

Estudio del fenómeno de la sequía en el comportamiento de los suelos arcillosos, utilizando una cámara de simulación climática

Study of the effects of drought on the behavior of clay soils using a climatic chamber

CATALINA LOZADA

Profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

catalina.lozada@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/11/2016 Aceptado: 23/03/2017

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Para modelar el proceso de desecación en capas de suelo arcilloso se construyó una cámara de simulación climática, la cual permite hacer la medición de las variables climáticas. En este artículo se presentan ensayos de evaporación realizados en agua y en suelo para diferentes condiciones climáticas, similares a las encontradas en la sabana de Bogotá. El suelo se preparó a partir de un estado líquido y posteriormente se secó, controlando la temperatura, la radiación infrarroja, la velocidad del viento y la humedad relativa. En la primera parte de este artículo se muestra el impacto del cambio climático en la sequía y se describe el proceso de evaporación potencial y real. Adicionalmente, se describen el proceso de formación de fisuras y la revisión de los equipos existentes que simulan el proceso de evaporación en el laboratorio. En la segunda parte se detallan la cámara de simulación climática, los rangos de operación y los principios de operación teóricos. Finalmente, se presentan los resultados experimentales para el proceso de desecación en agua y en suelo. Como resultado, se evidencia que los ensayos de desecación realizados en la cámara climática permiten simular todas las variables climáticas de una manera muy precisa y acoplada. Los resultados experimentales indican que la tasa de evaporación aumenta con la radiación infrarroja en el suelo y en el agua. La tasa de evaporación al principio de los ensayos de desecación es la misma que en los ensayos en agua. Sin embargo, esta tasa disminuye a medida que el agua se evapora.

Palabras claves: evaporación, clima, arcilla, fisuras, sabana de Bogotá.

Abstract

A climatic chamber was designed for modeling desiccation in soil layers. This chamber allows the measurement of different environmental variables. In this paper, evaporation tests were conducted in water imposing boundary conditions like the ones on the Savannah of Bogota, and then these tests were performed in a soil layer. The soil was prepared from a slurry state and was dried controlling temperature, infrared radiation, wind velocity, and relative humidity. In the first part of this paper, the impact of climate change and the process of potential and actual evaporation is described, then the process of formation of desiccation cracks and different devices for desiccation simulation are presented. The second part of this paper describes the climatic chamber, the operation ranges and theoretical work principles. Finally, the experimental results for desiccation in water and soil are presented. The desiccation tests performed with the climatic chamber allow simulating all environmental conditions accurately during drying coupling the effect of all variables. As a result, the evaporation rate increases with infrared radiation in soil and water. The evaporation rate at the beginning of the desiccation tests in clays is the same as in water. However, this evaporation rate decreases as the soil becomes desiccated.

Keywords: evaporation, climate, clay, cracks, Savannah of Bogotá.

INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los eventos naturales extremos que, según se pronostica, se incrementarán en diferentes lugares del mundo como resultado del calentamiento global. Durante el fenómeno de la sequía, el agua se evapora de los poros del suelo y el suelo se contrae. El proceso contrario ocurre durante los periodos de lluvia, el contenido de humedad aumenta y el suelo se expande. Estos cambios de volumen generan gran afectación en las estructuras geotécnicas y en las vías. Por lo tanto, el estudio de la interacción entre las variables climáticas y el suelo durante los procesos de evaporación potencial (EP) y de evaporación real (ER) es crítico para entender el comportamiento de las estructuras geotécnicas sometidas a estos fenómenos climáticos.

La evaporación potencial está definida como la evaporación que ocurre cuando la fuente de agua está disponible en la superficie. La EP depende de las variables ambientales, como la velocidad del viento, la humedad relativa, la temperatura y la radiación solar. La evaporación real se define como la evaporación que ocurre cuando la fuente de agua no es ilimitada en la superficie del suelo. Los mecanismos que afectan la ER incluyen las mismas variables que la evaporación potencial y, adicionalmente, las restricciones mecánicas asociadas con la succión del suelo.

La evaporación del agua desde la superficie del suelo puede generar fisuras. Estas fisuras pueden variar de tamaño y de características geométricas, dependiendo de las propiedades intrínsecas y de las condiciones de frontera. Se han encontrado fisuras de desecación muy grandes en diversas partes del mundo (Arizona, Estados Unidos; Nextipac, México, y la sabana de Bogotá, Colombia). Estas fisuras producen daños en las vías y en estructuras de cimentación. Debido a lo anterior, el estudio de la interacción suelo-atmósfera y el comportamiento mecánico del suelo con fisuras generadas por la sequía son fundamentales para entender el comportamiento del suelo y para mejorar el diseño de cimentaciones en estos suelos.

El presente artículo está dividido en dos partes principales:

- Primero se hace una revisión bibliográfica sobre el efecto del cambio climático y los factores ambientales que afectan la sequía, se describe el proceso de evaporación potencial y real, y se presentan casos

reales de suelos con formación de fisuras de desecación muy grandes (especialmente, se describen las fisuras encontradas en la sabana de Bogotá).

- En la segunda parte del artículo se describen los equipos de laboratorio existentes que permiten simular la interacción suelo-clima, y se detalla una cámara de simulación climática construida para acoplar todas las variables climáticas y estudiar el proceso de evaporación. Finalmente, se presentan los resultados experimentales de evaporación potencial y real, las conclusiones generales y el trabajo futuro.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA

La superficie de la Tierra y la atmósfera han aumentado su temperatura durante las últimas décadas, los niveles del mar se han incrementado, y el total de nieve y hielo ha disminuido (IPCC, 2014). Las tres últimas décadas en el periodo de 1983 a 2012 han sido las más calientes desde 1850 y el aumento de la temperatura global, incluyendo la Tierra y el océano, muestra una tendencia lineal de 0,85 °C desde 1880 hasta el 2012. Los cambios observados en el clima global son una consecuencia directa de las actividades humanas que involucran la emisión de gases de efecto invernadero.

La Revolución Industrial permitió el crecimiento económico y de población, haciendo las sociedades industrializadas y urbanas. Después de la era industrial, la concentración histórica de los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (NH₄) y el óxido nitroso (NO₂), han alcanzado niveles máximos con respecto a los últimos 800.000 años. Varios estudios revelan que el dióxido de carbono fue el mayor único contribuyente al cambio climático entre 1750 y 2011 (IPCC, 2014).

Las emisiones globales de CO₂ provienen de los combustibles fósiles, la producción de cemento, la quema de gases, la deforestación y el cambio en el uso de la Tierra. Cerca de la mitad de las emisiones antropogénicas de CO₂ entre 1750 y 2011 ocurrieron en los últimos 40 años. Cerca del 40 % de estas emisiones permanecen en la atmósfera, 30 % fueron removidas de la atmósfera y se sumieron en el océano, y el resto de emisiones están almacenadas en reservorios naturales del ciclo del carbono. A pesar de las políticas para reducir el calentamiento global, las emisiones totales anuales de dióxido de carbono continúan en aumento

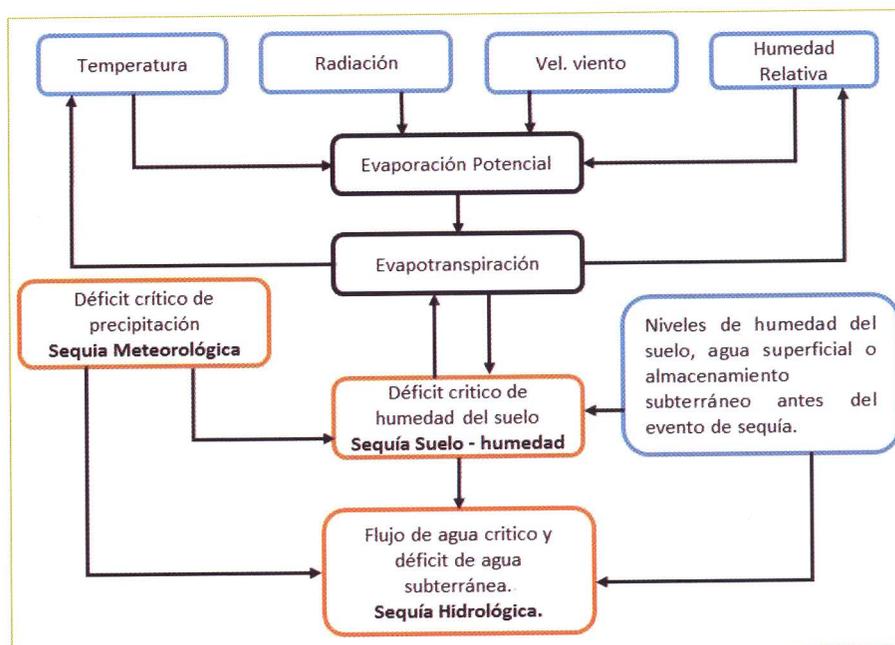


Figura 1. Factores que influyen en la desecación. Adaptada de Seneviratne et al. (2012).

(Cook et al., 2013; Doran & Zimmerman, 2009; IPCC, 2014; Oreskes, 2004).

Diferentes impactos se han atribuido al cambio climático y pueden evidenciarse en eventos climáticos y meteorológicos extremos. Estos eventos son olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales. Los principales impactos incluyen la alteración de los ecosistemas, la interrupción de la producción de alimentos, el almacenamiento de agua, los daños en la infraestructura, los asentamientos diferenciales, la morbilidad, la mortalidad y las consecuencias en la salud humana (Gill et al., 2007).

Específicamente, la sequía es uno de los eventos extremos que al parecer aumentarán en los próximos años en diferentes partes del mundo. Como se muestra en la figura anterior (figura 1), la sequía es un fenómeno complejo, el cual depende principalmente de la precipitación y de otras variables, como la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar (Seneviratne et al., 2012; Sheffield et al., 2012). La sequía es afectada también por el contenido de humedad del suelo y las condiciones de la superficie, como la presencia de vegetación.

Dependiendo de las condiciones ambientales y de frontera, la sequía se puede clasificar en tres clases: meteorológica, agrícola e hidrológica. La sequía meteorológica es producida por un déficit crítico de precipitación,

la sequía agrícola es causada por un déficit de humedad del suelo y la sequía hidrológica es ocasionada por un déficit de agua subterránea y de escorrentía superficial (IPCC, 2014).

Al finalizar el siglo XXI, se espera que como consecuencia de la disminución de la precipitación y el aumento de la evaporación, las sequías meteorológicas y agrícolas tengan periodos más largos y frecuentes en algunas regiones y estaciones. Sin embargo, en la modelación del cambio climático hay mucha incertidumbre en la afirmación de reducciones sustanciales en el flujo de ríos, lagos y niveles de agua subterránea debidos al déficit de lluvia y al contenido de humedad del suelo.

EVAPORACIÓN POTENCIAL Y EVAPORACIÓN REAL

El estudio de la sequía requiere el entendimiento de los mecanismos que afectan la evaporación real en el suelo. Estos mecanismos son complejos e involucran procesos de transferencia de calor y de masa, fuera de las restricciones mecánicas asociadas con la succión del suelo. Por lo tanto, para entender estos mecanismos que afectan la evaporación real en el suelo, primero es necesario estudiar el proceso de evaporación del agua o la evaporación potencial.

La transferencia de calor a través de la interfase aire-agua está dada por diferentes procesos de transferencia de calor: radiación (q_{rad}), emisión térmica (q_{th}), convección (q_{conv}) y evaporación (q_{evap}) (figura 2).

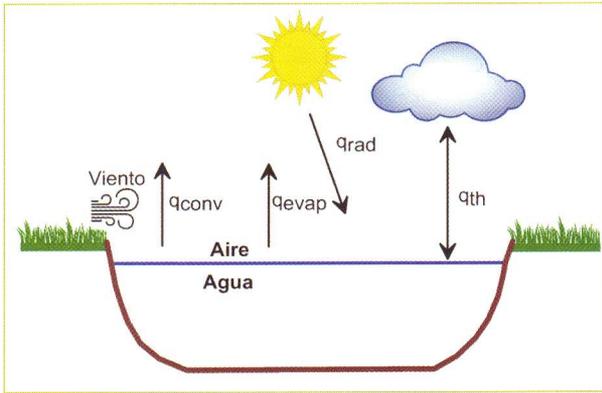


Figura 2. Intercambio de calor a través de la interfase aire-agua.

El flujo de calor sensible (q_{sens}) se define en la ecuación 1 e involucra todos los mecanismos de transferencia de calor. El flujo de calor sensible se obtiene cuando el agua está en equilibrio con las variables ambientales en estado estable.

$$q_{sens} = q_{rad} + q_{th} + q_{conv} + q_{evap} \quad (1)$$

Entre los mecanismos de transferencia de calor, es de especial interés el estudio de la transferencia de calor por evaporación (q_{evap}). La evaporación se define como el cambio de fase de un líquido saturado a vapor saturado.

Dalton (1802) estableció la ecuación 2 para calcular la evaporación potencial. Esta ecuación indica que la tasa de evaporación depende de la diferencia entre la presión de saturación de vapor de la superficie evaporante y la presión de vapor del aire sobre la superficie, diferencia conocida como el déficit de presión de vapor (DPV). Esta relación es afectada por una función que indica la tasa a la cual el viento se lleva las moléculas de agua evaporada.

$$\frac{dm}{dt} = f(V_w)(\bar{u}_v - \bar{u}_{vo}) \quad (2)$$

Donde: \bar{u}_{vo} es la presión de saturación a la temperatura de la superficie del agua, \bar{u}_v es la presión de vapor del aire, y $f(V_w)$ es una función de la velocidad del viento, V_w .

Una de las principales limitaciones de la ecuación de Dalton es que se requiere el conocimiento de la temperatura de la superficie del agua para determinar \bar{u}_{vo} . Para solucionar esta limitación, aproximaciones como la de Penman (1948) y la relación de Bowen combinan diferentes ecuaciones físicas y empíricas para obtener la evaporación potencial. Actualmente, la ecuación de Penman se emplea ampliamente para calcular la evaporación de superficies de agua. Sin embargo, debido a que la ecuación es empírica, se requieren muchas constantes. Además, el efecto de la velocidad del viento no está validado experimentalmente (Blight, 2002).

Debido a lo anterior, es necesario estudiar la evaporación potencial antes de estudiar el proceso de evaporación real. Para lograr este objetivo se construyó una cámara climática, en la que se simulaban las variables climáticas: la velocidad del viento, la temperatura, la radiación y la humedad relativa. Los detalles de la construcción y de la operación de la cámara se presentan en los siguientes apartes de este artículo.

Por otra parte, el proceso de evaporación real en estratos de suelo es un proceso físico muy complejo, en el cual ecuaciones diferenciales parciales de flujo de calor y de humedad se deben resolver en forma simultánea. La evaporación real es la misma que la evaporación potencial si el suelo está completamente saturado en la superficie. A medida que la evaporación continúa, la disminución del contenido de humedad produce un aumento en la succión del suelo. La succión ocurre cuando hay un equilibrio de la presión de vapor en el suelo y es controlada principalmente por su estructura. Por lo tanto, la variable mecánica que limita el proceso de evaporación real es la succión (Gitirana et al., 2006; Wilson et al., 1994).

FISURAS DE DESECACIÓN

La desecación en el suelo genera un menisco de agua en la superficie y, como consecuencia, fuerzas capilares. La teoría más común de formación de fisuras indica que a medida que el agua se evapora, las fuerzas capilares permiten el aumento de los esfuerzos de tensión en el suelo. Una vez que estos esfuerzos sobrepasan la resistencia a la tensión en el suelo, se inician las fisuras (Kodikara et al., 2004). Estas fisuras usualmente se crean en las zonas más débiles del suelo, donde la resistencia es menor.



Figura 3. Diferentes geometrías de fisuras de desecación encontradas en Colombia: a) Lago Calima, 19 de abril de 2013. Tomado de elpais.com. b) Parque Salamanca, 2014. Tomado de eltiempo.com. c) Puerto menor de Barrancabermeja, 20 de junio de 2012. Tomado de vanguardia.com. d) Casanare, 2 de abril de 2014. Tomado de Colprensa.

Las fotos en las que se muestran diferentes geometrías de fisuras se tomaron en Colombia entre el 2012 y el 2015, cuando varias sequías extremas ocurrieron durante el fenómeno del Niño (figura 3). La formación de fisuras y su estructura geométrica dependen de las características intrínsecas del suelo y de las condiciones de frontera (Corte & Higashi, 1964).

Las condiciones intrínsecas incluyen el contenido de finos, el índice de plasticidad, la mineralogía, el contenido de humedad inicial, la resistencia a la tracción y la densidad seca. Entre las condiciones de frontera relevantes se incluyen: la rugosidad del material de base del suelo, el gradiente de temperatura, la humedad, el espesor de la capa de suelo, la velocidad del viento, el tamaño de la muestra, la radiación y los ciclos hidráulicos de humedecimiento y de secado.

En varias partes del mundo se han identificado fisuras de desecación muy grandes (varios metros de profundidad y de longitud). Entre estos lugares se encuentran Arizona, Estados Unidos (Harris, 2004; Shin & Santamarina, 2011); Nextipac, México (Suárez-Plascencia et al., 2005), y la sabana de Bogotá, Colombia (Vesga et al., 2003). El mecanismo de formación de estas fisuras es muy complejo y depende de las condiciones geológicas, de las condiciones del agua subterránea y del proceso de desecación en la superficie. Debido a sus dimensiones, estas fisuras afectan la estabilidad de cimentaciones superficiales y de vías.

Igualmente, se pueden observar imágenes satelitales tomadas de Google Earth, en las que se evidencian fisuras de desecación muy grandes en el municipio de Tenjo, situado en la sabana de Bogotá (figura 4). Estas imágenes permiten diferenciar dos tipos de fisuras:

Fisuras aisladas, que tienen longitudes mayores de 145 m en algunos lugares. Estas fisuras pueden encontrarse también cerca de árboles en los que las raíces absorben el agua durante los periodos de sequía, produciendo una contracción del suelo. Estas fisuras se encuentran alineadas en una dirección pero no interconectadas (figura 4a).

En otros lugares, las fisuras se interconectan, creando arreglos de fisuras. Las celdas creadas por la interconexión varían de tamaño (figura 4b).

Una consecuencia de las fisuras de la sabana de Bogotá es la inestabilidad de muchas construcciones. En el tanque que aparece en la página siguiente es posible ver un ejemplo de asentamiento diferencial (figura 5). Adicionalmente, vías principales resultan bastante dañadas debido a la contracción severa del suelo durante la desecación (figura 6).

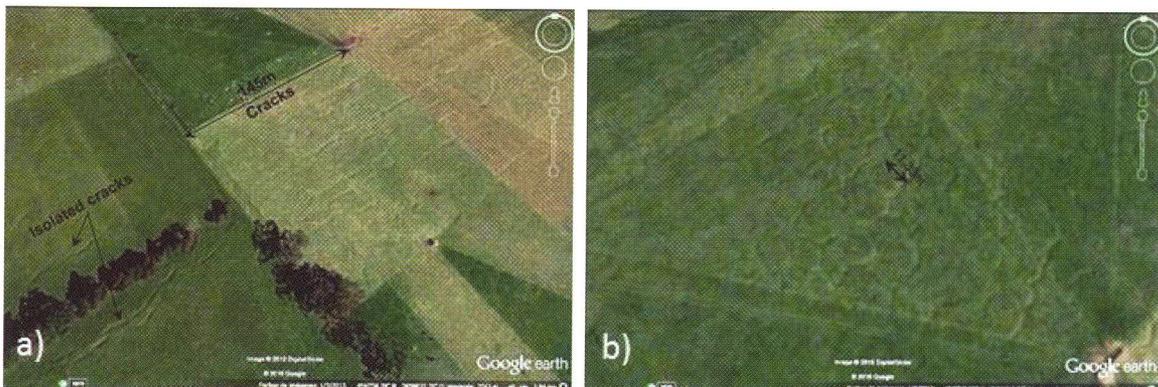


Figura 4. Fisuras de desecación de la sabana de Bogotá. a) Vista satelital de fisuras aisladas. b) Vista satelital de fisuras interconectadas. Tomado de Google Earth, 2016.



Figura 5. Asentamientos diferenciales producidos en el municipio de Tenjo (Cundinamarca).

EQUIPOS DE SIMULACIÓN DEL CLIMA

Muchos autores han investigado el proceso de evaporación en los suelos, utilizando modelos físicos y numéricos. La validación de los modelos numéricos y el estudio del proceso de evaporación pueden lograrse a través de la modelación física a escala reducida o una a tamaño real (Randolph & House, 2001). La modelación física a tamaño real genera grandes costos en la construcción y dificultades en el control de las variables ambientales. Por lo tanto, la modelación a escala reducida ofrece una alternativa razonable. Estos modelos reducidos pueden realizarse utilizando una centrífuga geotécnica, aumentando la aceleración de la gravedad N veces (Garnier et al., 2007; Taylor, 2003), o sin el uso de una centrífuga a una aceleración de la gravedad, $1 \times G$.

Las cámaras climáticas construidas a una escala reducida pueden simular variables climáticas individuales o múltiples, como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, la presión atmosférica y la lluvia. A pesar de la necesidad de introducir este equipo de laboratorio, la implementación es muy limitada debido principalmente a dos factores: las restricciones físicas en la simulación de todas las variables y la correcta simulación de los esfuerzos en el suelo. Sin embargo, hacer cámaras climáticas adaptadas a la centrifuga geotécnica implica un gran desafío debido a la alta demanda de potencia, las limitaciones de espacio y la complejidad en la instrumentación.

SIMULACIÓN DEL CLIMA UTILIZANDO UNA CÁMARA CLIMÁTICA

Como parte de mi tesis doctoral en la Universidad de los Andes (Bogotá) y en la École Centrale de Nantes (Francia), se diseñó y construyó una nueva cámara de simulación climática para realizar ensayos de desecación en suelos arcillosos (Lozada et al., 2016). Esta cámara climática tiene diferentes subsistemas que permiten simular las variables climáticas que afectan el proceso de evaporación. En el trabajo experimental presentado a continuación se simulan variables ambientales similares a las encontradas en la sabana de Bogotá.

En la cámara climática el aire fluye, siguiendo un camino termodinámico particular a través de un circuito cerrado (figura 7). Los subsistemas incluidos en la cámara climática se describen a continuación (figura 8).



Figura 6. Vías afectadas en el municipio de Tenjo (Cundinamarca).

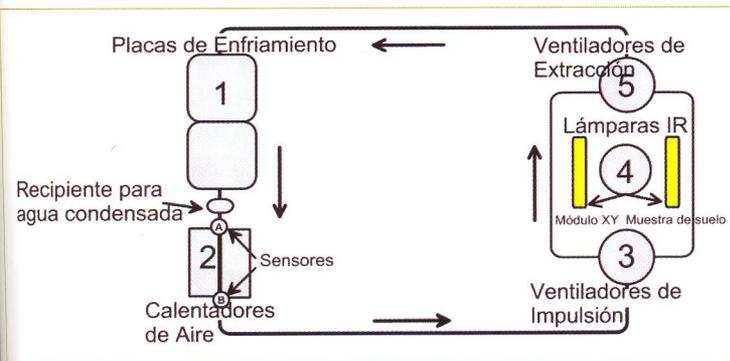


Figura 7. Circuito del aire en la cámara climática.

El camino termodinámico que sigue el aire en la cámara es el siguiente:

- [1] Dos placas de enfriamiento (PE) condensan el agua para obtener una humedad relativa específica en la cámara (figura 8a).
- [2] Una vez que el aire es enfriado, éste pasa a través de dos calentadores de aire para imponer una temperatura en la cámara (figura 8a). Adicionalmente, el aire se calienta con dos lámparas infrarrojas que simulan la radiación solar.
- [3] Para impulsar el aire desde los calentadores y para simular la velocidad del viento sobre la muestra de suelo se instalaron seis ventiladores (figura 8b).
- [4] Después que el aire pasa sobre la muestra de suelo, es impulsado hacia las placas de enfriamiento por medio de cuatro ventiladores de extracción (figura 8b).
- [5] Finalmente, el circuito comienza de nuevo.

Instrumentos de medición

Como se puede apreciar (figura 8b), dentro de la caja adiabática donde se ubica la muestra se incluye un robot XY. Este robot contiene un módulo XY en el que se instalaron varios sensores: radiación infrarroja, presión atmosférica, velocidad del viento, humedad relativa y desplazamiento láser.

Para simular las variables climáticas, la cámara de simulación climática contiene los siguientes subsistemas:

Radiación solar

El suelo y el aire se calientan con dos lámparas infrarrojas, las cuales simulan la radiación solar. Para calcular la radiación emitida por las lámparas, se comparó el espectro de radiación normalizada para la temperatura del cuerpo negro del Sol y de las lámparas. La radiación infrarroja directa (IR) en la superficie del suelo se calculó con una relación geométrica para el intercambio de calor por radiación.

La radiación infrarroja en la cámara climática se obtuvo con dos lámparas separadas 40 cm entre ellas y con una distancia entre las lámparas y la superficie de 30 cm. La máxima radiación simulada con las lámparas fue de 1040 W/m^2 . La radiación promedio en Bogotá se encuentra entre 210 y 220 W/m^2 .

Velocidad del viento

Se instalaron seis ventiladores en la entrada de la caja adiabática para conducir el aire sobre la muestra de

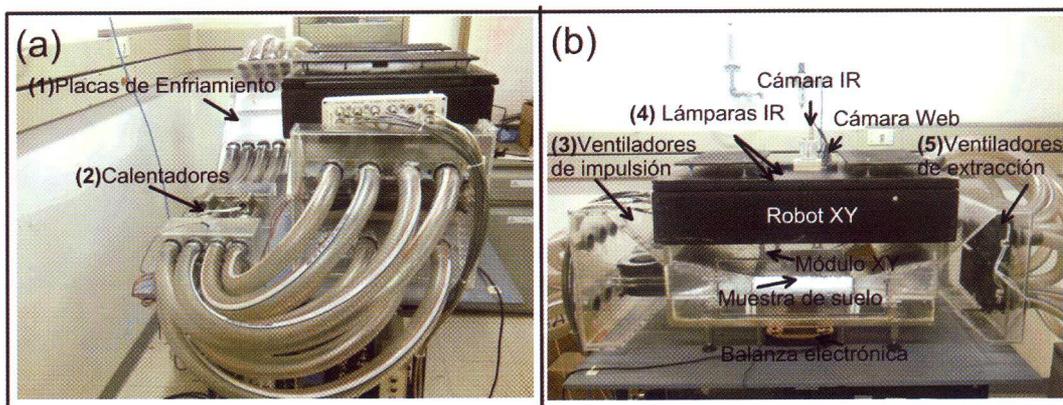


Figura 8. Componentes de conducción de aire en la cámara climática. a) Vista lateral. b) Vista frontal.

suelo y simular la velocidad del viento, velocidad que mide un sensor ubicado en el módulo XY a 1,5 cm de la superficie del suelo. La velocidad del viento se midió en el centro del contenedor de suelo. Las medidas se hicieron variando la potencia de los ventiladores. Durante el ensayo, los ventiladores de extracción se mantuvieron a una potencia eléctrica del 100 %. La máxima velocidad del viento alcanzada fue de 1,76 m/s. La velocidad del viento promedio encontrada en el municipio de Tabio, en la sabana de Bogotá, es de 1,8 m/s. Sin embargo, el valor máximo registrado entre los años 1991 y 2012 fue de 2,8 m/s.

Temperatura y humedad relativa

Para obtener condiciones específicas de humedad relativa y de temperatura en la cámara, se impuso la temperatura de las dos placas de enfriamiento y la temperatura de los dos calentadores. La temperatura de las dos placas de enfriamiento permite la condensación del agua, alcanzando un 100 % de saturación del aire. Por lo tanto, la temperatura aplicada por las dos placas de enfriamiento se compara con la temperatura de punto de rocío teórico.

Para calibrar el rango de condiciones climáticas y de temperatura en la cámara climática se hicieron quince ensayos, variando la temperatura de los calentadores y la temperatura de las placas de enfriamiento. El rango de operación de la cámara se obtuvo para temperaturas de las placas de enfriamiento entre 0 y 12 °C y temperaturas de los calentadores entre 22 y 39 °C. Con estas condiciones se obtuvieron humedades relativas entre 18 - 40 % y temperaturas entre 23 - 38 °C. Sin embargo, para los ensayos de evaporación potencial la humedad relativa dentro de la cámara varía dependiendo de la disponibilidad de agua en el interior de la cámara (Lozada et al., 2016).

Operación de la cámara climática

Principio de operación teórico

Para el diseño de la cámara de simulación climática se consideraron principios fundamentales de física, concernientes a la evaporación y la condensación del agua, el calentamiento por radiación y la transferencia de calor por convección (Lozada et al., 2016).

Adicionalmente, las variables del aire húmedo, como la humedad relativa (RH) la temperatura del aire (T_a) y la relación de mezcla e (relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco) se usaron para describir el estado de vapor en la atmósfera artificial creada en la cámara climática. El diagrama de Mollier resume estas funciones de humedad en un cuadro que indica la relación de mezcla como función de la temperatura. Más adelante se muestra el ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores usados para controlar la humedad relativa y la temperatura utilizando el diagrama de Mollier (figura 9). El ciclo se describe a continuación:

- El punto C representa las propiedades termodinámicas del aire en su estado inicial.
- La temperatura de las placas de enfriamiento se reduce, resultando en una disminución de la temperatura del aire y en un aumento de la humedad relativa. Si el enfriamiento continúa, la relación de mezcla disminuye y el aire alcanzará la curva de saturación. En este punto, el vapor de agua se condensa. El proceso sigue el camino C-D-E.
- El agua condensada es conducida hasta un contenedor que permite calcular el volumen de agua.
- El aire se calienta nuevamente al fluir a través de los calentadores, la temperatura aumenta y la humedad relativa disminuye a lo largo del camino E-A.

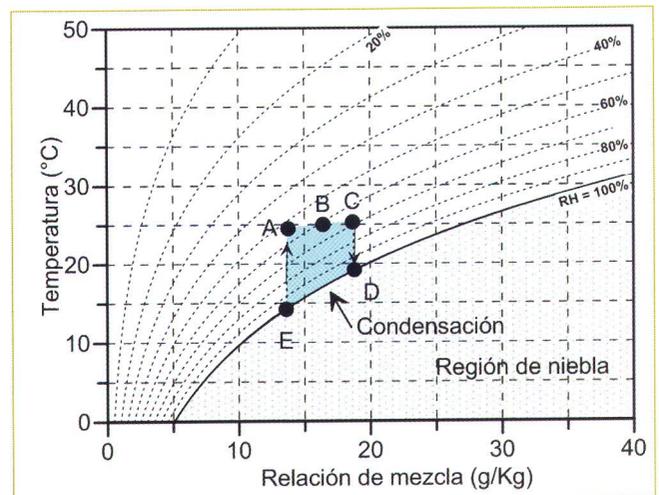


Figura 9. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores.

- Finalmente, el camino A-B-C indica que cuando el aire circula sobre el suelo su temperatura y humedad relativa aumenta o disminuye, dependiendo de las propiedades del suelo en la superficie. Posteriormente, el ciclo empieza de nuevo.

EVAPORACIÓN POTENCIAL Y EVAPORACIÓN REAL

Ensayos de evaporación potencial

Para determinar la tasa de evaporación potencial, y posteriormente comparar con la tasa de evaporación real, se realizaron ensayos en agua controlando la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa.

Procedimiento del ensayo

Los ensayos T2 y T3 se hicieron para determinar el efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación, con las mismas condiciones iniciales de velocidad del viento y humedad relativa inicial (tabla 1). El procedimiento se dividió en tres partes:

- Se impusieron las condiciones ambientales en la cámara climática sin agua durante 30 minutos, con el fin de acondicionar la cámara.
- Se adicionaron 500 gramos de agua en un contenedor de vidrio cuadrado y posteriormente se introdujo en la cámara climática.
- Se inició el ensayo de evaporación y se registraron los valores de humedad relativa, temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento. Adicionalmente, se pesó el agua dentro del contenedor con una balanza electrónica.

Tabla 1

Condiciones ambientales aplicadas para los ensayos de evaporación en agua

Ensayo	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura calentadores (°C)	Radiación infrarroja (W/m ²)	Temperatura placas de enfriamiento (PE) (°C)
T2	1,76	18,5	371,7	0
T3	1,76	18,5	0	0

Resultados experimentales

Es posible ver el ciclo termodinámico para el ensayo T2 (figura 10), así como el ciclo termodinámico para el ensayo T3 (figura 11). Los puntos A, B, C de las figuras están localizados sobre la superficie del agua, y el punto D corresponde a la temperatura de las placas de enfriamiento. Además, el punto D representa un punto medio en el camino del aire cuando pasa sobre las placas de enfriamiento. El aumento de la radiación infrarroja produce un incremento de la temperatura del aire y una disminución de la humedad relativa. Por esta razón, el ciclo termodinámico se expande a medida que la radiación aumenta (figura 11).

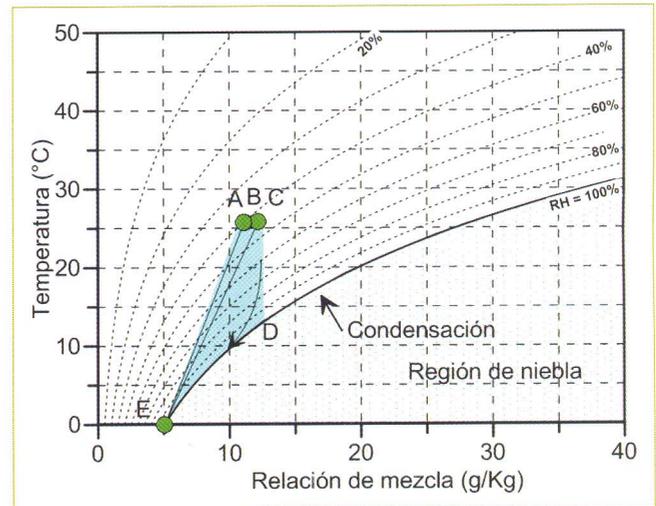


Figura 10. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores. Ensayo T3 sin radiación infrarroja.

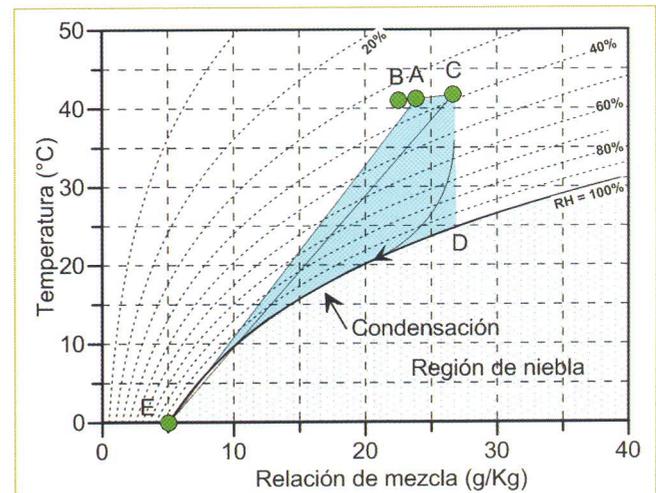


Figura 11. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores. Ensayo T2 con radiación infrarroja.

La tasa de evaporación del agua depende de todas las variables ambientales. A medida que la humedad relativa disminuye y la temperatura se incrementa con la radiación solar, la capacidad de la atmósfera de contener agua aumenta. Por este motivo, la tasa de evaporación es mayor para el ensayo T2 que para el ensayo T3 (figura 12).

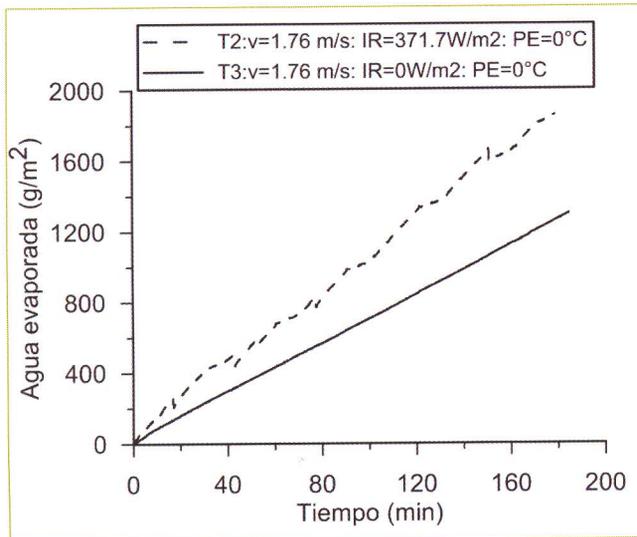


Figura 12. Efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación del agua.

Ensayos de evaporación en arcilla

Para determinar la tasa de evaporación real se hicieron los ensayos T2 y T3 en arcilla, manteniendo las mismas condiciones climáticas y realizando el mismo procedimiento experimental que en los ensayos en agua. El suelo utilizado en esta investigación es el caolín Speswhite, preparado con un contenido de humedad de $w = 1,5$ LL. El límite líquido de la arcilla es $LL = 55\%$ y por lo tanto el contenido de humedad inicial es de $w_0 = 82,5\%$.

A continuación se muestra el peso del agua evaporada durante el ensayo (figura 13). Al inicio del ensayo la tasa de evaporación real presenta el mismo valor que la tasa de evaporación potencial. Sin embargo, a medida que el agua se evapora la tasa de evaporación disminuye, hasta que el suelo se encuentra completamente seco. Este comportamiento está asociado con las restricciones del flujo de agua por evaporación debidas al aumento de la succión en el suelo, con la disminución del contenido de humedad.

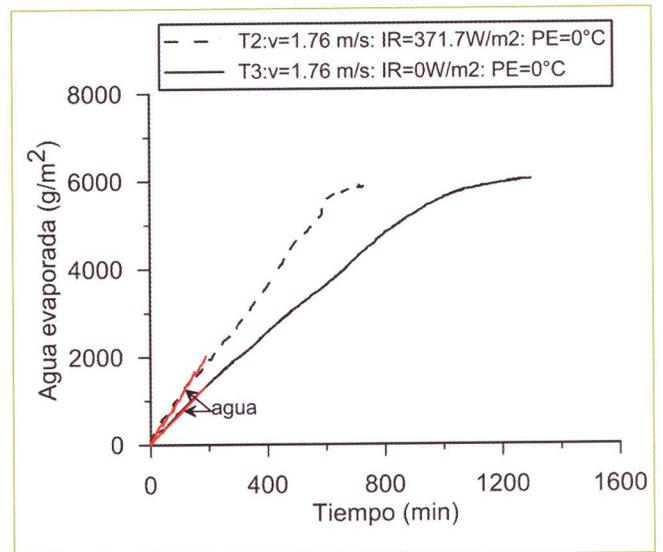


Figura 13. Comparación entre las tasas de evaporación potencial y real.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La cámara de simulación climática se diseñó para hacer ensayos de evaporación en arcilla. Esta cámara permite imponer diferentes condiciones ambientales a través de un circuito de aire cerrado. Los resultados preliminares de evaporación permiten establecer las siguientes conclusiones:

- El principal efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación es la disminución de la humedad relativa del aire y el aumento de la temperatura. Estas condiciones y la elevación de la temperatura del agua permiten incrementar la tasa de evaporación.
- La tasa de evaporación en el suelo es la misma que la del agua al inicio del ensayo de evaporación. Sin embargo, a medida que la desecación aumenta, la tasa de evaporación disminuye.
- Los valores de velocidad del viento simulados son inferiores a los valores reales en la sabana de Bogotá. Mayor cantidad de ventiladores o mayores potencias eléctricas son necesarias para simular mayores velocidades de viento.
- El estudio del proceso de evaporación en capas de suelo finas deja un resultado válido experimentalmente, pero para el estudio de mayores profundidades de suelo la cámara climática, a una gravedad, no provee información real del comportamiento del suelo.

Dados los resultados experimentales, un campo de estudio real en el suelo de la Escuela Colombiana de Ingeniería permitiría analizar el proceso de evaporación del suelo en condiciones climáticas reales. Adicionalmente, se podrá estudiar el patrón de fisuras y su relación con las variables climáticas.

REFERENCIAS

- Blight, G.E. (2002). *Measuring evaporation from soil surfaces for environmental and geotechnical purposes*, 28(4), 381-394. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i4.4911>.
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S.A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R. & Skuce, A. (2013). *Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature*, 8(2).
- Corte, A.E. & Higashi, A. (1964). Experimental research on desiccation cracks in soils. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=136592>.
- Doran, P.T. & Zimmerman, A.K. (2009). Examining the scientific consensus on climate change, 90(3).
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D.J., König, D., ... Thorel, L. (2007). Catalogue of Scaling Laws and Similitude Questions in Geotechnical Centrifuge Modelling, 7, 1-1-23-23. <https://doi.org/10.1680/ijpmpg.2007.7.3.01>.
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, R. & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure, 33(1), 115-133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>.
- Gitirana, G., Fredlund, M.D. & Fredlund, D.G. (2006). Numerical modelling of Soil-atmosphere interaction for Unsaturated Surfaces, 147(1), 658.
- Harris, R.C. (2004). *Giant Desiccation Cracks in Arizona*, 34(2), 4-6.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report. Climate Change 2014 Synthesis Report*, 1-151.
- Kodikara, J.K., Nahlawi, H. & Bouazza, A. (2004). *NOTE / NOTE Modelling of curling in desiccating clay*, 566, 560-566. <https://doi.org/10.1139/T04-015>.
- Lozada, C., Caicedo, B. & Thorel, L. (2016). *Improved climatic chamber for desiccation simulation* (p. 13002).
- Oreskes, N. (2004). *The scientific consensus on climate change*, 306(5702), 1686-1686.
- Penman, H. (1948). *Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass* (vol. 193, pp. 120-145). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Randolph, M.F. & House, A.R. (2001). *The complementary roles of physical and computational modelling*, 1(1), 1-8.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., ... Zhang, X. (2012). *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*, 109-230.
- Sheffield, J., Wood, E. & Roderick, M. (2012). *Little change in global drought over the past 60 years*, 491(7424), 435-438.
- Shin, H. & Santamarina, J.C. (2011). *Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis*, 61(11), 961-972. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.012>.
- Suárez-Plascencia, C., Escalona-Alcázar, F. & Díaz-Torres, J. (2005). Desarrollo de grietas en el fraccionamiento Prados de Nextipac, municipio de Zapopán, Jalisco, 25(2), 352-362.
- Taylor, R.E. (2003). *Geotechnical centrifuge technology* (CRC Press).
- Vesga, L.F., Caicedo, B. & Mesa, L. (2003). Deep Cracking in Sabana de Bogotá Clay.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation, 31(2), 151-161. <https://doi.org/10.1139/t94-021>.

