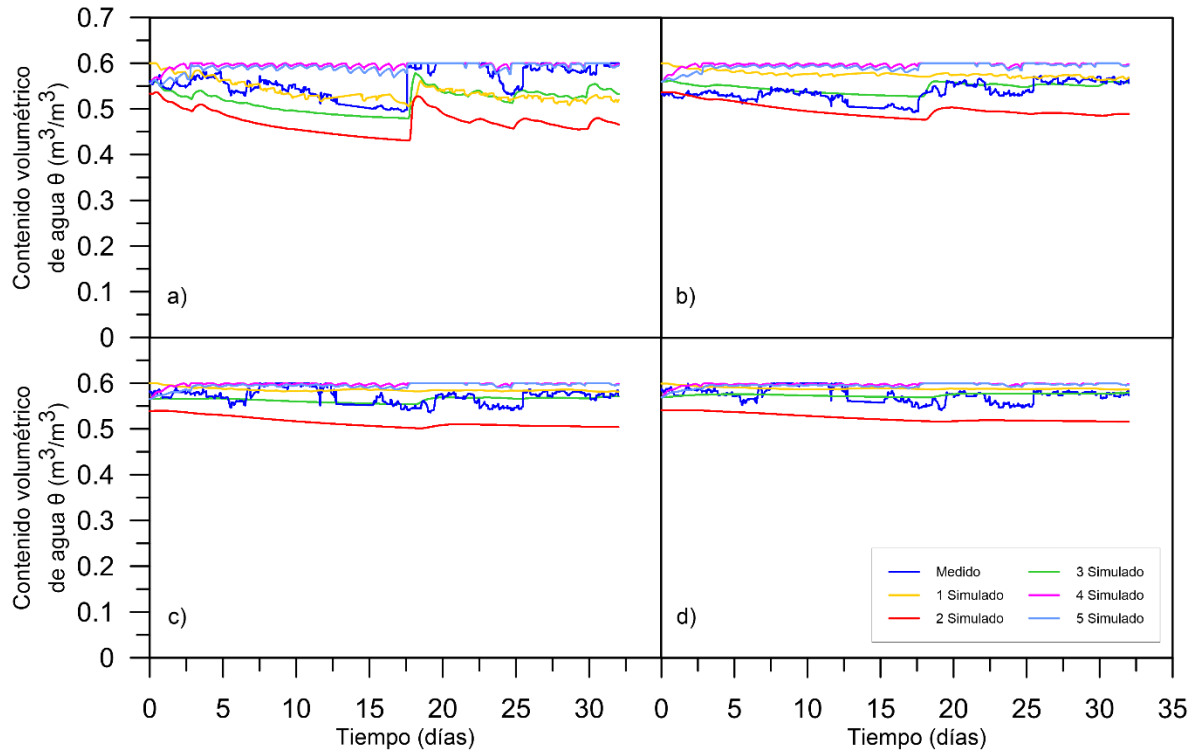


Figura 30 Modelos preliminares para mes 1, nodo a) 10 cm, b) 20 cm, c) 30 cm y d) 40 cm.

En el modelo 2 se utilizó el mismo valor de permeabilidad saturada K_s obtenido del proyecto campo experimental ECI el cual es de $1,47 \text{ E-}09 \text{ m/s}$ o $1,27 \text{ E-}4 \text{ m/día}$ como se presenta en la Tabla 12. La condición inicial θ_0 de este modelo se asignó como una variación lineal desde la superficie del modelo (0 metros) hasta el fondo (1 metro), con un valor en superficie de $0,53 \theta$ y en el fondo de $0,56 \theta$. Estos valores iniciales se obtuvieron realizando una prueba corriendo el modelo para los 7 primeros días de este mes sin considerar la precipitación, esto con el fin de saber el orden de magnitud de la humedad ante el efecto de secado producto de la evaporación, ya que el valor de 0,60 (saturación) adoptado en el modelo número 1 evidentemente fue elevado. Al final de estos 7 días se obtuvieron los valores de 0,53-0,56 los cuales se asumieron como condición inicial del modelo número 2. Sin embargo, en la Figura 30 se puede observar que la línea roja es la que presenta los menores contenidos de humedad y si bien su tendencia asemeja a la de los registros medidos, sus valores se alejan en cuanto a magnitud.

Para el modelo preliminar número 3 también se tomó una permeabilidad saturada K_s de $1,27 \cdot 10^{-4}$ m/día, el número de nodos fue de 1000 y el intervalo de tiempo 2 minutos; la diferencia con el modelo 2 consistió en la condición inicial θ_0 . La condición inicial de este modelo número 3 se tomó de los registros de los aparatos de humedad para el mismo instante de tiempo. Es decir, se tomaron los registros de humedad del 11 de enero del 2019 para las 00:05 a.m. de los 4 sensores y se realizó una variación lineal que dio como resultado una condición inicial de $0,56 \theta$ - $0,60 \theta$ en la superficie y a 1 metro de profundidad respectivamente, como se muestra en la Tabla 12. En la Figura 30 se observa para el modelo 3 representado por la tendencia de color verde, una buena correspondencia con respecto a los datos medidos en campo representados por la línea de color azul, principalmente para 10 y 20 centímetros.

Para los modelos número 4 y 5 descritos por la tendencia morada y azul clara respectivamente y presentados en la Figura 30, se varió el valor de la permeabilidad. Con respecto al modelo número 3 este fue el único cambio que se realizó, esto se hizo con el fin de observar la incidencia de la permeabilidad en el flujo de agua, los valores adoptados de K_s se presentan en la Tabla 12. Se puede observar que las tendencias de estos modelos son lineales para todos los nodos, lo que refleja que los valores de permeabilidad saturada K_s adoptados fueron muy bajos, ya que no reflejan la hidrodinámica infiltración- evaporación del suelo ante los cambios atmosféricos.

Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta a las mediciones en campo se determinó el error cuadrático medio $RMSE$ con la Ecuación 18, el error porcentual medio $MAPE$ con la Ecuación 19 y el error absoluto medio MAE con la Ecuación 20, dichos valores cuantifican la desviación entre los valores simulados de cada modelo y las mediciones reales en campo.

En la Figura 31 se presenta el $RMSE$ obtenido para cada uno de los modelos, se puede evidenciar que en promedio el mayor error cuadrático medio se obtuvo para el modelo número 2. El modelo número 2 presentó el mayor $RMSE$ para las profundidades de 10, 30 y 40 centímetros. Dichos errores máximos son $0,086 \theta$, $0,054 \theta$ y $0,047 \theta$ respectivamente.

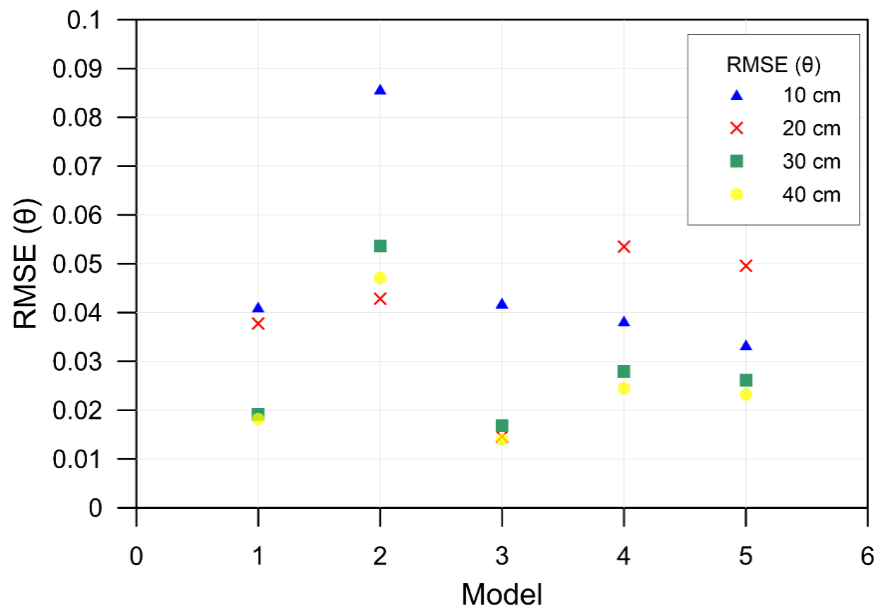


Figura 31 *RMSE* calculado para los modelos preliminares.

El mayor *RMSE* para la profundidad de 20 centímetros se obtuvo con el modelo número 4 y el valor fue de 0,053 θ . Por otro lado, los mínimos *RMSE* fueron de 0,015 θ , 0,017 θ y 0,014 θ con el modelo número 3, para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros. El menor *RMSE* para la profundidad de 10 centímetros fue de 0,033 θ con el modelo 5 aunque la tendencia en general no es muy acertada.

El error porcentual *MAPE* también fue calculado y se presenta en la Figura 32, los valores oscilan entre 1,87% y 12,8%. Los máximos errores porcentuales se obtuvieron con el modelo 2 con valores de 12,8%, 8% y 7% para 10, 30 y 40 centímetros respectivamente. El mayor *MAPE* para la profundidad de 20 centímetros se obtuvo con el modelo número 4 y el valor fue de 8,5%.

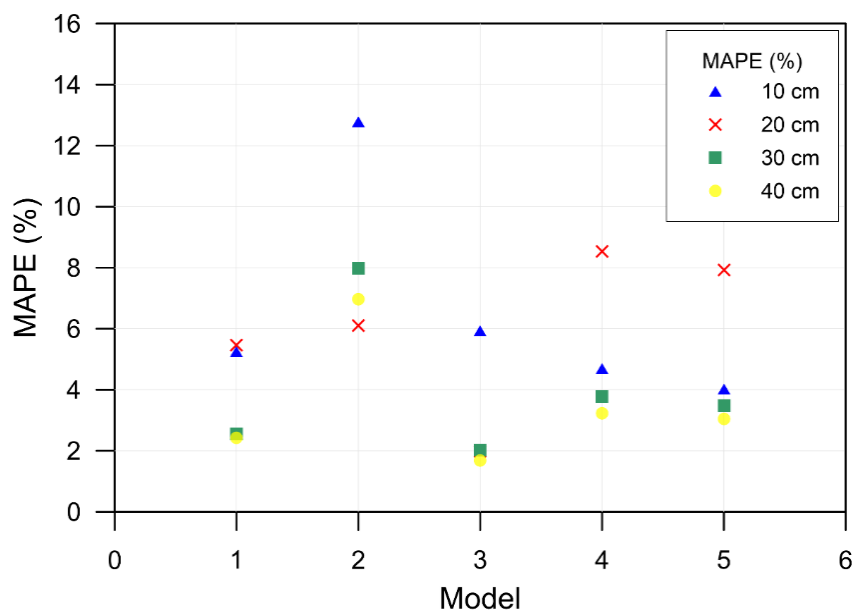


Figura 32 *MAPE* calculado para los modelos preliminares.

Porcentualmente los mínimos se obtuvieron para el modelo número 3 con valores de 2%, 2% y 1,7% para 20, 30 y 40 centímetros respectivamente. El mínimo *MAPE* a 10 centímetros de profundidad fue de 4% con el modelo número 5.

Por último, se estimó el *MAE* encontrando las mismas tendencias, los valores máximos fueron de 0,073 θ , 0,046 θ y 0,04 θ para el modelo número 2. El máximo error con esta metodología a 20 centímetros fue de 0,046 θ con para el modelo número 4. Una vez más lo mínimos se obtuvieron con el modelo número 3 y sus valores fueron de 0,01 θ , 0,012 θ y 0,01 θ en 20, 30 y 40 centímetros. Para 10 centímetros el mínimo fue de 0,022 θ para el modelo número 5.

En base a la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 en donde se presentan los cálculos de los errores *RMSE*, *MAPE* y *MAE*, el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el número 3, ya que, presenta los menores valores de error para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros. Además para la profundidad de 10 centímetros si bien no presento los mínimos valores de error, es uno de los modelos que presenta los menores valores; sumado a esto el modelo número 3 presenta las tendencias simuladas que mejor se ajustan a los valores medidos en campo como se observa en la Figura 30.

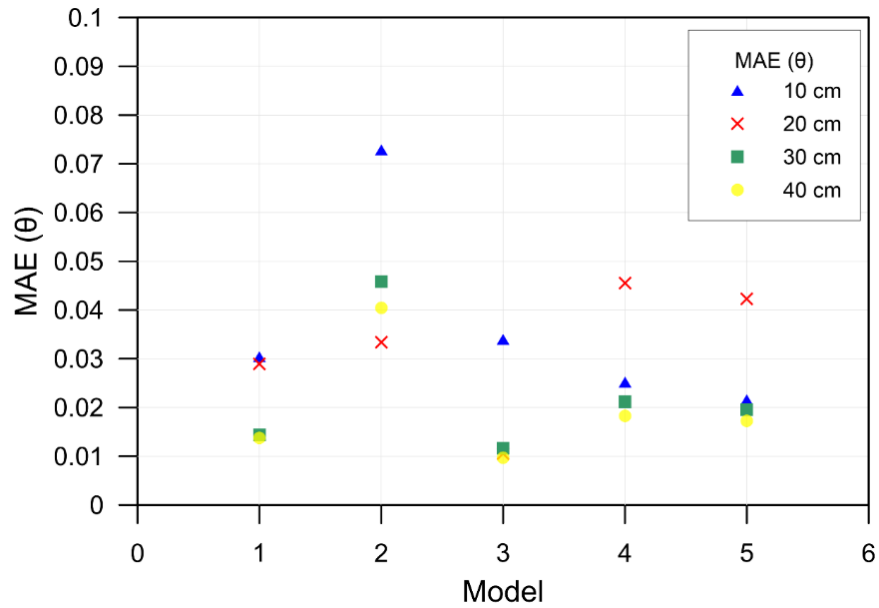


Figura 33 MAE calculado para los modelos preliminares.

4.8 Resultados del modelo numérico de flujo en 1 dimensión

Se realizaron 6 modelos de flujo de agua a través del suelo en el software Hydrus-1D, el periodo de tiempo de las modelaciones está comprendido entre el día 11 de enero y 11 de julio del 2019. El tiempo de cada modelo fue de un mes aproximadamente, dependiendo de la duración calendario de cada mes. El periodo de cada modelo y su duración se presentan en la Tabla 13, el total de días corresponde a 181, es decir, aproximadamente 6 meses.

Tabla 13 Modelos de flujo con su respectivo periodo de tiempo.

Modelo	Periodo	Tiempo
-	mes	días
1	11 enero – 11 febrero	31
2	11 febrero – 11 marzo	28
3	11 marzo – 11 abril	31
4	11 abril – 11 mayo	30
5	11 mayo – 11 junio	31
6	11 junio – 11 julio	30
		181

Se escogieron los parámetros del modelo número 3 para realizar los 6 modelos numéricos. La geometría del perfil consiste en una columna de limo arcilloso blando cuya profundidad es de un metro. La condición de frontera superior corresponde a las variaciones atmosféricas presentadas entre la Figura 22 y la Figura 26 según cada periodo de tiempo; mientras que la condición de frontera inferior consistió en un nivel de saturación del suelo blando con un valor de $0,6 \theta$.

Como resultado de los 6 modelos se obtuvo la variación del contenido volumétrico de agua θ para las profundidades 10, 20, 30 y 40 centímetros, las cuales fueron comparadas con las mediciones realizadas en campo por los sensores.

4.8.1 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 1

El primer modelo con duración de 31 días fue realizado entre el 11 de enero y el 11 de febrero, el cual se considera uno de los meses más soleados en la ciudad de Bogotá (Instituto de Hidrología, 2007). Como resultado de esta modelación numérica se observa la Figura 34, en donde se puede apreciar para la profundidad de 10 centímetros la influencia de los procesos de evaporación en la disminución de θ . El efecto también se puede distinguir para una profundidad de 20 centímetros, sin embargo, para 30 y 40 centímetros el comportamiento de las tendencias permanece principalmente constante y no se aprecian visualmente variaciones en el perfil de humedad.

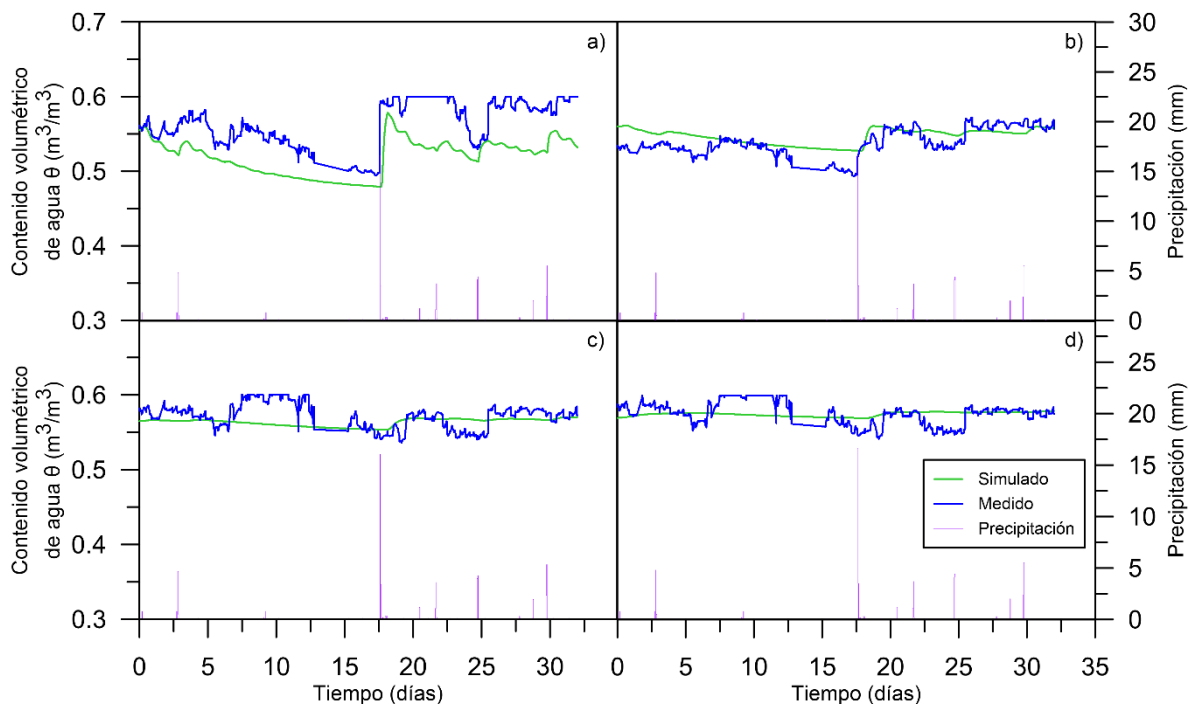


Figura 34 Variación θ para el primer mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

En la Figura 34 a) se puede apreciar que para una profundidad de 10 centímetros se encontraron las máximas variaciones de humedad, el valor mínimo encontrado a esta profundidad fue de $0,4793 \text{ m}^3/\text{m}^3$ aproximadamente en el día 17,5. Esto debido a un largo periodo de secado donde las fuerzas de infiltración fueron ascendentes en forma de vapor de agua, ya que, entre el día 2,7 y el día 17,6 no se presentaron lluvias. El máximo valor de humedad a esta profundidad se presentó el día 18,25, producto de la máxima precipitación ocurrida en este mes donde se registraron 16,6 mm de agua. Existe un desfase entre el tiempo en el cual se presentó dicha precipitación con el tiempo en el cual se alcanzó el máximo valor de humedad, dicha diferencia de tiempo es de aproximadamente 0,65 días o 15,6 horas. Para los últimos 15 días de este mes se observan intervalos ascendentes y descendentes en el perfil de humedad, estos son producto de las precipitaciones intermitentes presentadas en la segunda mitad del mes. En general los valores simulados reproducen de buena manera la tendencia de los valores medidos en campo,

aunque existe una diferencia para los valores de saturación que alcanzaron los sensores de humedad en donde el modelo subestima la humedad en campo.

En la Figura 34 b) se observa que el rango de humedad para una profundidad de 20 centímetros es mucho menor, en donde el mínimo valor es de $0,5273 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el máximo es de $0,561 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en los días 17,86 y 18,95 respectivamente. Durante los primeros 17 días a esta profundidad, se presentó una tendencia de disminución de humedad a una tasa más o menos constante. Con respecto a la profundidad de 10 centímetros, para 20 centímetros tomó más tiempo alcanzar un valor máximo de humedad tras el evento de precipitación del día 17,6. El valor máximo se alcanzó 16,8 horas después. Con respecto a las humedades medidas, si bien la simulación no presenta tantos picos, su respuesta se asemeja de buena manera al valor medio de los datos medidos en campo.

Para la profundidad de 30 centímetros mostrada en la Figura 34 c) el rango de humedad es aún menor, el valor máximo fue de $0,5704 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el mínimo de $0,5534 \text{ m}^3/\text{m}^3$. El efecto de las precipitaciones visualmente no es tan evidente, a excepción del incremento producido por la máxima precipitación del mes de 16,6 milímetros, en donde la humedad paso de un valor de $0,5534 \text{ m}^3/\text{m}^3$ hasta $0,5687 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en 2,2 días. Dicho incremento provoco una tendencia similar tanto en los datos simulados como en los medidos. Sin embargo, la máxima humedad se obtuvo al final del modelo producto del acumulado de lluvias de los últimos días del mes.

En la Figura 34 d) se puede evidenciar que para la profundidad de 40 centímetros que la variación de la humedad es mínima. El máximo valor de humedad fue de $0,5794 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mientras que el mínimo fue de $0,5698 \text{ m}^3/\text{m}^3$, la diferencia entre los extremos fue de tan solo $9,6 \text{ E}^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$. El valor medio a esta profundidad fue el más elevado. Comparado con las humedades medidas por sensores el modelo no presenta incrementos y decrementos continuos, sin embargo, el valor medio se acerca al medido en campo.

4.8.2 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 2

El segundo modelo con duración de 28 días fue realizado entre el 11 de febrero y el 11 de marzo, este mes se caracterizó por los pocos días lluviosos. Los resultados de este modelo se presentan en la Figura 35. En este mes los efectos de la evaporación son más notorios comparados con el primer mes. Se distinguen 3 etapas de disminución de humedad y dos momentos en los cuales la humedad aumento, esta última acción asociada con precipitaciones puntuales.

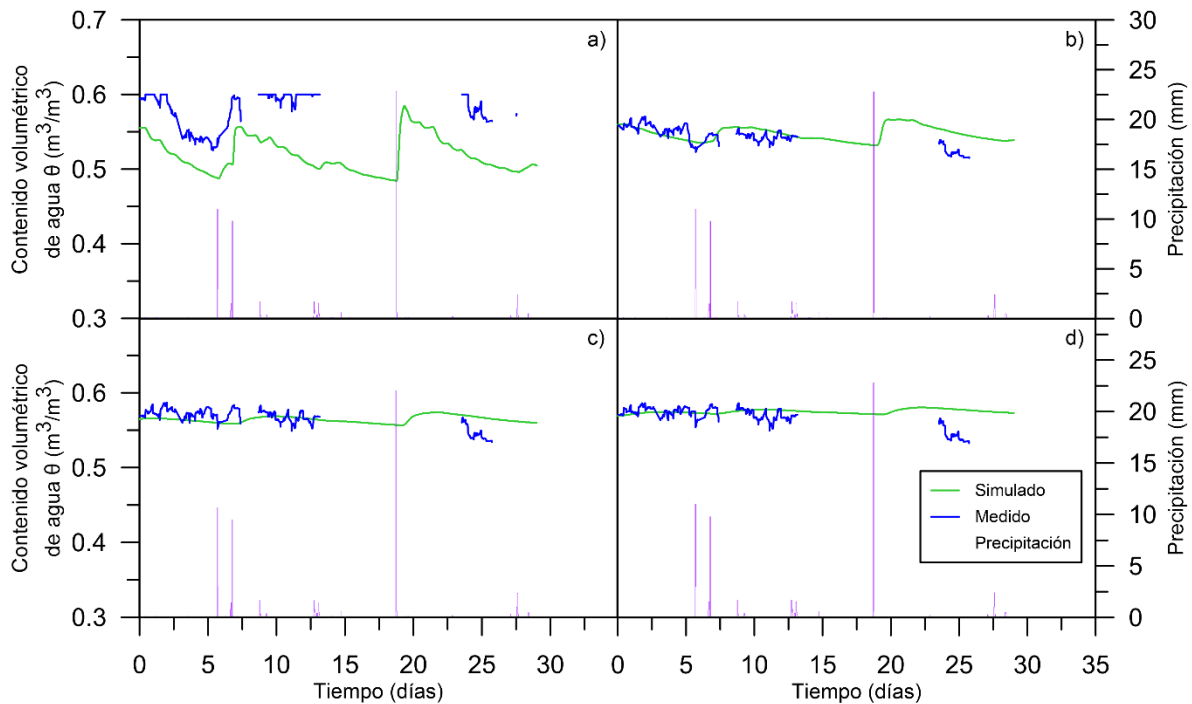


Figura 35 Variación θ para el segundo mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Para la profundidad de 10 centímetros se distinguen de manera clara tres pendientes negativas que indican una disminución en la humedad. En contraposición se tienen tres momentos en los cuales se alcanzan valores elevados de humedad, uno de ellos es al inicio del modelo y los otros dos tras eventos de lluvia. A lo largo del modelo se aprecian variaciones considerables en la humedad,

el valor máximo registrado fue de $0,585 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el mínimo $0,4844 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Frente a los valores medidos, las humedades simuladas presentan en general valores más bajos, aunque observando tendencias se puede decir que son similares.

Para una profundidad de 20 centímetros también se evidencia el efecto de las precipitaciones ocurridas los días 5,67 y 6,75 que generan un aumento en la humedad. Para esta profundidad el suelo apenas había alcanzado un pico máximo de humedad producto de la precipitación del día 5,67 cuando se presentó una lluvia el día 6,75, lo que generó que el efecto de las dos lluvias parezca el producido por una sola precipitación puntual. La máxima humedad fue de $0,567 \text{ m}^3/\text{m}^3$ registrada después de la máxima precipitación presentada en este modelo que fue de 22,8 milímetros de agua el día 18,71. La mínima humedad alcanzada para esta profundidad fue de $0,5318 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Para las profundidades de 30 y 40 centímetros en este modelo son más evidentes los incrementos en la humedad producto de las precipitaciones comparados con el modelo número uno. Para 30 centímetros el valor máximo de humedad fue de $0,574 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el mínimo de $0,556 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mientras que a 40 centímetros los valores fueron de $0,581 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,57 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. Para ambas profundidades existe una buena relación en cuanto a las tendencias de los datos medidos y simulados.

4.8.3 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 3

En el tercer modelo hubo un gran número de días con lluvia, sin embargo, se caracterizaron por tener una baja magnitud. Este modelo comprende el periodo de tiempo entre el 11 de marzo y el 11 de abril. En general en este modelo los valores simulados son mayores a los medidos en campo. En cuanto a las tendencias entre ambas humedades para las 4 profundidades, son más precisas para los primeros 20 días del modelo y pierden precisión los 10 días finales. Para este mes los valores medios de humedad son más elevados que en los anteriores, los resultados de este modelo se presentan en la Figura 36.

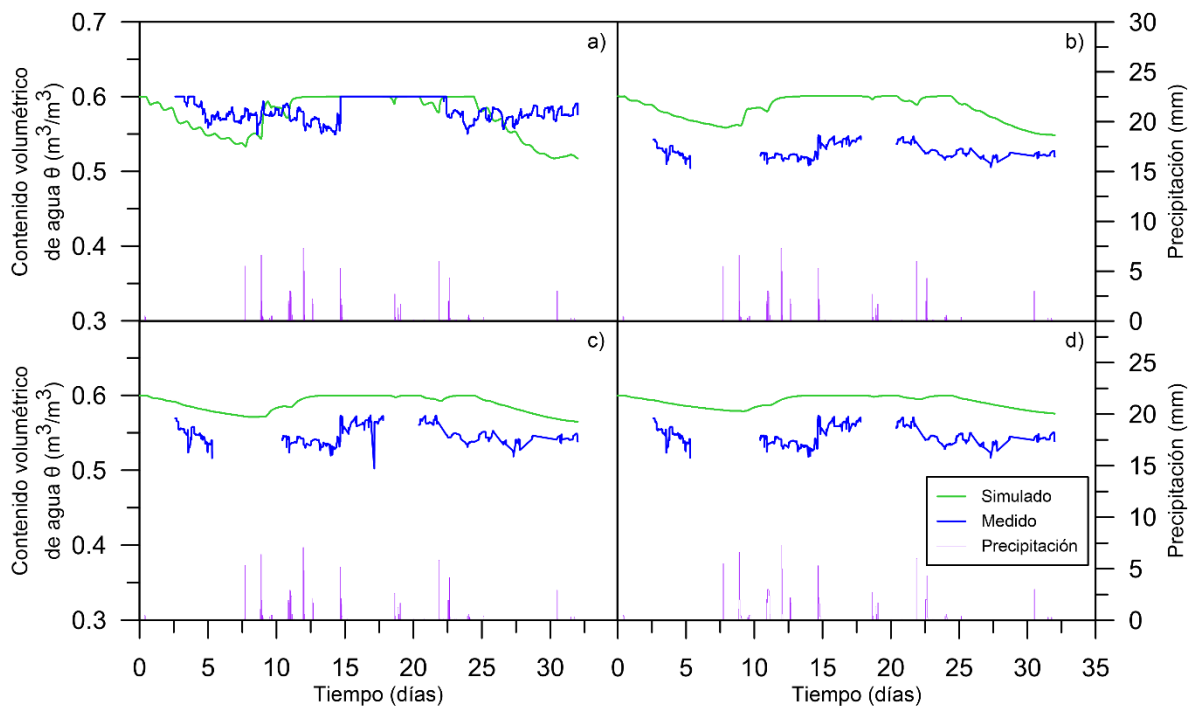


Figura 36 Variación θ para el tercer mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Para una profundidad de 10 centímetros se alcanzó la saturación con un valor de $0,60 \text{ m}^3/\text{m}^3$ durante un periodo de aproximadamente 14 días. El valor mínimo se presentó al final del modelo con una humedad de $0,5171 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Las constantes lluvias presentadas entre los días 7,5 y el día 24 provocaron la saturación del suelo manteniéndose prácticamente constante por un periodo de 14 días. Para los datos medidos en campo la saturación se alcanzó 4 días después a comparación con los datos simulados. Para los últimos 10 días del modelo tanto la relación entre datos medidos y simulados como las tendencias presentan buena correspondencia.

Para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros las tendencias son similares. Se diferencian entre ellas ya que, en superficie los valores de humedad son menores y en profundidad son mayores. Los valores máximos fueron $0,567 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0,574 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,581 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para 20, 30 y 40 centímetros, mientras que los mínimos fueron $0,532 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $0,556 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,57 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. Además, para 20 centímetros los

efectos atmosféricos traducidos en evaporación son más evidentes, ya que, para la figura b) se pueden apreciar más fluctuaciones en la humedad simulada con respecto a las figuras c) y d).

4.8.4 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 4

El modelo del mes número 4 fue el que presento el mayor registro acumulado de precipitación, en total se registraron 182,7 milímetros de agua; sin embargo, no se alcanzó la saturación del suelo. Esta situación pudo deberse a que, si bien el acumulado es el máximo entre todos los modelos de los 6 meses, las lluvias puntuales no son las máximas precipitaciones en milímetros de agua presentadas en la modelación. En la Figura 37 se presentan los resultados de esta modelación, para las profundidades 20, 30 y 40 centímetros se sobrestimaron las humedades.

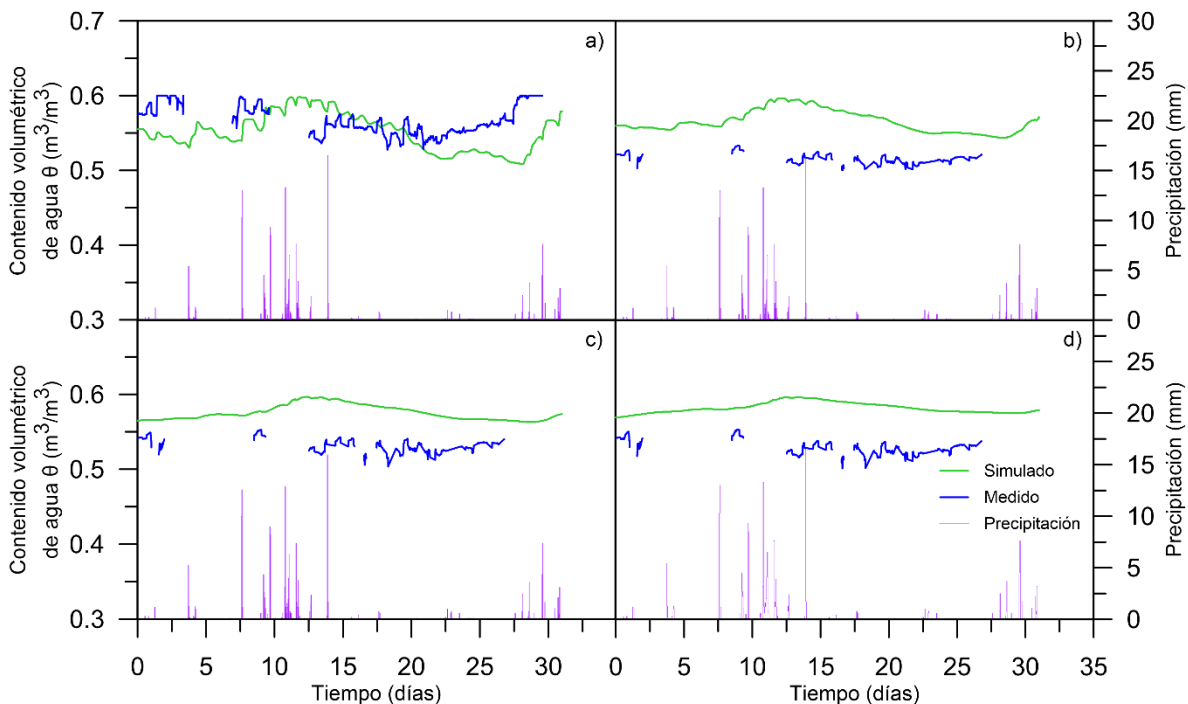


Figura 37 Variación θ para el cuarto mes del modelo – a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Para 10 centímetros se observan bastantes fluctuaciones en el contenido de humedad, sobre todo para los 15 primeros días cuando se tienen la mayor cantidad de días con lluvias. Para estos primeros 15 días con lluvias existen intervalos de días secos, por lo cual el suelo se ve sometido a continuos procesos de humedecimiento y secado. El valor máximo alcanzado a esta profundidad es de $0,5986 \text{ m}^3/\text{m}^3$ registrado durante los días de lluvia, mientras que el mínimo de $0,5087 \text{ m}^3/\text{m}^3$ se obtuvo el día 28 tras un largo periodo de evaporación continuo.

A una profundidad de 20 centímetros en este modelo se pueden distinguir procesos de humedecimiento y secado, las fluctuaciones en la humedad son apreciables. Para los primeros 7 días, a esta profundidad la humedad es prácticamente constante, hasta el periodo de lluvias constantes entre el día 7 y 14 en donde se observa un claro incremento en la humedad, alcanzando un máximo de $0,5966 \text{ m}^3/\text{m}^3$ el día 11,78. La humedad más baja fue de $0,5436 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para el día 28,5 en el día 28,5, también como resultado del largo periodo de evaporación.

Para los 30 y 40 centímetros de profundidad del modelo la tendencia es de incrementos en la humedad; el efecto de la evaporación a esta profundidad no supone disminuciones considerables en la humedad, en correspondencia a los valores de evaporación presentados en la Tabla 11 que indican que el mes 4 presenta los menores valores. Los valores máximos a esta profundidad son de $0,5965 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,5969 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para 30 y 40 centímetros, mientras que los mínimos son de $0,563 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,57 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. Para este mes modelado se obtuvieron las mayores humedades máximas y los mínimos de humedad más elevados, lo que refleja la cantidad de agua que se infiltró en el perfil de suelo, sin embargo, las humedades medidas por sensores no presentaron valores elevados.

4.8.5 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 5

Para este modelo del mes 5 no se obtuvo buena correspondencia entre los valores medidos y simulados, ni tampoco se obtuvieron buenas tendencias en general. Este modelo comprende el periodo de tiempo entre el 11 de mayo y el 11 de junio. Para

este mes también se tiene un acumulado de agua lluvia elevado con un total de 121,5 milímetros. Los resultados de este modelo se presentan en la Figura 38.

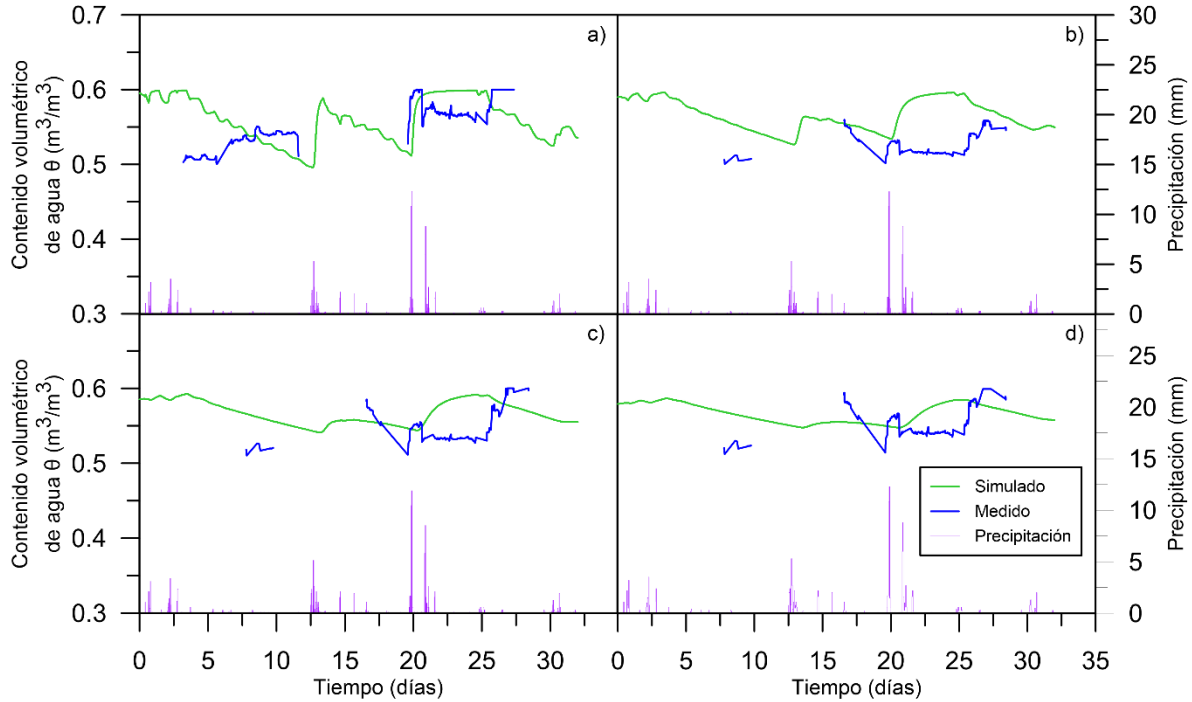


Figura 38 Variación θ para el quinto mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Para la profundidad de 10 centímetros se evidencian fluctuaciones en la humedad, se aprecian tres periodos en donde la humedad del suelo disminuye considerablemente. Entre dichos periodos se tienen incrementos en la humedad producto de las lluvias, en donde inclusive se alcanzó la saturación. El valor máximo de humedad se alcanzó tras las lluvias de los días 19 y 22 en donde en total se infiltraron 55,5 milímetros de agua y se llegó a la saturación con un valor de $0,60 \text{ m}^3/\text{m}^3$, mientras que la mínima humedad se alcanzó el día 12,6 con un valor de $0,496 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Para una profundidad de 20 y 30 centímetros se tienen tendencias similares, desarrollándose más fluctuaciones en la primera y cambios más suavizados en la segunda. Una diferencia entre estas dos profundidades consiste en la pendiente de

las curvas simuladas después de la ocurrencia de lluvias, siendo más pronunciada a 20 centímetros; situación similar ocurre con la evaporación en donde la menor pendiente es para la profundidad de 30 centímetros. Los rangos de variación son similares, para 20 centímetros es de $0,5964 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,5266 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y en 30 centímetros fue de $0,5925 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,541 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

A 40 centímetros en el perfil de suelo, para este modelo se evidencian variaciones en las tendencias de humedad, sin embargo, las lluvias del día 12,5 apenas causaron un leve aumento en la humedad que se reflejó varias horas después. El rango de humedades a esta profundidad fue un poco más amplio, sus valores fueron de $0,5875 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,5483 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

En cuanto a las diferencias en los valores medidos y simulados puede deberse a un efecto producto a la cantidad de agua lluvia de los modelos 4 y 5 que producen que los sensores presenten valores atípicos, lo que genera una diferencia frente a la modelación.

4.8.6 Resultado del modelo numérico de flujo para el mes 6

Para este último modelo de flujo, realizado entre el 11 de junio y el 11 de julio la relación entre las humedades medidas y simuladas mejoro en comparación a los dos modelos anteriores. Las principales variaciones se observaron a las profundidades de 10 y 20 centímetros, para 30 y 40 la respuesta del suelo ante variaciones atmosféricas fue principalmente lineal. Este mes se caracterizó por las bajas precipitaciones. Para los primeros 7 días del modelo las humedades en 10, 30 y 40 centímetros registraron saturación, situación que se aleja para las simulaciones a 10 centímetros, pero se aproxima de buena con las simulaciones a 30 y 40 centímetros.

A 10 centímetros de profundidad se puede observar una gran variación en el contenido de humedad, en donde el valor máximo es de $0,60 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el mínimo de $0,4977 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Se observan dos periodos de disminución de humedad

considerables, durante los primeros y últimos 10 días, debido a que no se presentaron lluvias de más 5 milímetros durante todo el mes.

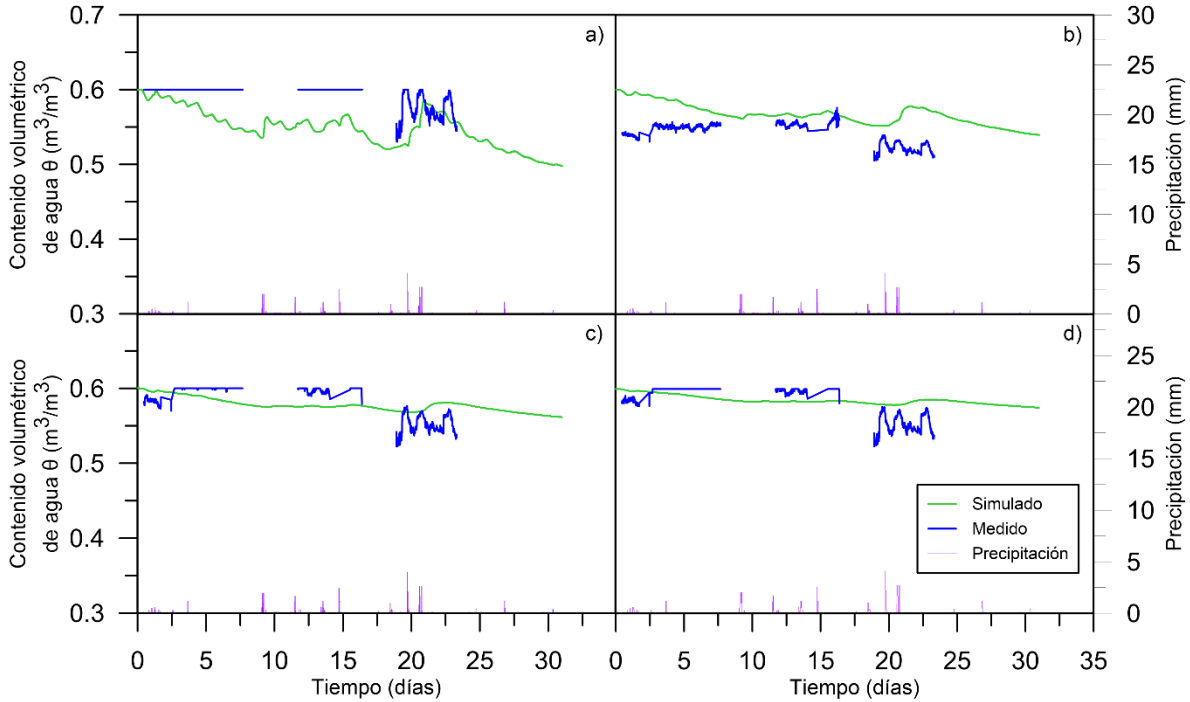


Figura 39 Variación θ para el sexto mes del modelo - a) 10, b) 20, c) 30, d) 40 cm.

Para 20 centímetros de profundidad se observa una tendencia similar comparada con la profundidad de 10 centímetros, sin embargo, con menos fluctuaciones y los aumentos debido a las lluvias son más suavizadas. El rango de humedades simuladas fue de $0,595 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,539 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Las humedades simuladas para 30 y 40 centímetros tienen un rango de variación reducido, los rangos que se obtuvieron para este modelo fueron $0,59 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,561 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,585 \text{ m}^3/\text{m}^3$ - $0,575 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. A estas profundidades el efecto de la evaporación fue mínimo, la pérdida de humedad se vio compensada con las pocas lluvias que se presentaron en este mes, lo que provoco que la humedad permaneciera prácticamente constante.

Con respecto a las humedades medidas no se replicaron las fluctuaciones, pero si se acertó de buena, manera en el valor medio.

4.9 Variación del potencial de succión a partir de los modelos de flujo

Para cada valor obtenido de humedad a partir de las simulaciones durante los 181 días, se obtuvo también un correspondiente valor de succión calculado a partir de la curva SWCC y los parámetros hidráulicos del modelo Van Genuchten-Mualem. En la Figura 40 se presenta la variación de dicho potencial de succión a través del tiempo; también se presenta la variación de la succión obtenida a partir de las humedades medidas con uno de los sensores electrónicos.

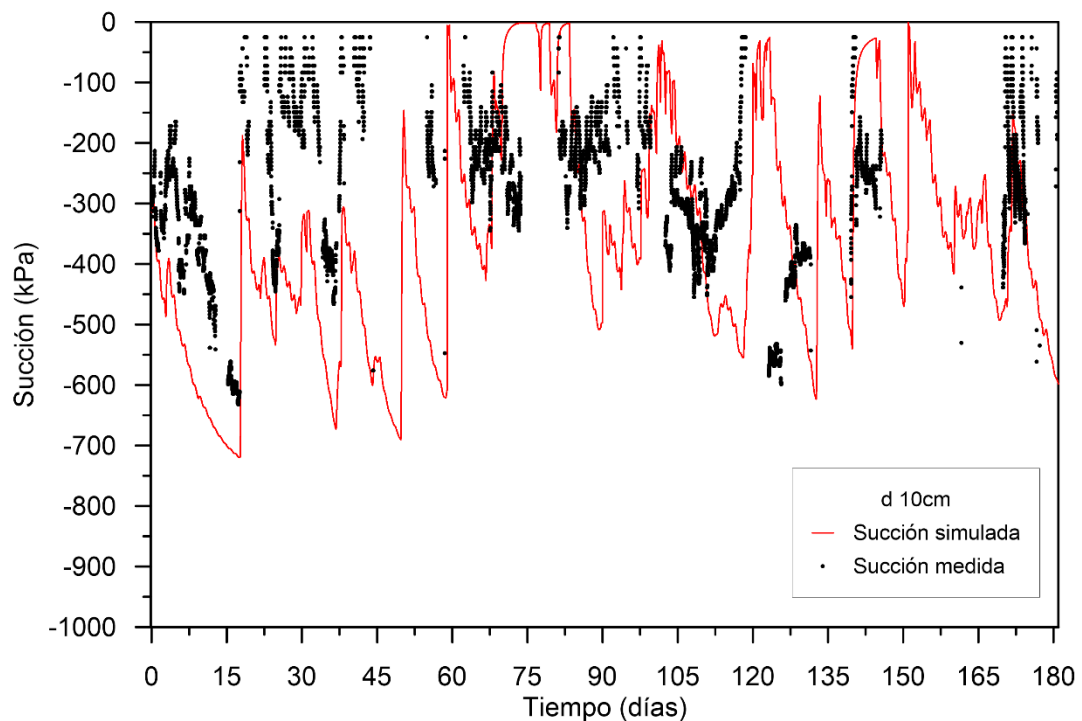


Figura 40 Variación de la succión en el tiempo para 10 cm de profundidad.

Se presenta la variación de la succión para una profundidad de 10 centímetros, debido a que es la profundidad para la cual se obtuvieron las mayores variaciones en la humedad comparado con 20, 30 y 40 centímetros. Por lo tanto, es la profundidad en donde el rango de variación de succión es mayor. El potencial de succión es presentado en escala de presiones de poros negativas.

El máximo valor de succión que presentó el perfil de suelo a la profundidad de 10 centímetros fue de 720 kPa para el día 17,5 de la modelación, asociado a la

humedad más baja obtenida, la cual fue de $0,4793 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Por otro lado, las mínimas succiones fueron de 0 kPa y se obtuvieron entre los días 71 y 83 cuando el suelo se encontraba saturado. Se puede observar en la Figura 40 la relación inversa que existe entre la humedad y la succión, en donde, para las humedades más bajas el suelo desarrolla las máximas succiones, mientras que cuando los poros del suelo se encontraban ocupados completamente por agua la succión fue cero.

Para las succiones medidas la succión más alta registrada fue de 623 kPa en el día 17,4, correspondiente a la humedad medida más baja la cual fue de $0,4829 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Capítulo V Análisis de resultados

Para realizar el análisis de los resultados se determinó la desviación entre los valores de humedad obtenidos a partir de los modelos de flujo, con respecto a los valores de humedad medidos con sensores. De esta manera es posible estimar el error para cada modelo y asociar las desviaciones con la influencia de las variables atmosféricas. Se determinó para cada modelo el error cuadrático medio *RMSE* con la Ecuación 18, el error porcentual medio *MAPE* con la Ecuación 19 y el error absoluto medio *MAE* con la Ecuación 20; dichos resultados se presentan en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43. También se analizó el comportamiento hidráulico del suelo asociado a los procesos de humedecimiento y secado producto de eventos de lluvia y evaporación para 4 profundidades diferentes.

Por último, mediante una gráfica de dispersión entre las humedades medidas y simuladas se determinó si los modelos subestiman o sobreestiman las condiciones de humedad reales del suelo.

5.1 Análisis de los modelos a partir del cálculo del error

Para el primer modelo el mayor error se obtuvo para una profundidad de 10 centímetros como se puede observar en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43. Los valores de error obtenidos a esta profundidad fueron de $0,042 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 5,93% con el *MAPE* y $0,034 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. Para esta profundidad las humedades simuladas fueron inferiores durante todo el mes

modelado. Sin embargo, a pesar de presentar un error mayor comparado con las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros, la tendencia simulada se asemeja de buena manera a las humedades medidas.

Para 20 centímetros de profundidad, los errores fueron de $0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $1,976\%$ con el *MAPE* y $0,010 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. Para lluvias superiores a 5 milímetros se puede apreciar en la Figura 34 b) que el aumento en la humedad es visualmente perceptible, como sucedió con las lluvias de los días 2,6 y 17,5; mientras que para lluvias menores la respuesta del suelo visualmente no es apreciable en la gráfica, como lo sucedido con las lluvias posteriores al día 20 del modelo. Para esta profundidad de 20 centímetros las fluctuaciones de la humedad son menores, la tendencia obtenida a partir de la simulación emula de buena forma la humedad medida; los valores simulados son mayores que los medidos durante los primeros 20 días y viceversa para los 10 días finales.

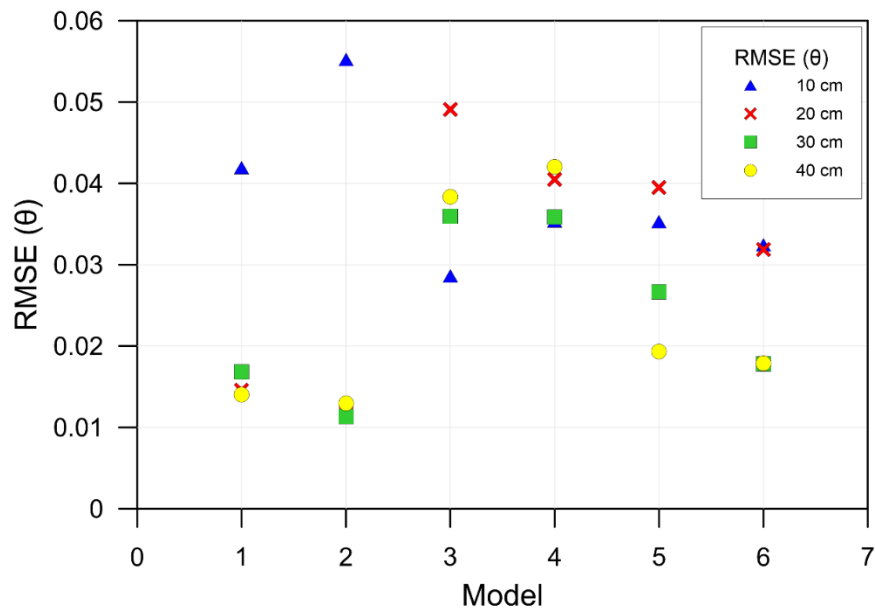


Figura 41 *RMSE* para cada modelo.

Para las profundidades de 30 y 40 centímetros dentro del perfil de suelo, en este modelo número uno no se apreciaron variaciones significativas en la humedad. El rango de humedad para 30 centímetros fue de $0,017 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y a 40 centímetros fue de tan solo $0,0096 \text{ m}^3/\text{m}^3$; lo cual indica para este mes la linealidad de las

humedades simuladas. Para estas profundidades no se observaron fluctuaciones en el perfil de humedades simuladas en función del tiempo, mientras que las humedades medidas si mostraron mayor variabilidad. A pesar de esto se obtuvieron en este modelo errores bastante satisfactorios debido a que los valores medios entre ambas humedades (simuladas y medidas) fueron muy cercanos para ambas profundidades. Los errores fueron de $0,017 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $2,021\%$ con el *MAPE* y $0,012 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE* para 30 centímetros, mientras que para 40 centímetros se obtuvo $0,014 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $1,686\%$ y $0,010 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente.

En este primer modelo se encontró la humedad más baja dentro de los 6 modelos, la cual fue de $0,4793 \text{ m}^3/\text{m}^3$ aproximadamente en el día 17,5; esto en correspondencia a las condiciones atmosféricas correspondientes a este primer mes, con las cuales se encontró la mayor tasa de evaporación como se muestra en la Tabla 11. La humedad medida más baja dentro de todos los modelos también se registró en este primer modelo, para el día 17,5. Ambos valores mínimos se obtuvieron para una profundidad de 10 centímetros, evidenciándose de esta manera la relación de la evaporación con la profundidad en el perfil de suelo.

Analizando el modelo de flujo de agua a través del suelo para el segundo mes, se puede observar en la Figura 35 a), b) y c) que existe una variación más evidente en el contenido de humedad; para d) la respuesta del suelo ante las condiciones atmosféricas fue mínima.

En este mes se registró la máxima precipitación puntual entre todos los modelos, la cual fue de 22,8 milímetros en el día 18 y su efecto fue tal que para una profundidad de 40 centímetros se evidencio un aumento sustancial en el contenido de humedad; fue el evento de lluvia puntual el cual genero el mayor aumento de humedad a dicha profundidad dentro de todos los modelos. A pesar de esto este fue uno de los meses con menos días con lluvias.

Para una profundidad de 10 centímetros se observan 3 periodos de evaporación intensos, en los cuales al final de dos de ellos se alcanzan humedades muy bajas. Dichas humedades son de las más bajas para todos los modelos y sus valores son de $0,4875 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,4844 \text{ m}^3/\text{m}^3$ registradas los días 5,75 y 18,75 del modelo número 2. Para esta profundidad la respuesta de la humedad simulada presenta

valores más bajos en comparación a las humedades medidas, sin embargo, las tendencias se asemejan entre sí. A pesar de esto en este modelo se obtuvieron los errores más elevados entre los modelos como se puede observar en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43. Los errores fueron de $0,055 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $7,830\%$ con el *MAPE* y $0,046 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. Uno de los motivos de este desfase pudo deberse a que el sensor ubicado a la profundidad de 10 centímetros registro saturación entre los días 8 y 13, aumentando el error considerablemente. Pese a esto, el modelo permitió observar la incidencia de las variables atmosféricas en este mes, reflejando la incidencia del efecto de radiación solar y temperatura, las cuales para este periodo de tiempo muestran los valores más elevados como se observa en la Figura 24, Figura 26 y en los valores de la Tabla 10.

Para este segundo modelo las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros presentaron los errores más bajos dentro de todos los modelos realizados. Para 20 centímetros los errores fueron de $0,012 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $1,485\%$ con el *MAPE* y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*, para 30 centímetros se obtuvo $0,011 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $1,402\%$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y a una profundidad de 40 centímetros se obtuvo $0,013 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $1,389\%$ y $0,008 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. Se puede observar en la Figura 35 b), c) y d) la buena correlación entre las humedades medidas y simuladas para este modelo. La respuesta de los sensores y del modelo numérico fue similar ante las variaciones atmosféricas, el desfase de tiempo de respuesta ante las precipitaciones fue mínimo y el aumento de humedad en magnitud fue muy similar.

Para el tercer modelo se presentó una inversión en los errores calculados, las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros evidenciaron un mayor error que la profundidad de 10 centímetros, situación contraria a lo obtenido en los modelos 1 y 2. Esto se debe a que las lluvias presentadas no reflejaron el mismo efecto en los sensores que en el modelo, lo cual se puede evidenciar en la Figura 36 b), c) y d), en donde las humedades simuladas son mayores que las medidas. En este modelo las humedades en promedio fueron mayores con respecto a los dos modelos anteriores. La tendencia fue principalmente de aumento en la humedad para las 4 profundidades presentadas.

Para 10 centímetros se obtuvo el menor de los errores para este modelo número 3, los errores fueron de $0,029 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 3,672% con el *MAPE* y $0,021 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. Se presentó un desfase en el tiempo en el cual se alcanzó la saturación de aproximadamente 3 días entre la humedad simulada y la humedad media a esta profundidad, esta situación pudo presentarse a una anomalía en el tiempo de respuesta de los sensores.

Para 20 centímetros se obtuvo el máximo de los errores entre todos los modelos, los errores fueron de $0,049 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 7,081% con el *MAPE* y $0,037 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. El aumento de humedad producto de las lluvias no fue en magnitud el esperado para los registros medidos por los sensores.

Para las profundidades de 30 y 40 centímetros dentro del perfil de suelo, en este tercer modelo se apreció variaciones significativas en la humedad. El rango de humedad para 30 centímetros fue de $0,018 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y a 40 centímetros fue de $0,011 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Para estas profundidades se observaron fluctuaciones en el perfil de humedades simuladas, situación que no se registró en los dos primeros modelos. Se evidencia cierto desfase entre ambas humedades (simuladas y medidas) siendo levemente mayores las humedades simuladas para ambas profundidades. Los errores fueron de $0,036 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 4,937% con el *MAPE* y $0,027 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE* para 30 centímetros, mientras que para 40 centímetros se obtuvo $0,038 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 5,357% y $0,029 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente.

Analizando el cuarto modelo se observa que, para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros se presentaron desviaciones entre el modelo y las humedades medidas, disminuyendo para los últimos 5 días. Sin embargo, las tendencias son aceptables. Para 10 centímetros se obtuvieron los valores más cercanos para este modelo. Todo esto se ve reflejado en los errores obtenidos que se presentan en la Figura 41, Figura 42 y Figura 43.

Las desviaciones obtenidas a 10 centímetros fueron de $0,035 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 4,793% con el *MAPE* y $0,027 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. En este modelo se obtuvieron las mayores fluctuaciones tanto de humedades medidas como simuladas, esto como resultado del gran acumulado de lluvias registrado. A esta profundidad se obtuvieron los mejores resultados para los primeros 20 días.

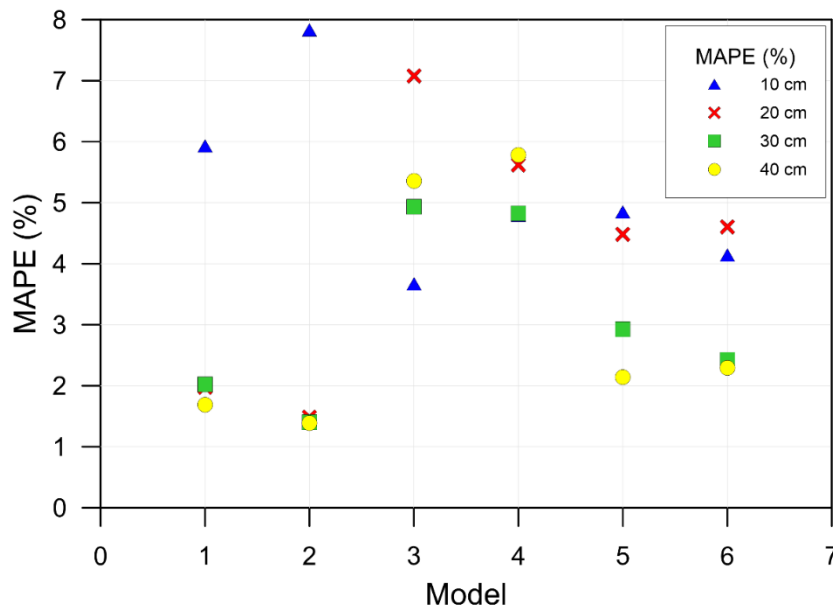


Figura 42 MAPE para cada modelo.

Para 20 centímetros los errores fueron de $0,040 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $5,624\%$ con el *MAPE* y $0,029 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*. Entre los días 10 y 15 de este modelo los valores de humedad simulados fueron cercanos a la saturación. Las grandes lluvias en magnitud y duración provocaron que la humedad aumentara de $0,56 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en el día 7 hasta $0,596 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en cuestión de 5 días.

Para 30 centímetros los errores fueron de $0,036 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $4,828\%$ con el *MAPE* y $0,026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*, mientras que para 40 centímetros se obtuvo $0,042 \text{ m}^3/\text{m}^3$, $5,782\%$ y $0,031 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente. Una particularidad para este modelo y principalmente para estas profundidades, es que la humedad la mayor parte del tiempo aumento o por lo menos permaneció constante, como se puede observar en la Figura 37 c) y d). El motivo de esto está asociado a que durante este periodo de tiempo se registró la media más baja de radiación solar dentro de todos los modelos como se observa en la Tabla 10; lo cual disminuyó la energía calórica en la superficie del suelo y así se mitigaron los procesos de transferencia de masa y calor y por lo tanto la cantidad de agua líquida que se transformó en vapor fue mínima. Esta formulación concuerda con la tasa de evaporación más baja obtenida dentro de todos los modelos la cual se presenta en la Tabla 11.

El análisis que se puede hacer al respecto del quinto modelo, en el cual no se obtuvieron los mayores errores, pero si se obtuvieron las peores tendencias dentro de todos los modelos, es que en el modelo previo se ingresó como variable atmosférica una precipitación de 182,7 milímetros y en el quinto modelo 121,5 milímetros como se observa en la Tabla 10, las dos máximas acumuladas. Dichas condiciones atmosféricas generaron un efecto de anomalía en la humedad registrada por los sensores, debido a que no se asimiló de la mejor manera los 30,42 centímetros de columna de agua.

Para 10 centímetros se evidenció un gran rango de variación para ambas humedades, el rango de la humedad simulada fue de $0,104 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el de humedades medidas fue de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^3$, sin embargo, existe una gran diferencia de tiempo entre los máximos, mínimos y en general de las tendencias entre la una y la otra. En este modelo la mejor aproximación obtenida se dio entre los días 19 y 21 en donde se replicó de muy buena manera los efectos de la mayor lluvia del mes de 13 milímetros. Los errores fueron de $0,035 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 4,850% con el *MAPE* y $0,026 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*.

Las tendencias a 20, 30 y 40 centímetros son similares, en este modelo todas las lluvias generaron un efecto visible en el aumento de humedad; con la diferencia que dicho efecto se disipó en profundidad, generando menos fluctuaciones a mayor profundidad. Para este modelo donde se registró la segunda tasa de evaporación más baja, se puede apreciar que en algunos periodos de tiempo la pendiente negativa en el contenido de humedad, la cual indica disminución de la misma si es apreciable a simple vista, situación diferente al modelo número 4. Los errores a 20 centímetros fueron de $0,039 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 4,485% con el *MAPE* y $0,023 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*.

Para 30 centímetros los errores fueron de $0,027 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, 2,929% con el *MAPE* y $0,016 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*, mientras que para 40 centímetros se obtuvo $0,019 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 2,141% y $0,012 \text{ m}^3/\text{m}^3$ respectivamente.

Para el último modelo realizado se obtuvieron mejores resultados comparados con los dos modelos previos, un motivo de esto puede ser el hecho de que en este

periodo de tiempo se obtuvo el menor mínimo acumulado de lluvias, lo cual ayudo a estabilizar las condiciones hidráulicas de los sensores y el suelo.

Para una profundidad de 10 centímetros se obtuvo una mejor correlación entre humedades los últimos 15 días del modelo, situación contraria ocurrió para las otras 3 profundidades. A esta profundidad los procesos más evidentes que sufrió el suelo fueron los de secado como se observa en la Figura 39 a), una vez más el rango de humedad fue amplio, con un valor de $0,103 \text{ m}^3/\text{m}^3$; los errores para esta profundidad en este modelo fueron de los más bajos con valores de $0,032 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $4,143\%$ con el *MAPE* y $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*.

Para 20 centímetros de profundidad las fluctuaciones de ambas humedades son similares en intensidad y frecuencia, siendo mejores las tendencias a partir del día 10 en adelante. Los errores fueron de $0,032 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *RMSE*, $4,607\%$ con el *MAPE* y $0,025 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por medio del *MAE*.

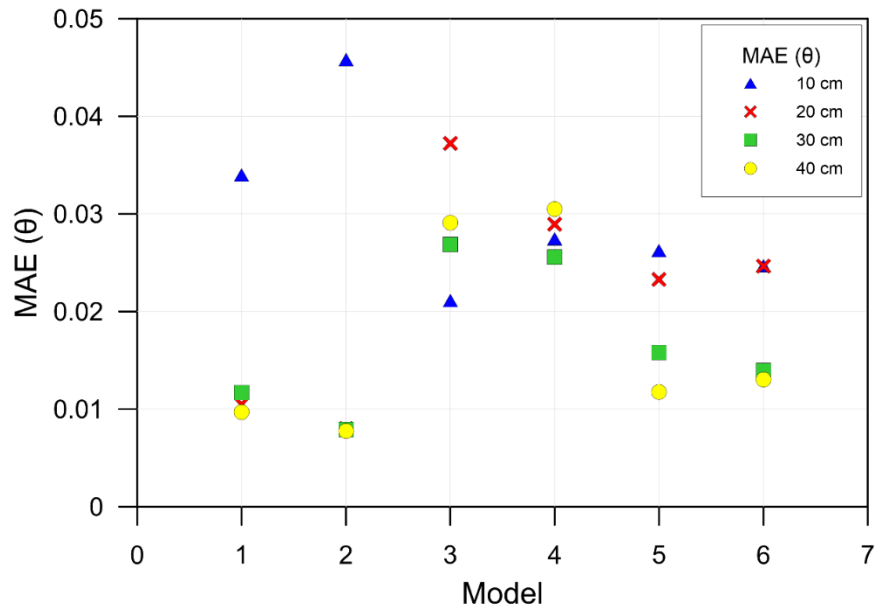


Figura 43 MAE para cada modelo.

Para las profundidades de 30 y 40 centímetros no se encontró mayor variación en el perfil de humedad, situación similar a la encontrada para los dos primeros modelos. Esta situación está relacionada con la compensación entre el efecto de la precipitación y las tasas de evaporación, en donde no se produce flujo de agua tanto ascendente como descendente es mínimo. Para 30 centímetros los errores fueron

de 0,018 m³/m³ por medio del *RMSE*, 2,423% con el *MAPE* y 0,014 m³/m³ por medio del *MAE*, mientras que para 40 centímetros se obtuvo 0,018 m³/m³, 2,290% y 0,013 m³/m³ respectivamente.

Por último, se presenta en la Tabla 14 un resumen con los valores máximos y mínimos de humedad alcanzada para las 4 profundidades analizadas por cada modelo. Se puede observar que las menores humedades se obtuvieron para los meses con mayores tasas de evaporación y menor precipitación.

Tabla 14 Máximos y mínimos contenidos volumétricos de agua θ encontrados.

#	10 cm		20 cm		30 cm		40 cm	
	Max. θ	Min. θ	Max. θ	Min. θ	Max. θ	Min. θ	Max. θ	Min. θ
1	0,578	0,479	0,5615	0,527	0,570	0,553	0,579	0,569
2	0,585	0,484	0,567	0,531	0,574	0,556	0,581	0,570
3	0,600	0,517	0,567	0,532	0,574	0,556	0,581	0,570
4	0,598	0,508	0,596	0,543	0,596	0,563	0,596	0,570
5	0,600	0,496	0,596	0,526	0,592	0,541	0,587	0,548
6	0,600	0,497	0,595	0,539	0,590	0,561	0,585	0,575

5.2 Análisis a partir de la dispersión

En la Figura 44 se presenta una gráfica que permite estimar que cantidad de humedades simuladas sobrestiman o subestiman las húmedas medidas en campo para cada profundidad. En el eje de las abscisas se presentan las humedades medidas y en el eje de las ordenadas las humedades simuladas, ambas para el mismo instante de tiempo t . Al trazar una línea a 45° de inclinación es posible determinar cuándo las humedades simuladas presentaron un valor inferior al medido al quedar en el cuadrante inferior derecho de dicha línea, mientras que una humedad simulada mayor que la simulada estará ubicada en el cuadrante superior izquierdo.

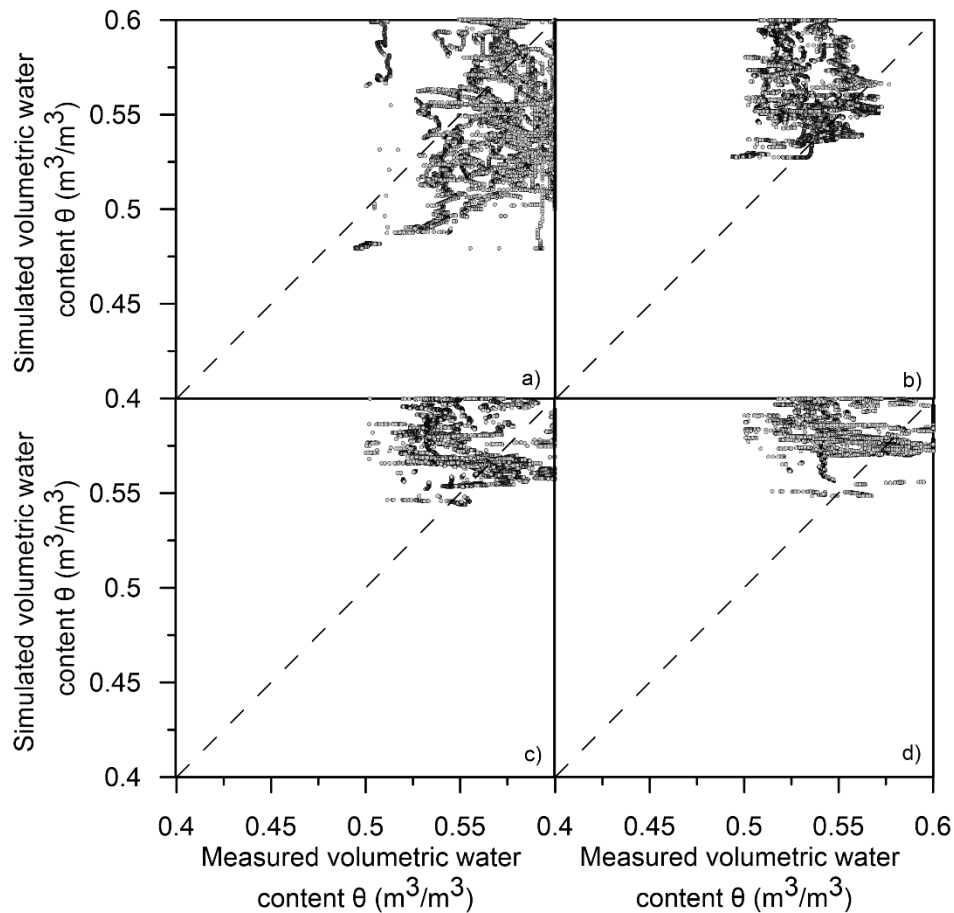


Figura 44 Dispersión entre humedades medidas y simuladas.

Para los datos de la profundidad de 10 centímetros mostrada en la Figura 44 a) se observa que la mayor cantidad de puntos se encuentran en la parte inferior derecha de la gráfica, lo cual indica que las humedades medidas fueron mayores a las simuladas, por tanto los modelos subestimaron la situación presentada en campo para dicha profundidad.

Para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros presentadas en la Figura 44 b), c) y d) se observa que el modelo sobreestimo las humedades, ya que la mayoría de puntos se encuentran ubicado por debajo de la línea a 45°.

Una explicación que explica por qué para una profundidad de 10 centímetros es el único nodo donde se subestimaron las humedades puede deberse a que allí se tiene más proximidad de la condición de frontera superior, por lo cual dichos cambios

producto de la interacción suelo-atmósfera pueden generar cambios diferentes en la humedad comparado con las otras profundidades.

Capítulo VI Conclusiones

- En general para todo el periodo de tiempo del modelo se evidencio que existe un desfase de tiempo entre la ocurrencia de una precipitación y el tiempo en el cual dicha cantidad de agua es asimilada por el suelo.
- Para mayor profundidad el tiempo que le toma al agua en superficie causar un efecto de aumento en la humedad es mayor. Se encontró que para menor magnitud de lluvia el tiempo el cual le toma al suelo asimilar dicha cantidad de agua y aumentar su humedad también es menor, es decir, el tiempo de infiltración es inversamente proporcional a la magnitud de la lluvia; también el aumento de humedad es menor cuando la lluvia es leve y también el aumento en la humedad es menor a mayor profundidad.
- Las humedades más bajas se obtuvieron para los primeros días del modelo, en dicho periodo no se presentó el menor acumulado de lluvias, el mes con menor acumulado de agua producto de precipitaciones se obtuvo en los últimos 30 días del modelo. Esta condición indica la influencia de las demás variables atmosféricas como lo son la humedad relativa, temperatura, radiación solar y velocidad del viento en los procesos acoplados de transferencia de masa y calor, dichas condiciones provocaron que la condición de menor saturación del suelo no se presentara necesariamente en el mes con menor precipitación.
- El efecto de histéresis y la complejidad de los procesos de infiltración y/o evaporación ocasionan que las mismas condiciones atmosféricas en dos tiempos diferentes no produzcan el mismo efecto de humedecimiento o secado, debido a que el flujo de agua o vapor de agua del suelo está condicionado por el potencial de succión que el suelo desarrolla en ese instante de tiempo.

- Existe una incertidumbre en la permeabilidad saturada adoptada, ya que esta se obtuvo a partir de un ensayo de laboratorio y esta propiedad física puede variar para la condición real que se tiene en campo. Esta situación puede generar desviaciones entre las medidas registradas con sensores y las predicciones de los modelos.
- Para una profundidad de 10 centímetros el modelo subestima la humedad presentada en campo, mientras que, para las profundidades de 20, 30 y 40 centímetros el modelo subestima las humedades; esto puede ser el resultado de la condición de borde inferior, la cual no representa de la mejor manera la situación real en campo.
- Esta investigación puede ser la base para futuras investigaciones con un enfoque de interacción suelo-atmosfera, en donde esta dinámica juega un papel fundamental como por ejemplo en el campo de la agricultura, control de inundaciones, sistemas urbanos de drenajes sostenibles SUDS, entre otros.

Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2016). El suelo y el cambio climático — Agencia Europea de Medio Ambiente. Retrieved November 9, 2017, from <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico>
- An, N., Hemmati, S., & Cui, Y. (2017). Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations in an embankment due to soil-atmosphere interaction. *Computers and Geotechnics*, 83(January), 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.010>
- Andes, U. de los, & Ingeominas. (1997). *Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá*.
- Blight, G. (2009). Solar heating of the soil and evaporation from a soil surface. *Géotechnique*, 59(4), 355–363. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.4.355>
- Blight, G. (2013). *Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15239>
- Blight, G. E. (1997). The Rankine Lecture. *Géotechnique*, 47(4), 713–767. <https://doi.org/10.1680/geot.1997.47.4.713>
- Bogotá - Secretaria distrital de ambiente, G. (2013). Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y parámetros medidos en cada una de ellas. Retrieved from <http://ambientebogota.gov.co/estaciones-rmcab>
- Bornhofen, E., Benin, G., Galvan, D., & Flores, M. F. (2015). Épocas De Semeadura E Desempenho Qualitativo De Sementes De Soja. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 45(1), 46–55. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529143>
- Bowen, I. S. (1926). The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. *Physical Review*, 27(6), 779–787. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.27.779>
- Bras R., Entekhabi D., R.-I. I. (1992). entekhabi1992.pdf. *Journal of Climate*, 5, 15.
- Breemen, N. van., & Buurman, P. (2002). *Soil formation*. Kluwer Academic.
- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic Properties of porous media, 37. <https://doi.org/citeulike-article-id:711012>
- Cordero, J., Cuadrado, A., Prat, P., & Ledesma, A. (2016). Description of a field test involving cracking in a drying soil. *E3S Web of Conferences*, 9, 12005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160912005>
- Cui, Y. J., Gao, Y. B., & Ferber, V. (2010). Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data. *Engineering Geology*, 114(3–4), 456–471. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.006>

- Dalton, J. (1802). Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat. In *Proceedings of Manchester Literary and Philosophical Society* (p. 535–602.).
- Delage, P., Riffard, M., Lu, Y. F., & Cui, Y. J. (2005). Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground–atmospheric interactions. *Geotechnique*, 55(7), 557–567. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.7.557>
- ESCOBAR, C. G., GONZÁLEZ MARANTES, L., PUERTO, G., & LINDON, L. (2010). Clasificado Fondo De Prevención Y Atención De Emergencia, 49. Retrieved from http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Suelo_Bogota/Zonificacion_Respuesta_Sismica-FOPAE-2010.pdf
- Fang, H.-Y., & Daniels, J. (2006). *Introductory geotechnical engineering : an environmental perspective*. Taylor & Francis.
- FAO. (1986). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements.. Retrieved November 9, 2017, from <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm>
- Francisco, D., & Jaramillo, J. (2002). CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL HORIZONTE SUPERFICIAL DE UN ANDISOL HIDROMÓRFICO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO (COLOMBIA). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 35 (134): 23-33. 2011. ISSN 0370-3908. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v35n134/v35n134a03.pdf>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley.
- Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3), 521–532. Retrieved from <https://www.soilvision.com/downloads/docs/pdf/research/cangeopredict.pdf>
- Genuchten, V. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Gutiérrez Rodríguez María Elena. (2009). *Influencia de la temperatura y de la humedad en la dinámica de la materia orgánica de los suelos de Galicia y su relación con el cambio climático*. Santiago de Compostela. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=qN3FTKo79toC&pg=PP2&lpg=PP2&dq=Gutiérrez+Rodríguez+María+Elena,+2009&source=bl&ots=FwRCEufwm7&sig=zTEI0Yc5o8vQPP-OSUSPH5UKSQ0&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjfjorXybHXAhUDMyYKHcgzBwgQ6AEIJTAA#v=onepage&q=Guti%25C3%25>
- IDEAM. (2006). Manual Del Medio Ambiente en Colombia IDEAM. Retrieved November 9, 2017, from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap7.pdf>
- IDEAM. (2010). Cambio climático en Colombia. Retrieved November 9, 2017, from <http://www.ideam.gov.co/>

- Instituto de Hidrología, M. y E. A. I. F. F. de P. y A. de E. (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Retrieved from http://www.ghbook.ir/index.php?name=های رسانه و فرهنگ&option=com_dbook&task=readonline&book_id=13650&page=73&chckhashk=ED9C9491B4&Itemid=218&lang=fa&tmpl=component
- IPCC. (2014). CAMBIO CLIMÁTICO 2014. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Jeppson, R. W. (1974). Steady Flow Analysis of Pipe Networks: An Instructional Manual STEADY FLOW ANALYSIS OF PIPE NETWORKS- An Instructional Manual. *Reports. Paper, 300*(January). Retrieved from https://digitalcommons.usu.edu/water_rep
- Lozada, C., Caicedo, B., & Thorel, L. (2016). Improved climatic chamber for desiccation simulation, *13002*, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160913002>
- Lu, N., & Khorshidi, M. (2015). Mechanisms for Soil-Water Retention and Hysteresis at High Suction Range. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(8), 1–10.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., Whetton, P., ... Whetton, P. (2000). Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change *. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *81*(3), 427–436. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0427:TIEWAC>2.3.CO;2)
- Meteorologia en red | El tiempo. (2017). Retrieved September 11, 2017, from <https://www.meteorologiaenred.com/>
- Montzka, C., Moradkhani, H., Weihermüller, L., Franssen, H. J. H., Canty, M., & Vereecken, H. (2011). Hydraulic parameter estimation by remotely-sensed top soil moisture observations with the particle filter. *Journal of Hydrology*, *399*(3–4), 410–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.020>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conduc. *Water Resources Research*, *12*(3), 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Narváez-Bravo, G., & León-Arístizabal, G. (2001). Caracterización Y Zonificación Climática De La Región Andina. *Meteorología Colombiana*, (4), 121–126.
- Nocilla, A., Grossi, G., & Ponzoni, E. (2016). Influence of the Soil-atmosphere Interaction on the Collapse of Sand in the Valle dei Templi in Agrigento. *Procedia Engineering*, *158*, 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.460>
- Penman, H. . (1948). Natural Evaporation form Open Water, Bare Soil and Grass. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* (Vol. 193, pp. 120–145). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rajeev, P., Chan, D., & Kodikara, J. (2012). Ground–atmosphere interaction modelling for long-term prediction of soil moisture and temperature. *Canadian Geotechnical*

- Journal*, 49(9), 1059–1073. <https://doi.org/10.1139/t2012-068>
- Richards, L. A. (1931). MEDIUMS, 318. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Sartori, E. (2000). A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Solar Energy*, 68(1), 77–89. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00054-7)
- Sheng, D. (2011). Computers and Geotechnics Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour. *Computers and Geotechnics*, 38(6), 757–776. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.05.002>
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., & van Genuchten, M. T. (2013). Hydrus-1D Version 4.17 June 2013.
- Tarantino, A., Gallipoli, D., Jommi, C., Mendes, J., Capotosto, A., Amabile, A., ... Boeck, F. (2016). Advances in the monitoring of geo-structure subjected to climate loading. *E3S Web of Conferences*, 9, 4001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160904001>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Turc, L. (1954). Turc, L., 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la precipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491 -569., 1954.
- UNAM - C. Ciencias de la Atmosfera, 1. (2012). Cuan importante es conocer el estado del suelo para simular el Clima.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Vanapalli, Fredlund Model for the prediction.pdf. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 14.
- Vanapalli, S., & Mohamed, F. (2007). Bearing capacity of model footings in unsaturated soils. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, 1–11.
- Vesga, L. F., Caicedo, B., & Mesa, L. (2003). Deep Cracking in Sabana de Bogotá Clay. In *XII Pan American Congress on Soil Mechanics, Soil and Rock*.
- Victoria Elena Meza Ochoa-Fabián Hoyos Patiño. (2012). Influencia de la succión matricial en el cambio de volumen de un suelo proveniente de un depósito aluvial del Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (64), 104–114. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302012000300010
- Wang, Z. F., Shen, S. L., Ho, C. E., & Kim, Y. H. (2013). Investigation of field-installation effects of horizontal twin-jet grouting in Shanghai soft soil deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(3), 288–297. <https://doi.org/10.1139/cgj-2012-0199>
- Warren Murcotte Forsythe. (1985). *Física de suelos - Warren Murcotte Forsythe - Google Libros*. (IICA, Ed.). Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Física_de_suelos.html?id=Q2fQnQEACAAJ&redir_esc=y

Wilson, G. W. (1990). Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems, 489.

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>

Xing, X., Wang, H., & Ma, X. (2018). Brooks-Corey modeling by one-dimensional vertical infiltration method. *Water (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050593>