INVESTIGACIÓN e INNOVACIÓN en INGENERÍAS
ISSN2344-8652

Evaluación de la dinámica de agua en Hydrus-1D para tres suelos de ladera cultivados con aguacate Hass (persea americana)

Evaluation of water dynamics in Hydrus-1D for three hillside soils cultivated with Hass avocado (persea americana)

Kellym Libeth Lopez Amaya
Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira

OPEN ACCESS

Recibido: 18/11/2021
Aceptado: 17/02/2022
Publicado: 25/04/2022

Correspondencia de autores:
kellym.lopez@correounivalle.edu.co

CC BY

Copyrith 2020 by Investigación e Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: El estudio buscó evaluar el movimiento del agua en suelos de ladera cultivados con aguacate Hass bajo la hipótesis que la pendiente impide que la zona no saturada, que cubre la profundidad efectiva de raíces, llegue a capacidad de campo CC (-30 KPa) ante un evento de precipitación y en épocas secas alcanza valores altos de potencial mátrico, afectando la disponibilidad hídrica para la planta. **Metodología:** Se simuló con Hydrus-1D eventos de secado y de humedecimiento del suelo por precipitación, a partir de datos de potencial mátrico tomados con sensores de matriz granular en tres fincas comerciales de aguacate Hass, ubicadas en Roldanillo (Laurentina), Restrepo (Ponceña) y Dagua (Olival) Valle del Cauca. **Resultados:** se encontró que bajo los máximos eventos de precipitación en agosto de 2020, el potencial mátrico disminuye por efecto de la infiltración de agua en las tres fincas. En Laurentina, la disminución de este, alcanza los 100 cm, por debajo de -30 KPa, en Restrepo alcanza los 30 cm de profundidad con alrededor de -30 KPa y en Olival, llega hasta 75 cm, con cerca de -20 KPa. Para el evento de secado el potencial mátrico osciló entre -50 y -200 KPa. Los errores asociados de la simulación estuvieron entre 10 y 25 % con R2 entre 0.8 y 0.9 (P<0.001). **Conclusiones:** Se encontró que la pendiente y la textura del suelo, influencian la distribución del agua en el suelo produciendo que a los 75 cm haya un incremento en la humedad sin existir ingreso de agua por la superficie y que para suelos de textura franco arenosa, el suelo alcanza una distribución uniforme de CC cubriendo la raíz con precipitaciones altas. En épocas secas necesarias se hace necesario aplicar riego.

Palabras clave: Potencial matricial, simulación, capacidad de campo, movimiento de agua, disponibilidad de agua.

Abstract

Objective: The study sought to evaluate the movement of water in hillside soils cultivated with Hass avocado under the hypothesis that the slope prevents the unsaturated zone, which covers the effective depth of roots, from reaching the CC field capacity (-30 KPa). before a precipitation event and in dry seasons it reaches high values of matric potential, affecting the water availability for the plant. **Methodology:** Hydrus-1D simulated events of drying and wetting of the soil by precipitation, from data of matric potential taken with granular matrix sensors in three commercial Hass avocado farms, located in Roldanillo (Laurentina), Restrepo (Ponceña) and Dagua (Olival) Valle del Cauca. **Results:** it was found that under the maximum precipitation events in August 2020, the matric potential decreases due to the effect of water infiltration in the three farms. In Laurentina, the decrease in this reaches 100 cm, below -30 KPa, in Restrepo it reaches 30 cm in depth with around -30 KPa and in Olival, it reaches up to 75 cm, with about -20 KPa. For the drying event, the matric potential ranged between -50 and -200 KPa. The associated errors of the simulation were between 10 and 25% with R2 between 0.8 and 0.9 (P <0.001). **Conclusions:** It was found that the slope and the texture of the soil influence the distribution of water in the soil, producing that at 75 cm there is an increase in humidity without any entry of water through the surface and that for soils with a sandy loam texture, the soil reaches a uniform distribution of CC covering the root with high precipitations. In dry seasons it is necessary to apply irrigation.

Keywords: Matric potential, simulation, field capacity, water movement, water availability.

Como citar (IEEE): K. L. Lopez-Amaya. "Evaluación de la dinámica de agua en Hydrus-1D para tres suelos de ladera cultivados con aguacate Hass (persea americana)". Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 10, n°1, 75-98, 2022. DOI: https://doi.org/10.17081/invinno.10.1.4811

Introducción

Colombia produce alrededor de 400.000 t de diferentes variedades de aguacate, ubicándolo e los primeros lugares a nivel mundial, con el aguacate Hass como la única variedad de exportación [1]. Entre 2015 y 2017, las exportaciones de esta aumentaron en 413 %. Esta variedad se cultiva en 15 departamentos, siendo los principales, Antioquia, Risaralda, Caldas y Valle del Cauca [1]. El Valle del Cauca produce un 10 % del total, con 1.800 ha cultivadas ubicadas en los municipios de Roldanillo, Bolívar, La Unión, Barragán, Tuluá, Restrepo y Dagua [2], todos ubicados en zona de ladera.

En el contexto de la exportación, se requiere que los productores puedan vincularse con los compradores para suscitar la inclusión financiera de los campesinos, abriendo la posibilidad de posicionarse en el mercado de manera competitiva [1]; sin embargo, la exportación conduce a alcanzar altos estándares de calidad del fruto, lo que implica un estricto control en las condiciones de producción y la implementación de tecnologías que permitan optimizar condiciones.

Una de las condiciones que requieren de optimización y que es fundamental en un cultivo, es el aporte de agua a la planta de aguacate Hass; ya que, el manejo del cultivo en este aspecto, se hace la mayoría del tiempo, con el aporte de las precipitaciones. Por lo que es recomendable implementar sensores de potencial mátrico en el suelo, para monitorear indirectamente la humedad. Los datos registrados por estos equipos ayudan a predecir el frente de humedecimiento [3] con simulaciones, para diferentes valores de precipitación con el fin de averiguar si efectivamente gran parte del suelo que abarca la raíz del árbol de aguacate Hass, se encuentra a capacidad de campo después de ocurrido el evento, y en consecuencia, averiguar cuáles son las precipitaciones que pueden mantener las condiciones de humedad óptimas y por cuánto tiempo se mantienen para un tipo de suelo, esto serviría de referencia para aquellos productores que no implementan esta tecnología por razones económicas en el Valle del Cauca.

Frente a este tema de la disponibilidad hídrica, los investigadores se han enfocado en las pérdidas de agua de riego que disminuyen la eficiencia y causan percolación, incremento en la evapotranspiración y limitación de agua para la planta o la presencia de un exceso de agua que limita la productividad y propician la aparición de enfermedades en otros cultivos y en el aguacate Hass [4, 5, 6, 7, 8]. Las investigaciones de campo se han centrado en el balance hídrico del suelo en diferentes condiciones externas al sistema [9, 10, 11]evapotranspiración bajo diferentes metodologías de riego [12] variación en el tiempo y frecuencia de riego [13] y su influencia de la cantidad de riego en el rendimiento de la planta de aguacate Hass [14, 15, 16, 17].

El tema de la simulación en los cultivos ha tenido alcance hasta para determinar la percolación bajo riego por inundación [18, 19] y la determinación de cantidad de agua en el suelo bajo riego por goteo y por surcos en diferentes cultivos [20, 21, 3]. En el aguacate Hass, se han empelado el software FITEVAL, para simular la humedad del suelo con el fin de programar del riego en aguacate [22]. Estos estudios se concentraron en la relación entre la cantidad de riego y la percolación o evapotranspiración y experimentos de los efectos de diferentes tratamientos de riego en la productividad de los cultivos. La ventaja de la simulación es que no es necesario realizar estudios de campo laboriosos que requieran mucho tiempo y dinero [4].

Una opción útil para identificar estrategias eficientes para condiciones óptimas de agua en las raíces de un cultivo, consiste en modelar los efectos de las precipitaciones sobre el balance hídrico del suelo [23]. La simulación de agua en el suelo implica conocer las propiedades físicas del suelo, la distribución de raíces, la dinámica de crecimiento de cultivos y los cambios hídricos en la planta [24, 25]. Uno de los software más empleados es Hydrus-1D [26, 25, 27, 28, 5, 29, 30, 31, 32], el cual consiste en predecir la variabilidad temporal de la humedad unidimensional del suelo insaturado y la absorción de agua de la raíz [33].

El software Hydrus-1D se ha utilizado para simular el movimiento del agua en los campos de maíz, trigo, arroz, frutales, caña de azúcar, sin considerar otros posibles cultivos [34, 9, 35] y para simular evapotranspiración o percolación. Estos estudios fueron realizados en zona plana o en contenedores de suelo. Bajo esta premisa, resulta necesario aplicarlo al cultivo de aguacate Hass en zona de ladera, debido a que existe un desconocimiento de la variación de la humedad a lo largo de las raíces del aguacate Hass para comprender si efectivamente las precipitaciones alcanzan a cubrir las necesidades de agua. Respondiendo a las preguntas: ¿Todo el perfil de suelo llega a capacidad de campo durante un evento de precipitación? ¿El movimiento del agua guarda algún patrón de comportamiento similar en las diferentes fincas? si el suelo no recibe precipitaciones, bajo condiciones de altas temperaturas ¿Cuáles son los valores de potencial mátrico?

En este estudio se pretende evaluar la dinámica del agua en el suelo de ladera de tres lotes cultivados con aguacate Hass ubicados en los municipios de Restrepo, Dagua y Roldanillo en el departamento del Valle del Cauca-Colombia, durante un evento de precipitación y de secado; para ello, se tomaron datos de potencial mátrico y meteorológicos. A partir de estos, fue realizada una simulación con el software Hydrus-1D.

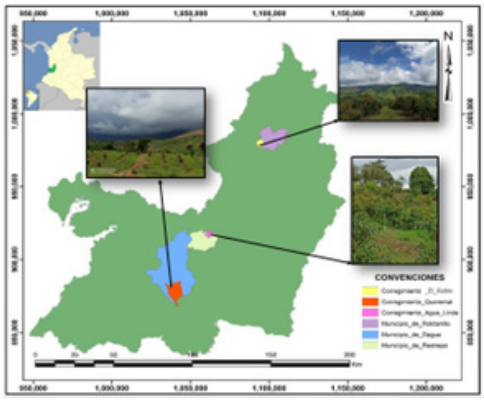
Metodología

Este estudio se realizó como un modelo determinístico; tomando datos de campo para resolver un modelo matemático, no se contempló la existencia del azar, sino que con base en datos suministrados y a la calibración del modelo de Richards para las condiciones presentadas, se predijo el comportamiento de la dinámica del agua en el suelo de manera aproximada.

Localización y características de la zona de estudio

El estudio se realizó basado en los datos de tres lotes ubicados en el departamento del Valle del Cauca según la figura 1: **Lote finca Laurentina**, situado en el Municipio de Roldanillo (4°23′52"N, 76°13′12"O), corregimiento El Retiro a 1800 m.s.n.m, con temperatura promedio de 20 °C. El lote tiene distancia entre surcos de 7 m y distancia entre árboles de 3.50 m. **Lote finca Agropecuaria Ponceña,** situado en el municipio de Restrepo, corregimiento agua linda a 1.600 m.s.n.m (3°49′19# N, 76°31′20" O) presenta una temperatura promedio de 19 °C. La distancia entre surcos es de 3 m y distancia entre árboles de 3.5 m. **Lote finca el Olival, l**ocalizado en el municipio de Dagua, corregimiento el Queremal a 1600 m.s.n.m (3°39′0" N, 76°40′59" O) con temperatura promedio de 18 °C. Los árboles se encuentran con distancia entre surcos de 7 m y distancia entre árboles de 7 m.

Figura 1. Localización de los lotes de estudio en el Departamento del Valle del Cauca, Colombia

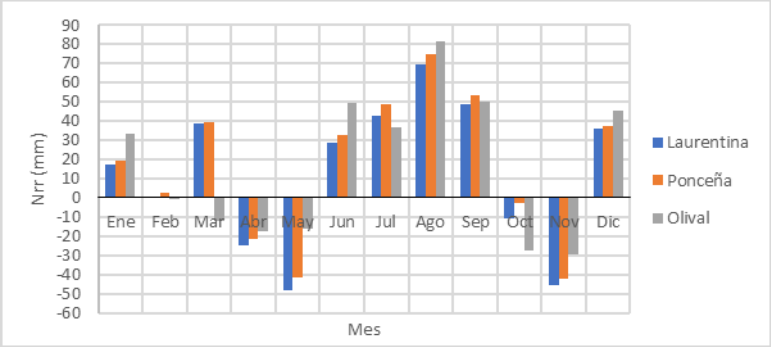


Fuente: elaboración propia

Adquisición de datos

La aplicación de este estudio considera condiciones de límite climático a corto plazo (1 a 30 días) con un enfoque en la distribución de agua en el suelo; por ello, se realizó el balance hídrico con datos históricos hasta el 2018 (figura 2). Se encontró que agosto es el mes crítico, siendo insuficientes las precipitaciones para suplir la demanda hídrica de la planta. Se definió que a partir de los datos de agosto de 2020 se escogería un evento de precipitación que cubriera 4 días después de ocurrido y un evento de secado con el mismo periodo de tiempo de observación, con el fin de analizar la distribución de agua en el suelo y el aumento del potencial mátrico cuando no ingresa agua al suelo.

Figura 2. Necesidades de riego totales del cultivo de aguacate Hass para las tres fincas que son objeto de estudio en función de los meses a lo largo de un año.



Fuente: elaboración propia

Definición de los puntos de monitoreo (PM)

Se tomaron muestras de suelo de 1 kg con barreno holandés a las profundidades de 15 y 45 cm por surco intercalado, a 1 m del tronco del árbol, para evaluar la clase textural por el método del hidrómetro de Bouyocus en las tres fincas de estudio. Las clases texturales permitieron identificar la variabilidad espacial del suelo, con textura homogénea para Laurentina de tipo franco arenosas; en el lote de Ponceña se identificaron tipos franco arenosas, franco arcillo arenosa y franco arcillosas y en El Olival, suelos franco arenosos, arenoso francoso, arenoso y franco arcillosos. Con base en esta distribución espacial [34, 36, 37, 38] se decidieron tres puntos de instalación de sensores de potencial mátrico o puntos de monitoreo (PM) distribuidos diagonalmente en los lotes.

Conociendo las divisiones de áreas se hizo una clasificación en campo de los árboles de cada lote teniendo en cuenta cuatro categorías: **frondoso F** (árboles con diámetro de dosel de 1 m en adelante, altura de dosel de 1,5 en adelante, con presencia abundante de hojas, sin enfermedades), **no frondoso NF** (árboles con el rango de dimensiones de la clasificación frondoso pero con presencia baja de hojas, sin enfermedades) y **pequeño P** (árboles con diámetro de dosel entre 0.3 y 1 m, altura de dosel entre 0,3 y 1,5 m que tuvieran baja o abundante presencia de hojas, sin enfermedades). Con esta información fueron seleccionados tres árboles para instalar los sensores, que tuvieran las características de frondoso y que estuvieran distribuidos en el lote diagonalmente.

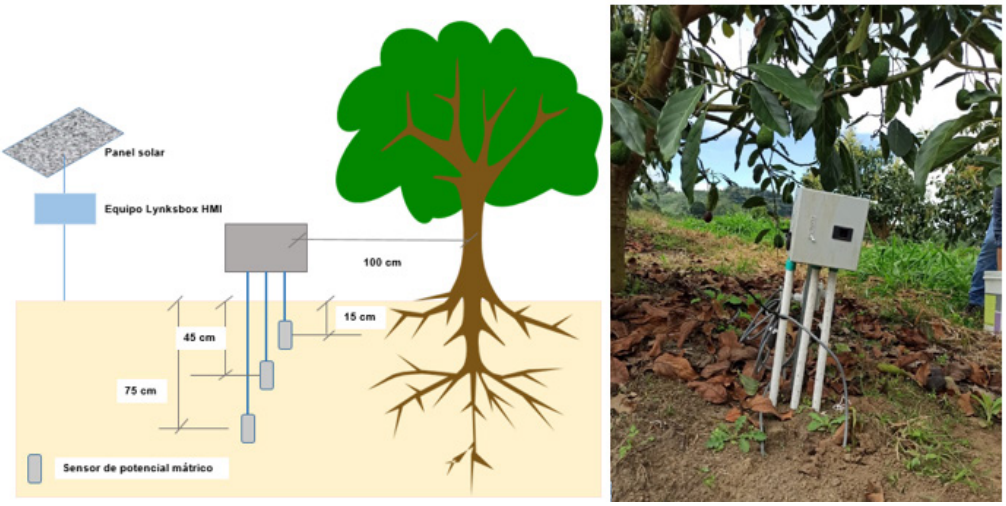
Medición de variables meteorológicas

Se registró precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar y energía solar; con estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro 2, que transmite datos a través de radio frecuencia hasta 500 m de distancia de separación de la consola, reportaron datos cada 15 minutos, para calcular la evapotranspiración potencial empleada en la simulación, además de proporcionar en detalle la ocurrencia de la precipitación.

Medición de potencial mátrico y temperatura

Los datos de potencial mátrico fueron tomados con sonda de tensiometría Water-Mark de matriz granular, se registraron con ayuda de un equipo Lynkbox HMI que se alimenta de energía solar por medio de un panel y recibe información cada hora durante 24 h, en tiempo real. Fueron instalados a 15, 45 y 75 cm de profundidad para Laurentina y El Olival y a 15, 45 y 60 cm para Ponceña, a 1 m del tallo del árbol (figura 3), abarcando la profundidad efectiva de raíces de la planta de aguacate Hass.

Figura 3. Esquema de Instalación de sensores de potencial mátrico y temperatura en los puntos de monitoreo. Los sensores fueron colocados a 15, 45 y 75 cm, cubriendo la profundidad de raíces el árbol de aguacate Hass.



Fuente: Adaptado de "guía para la instalación de señores en campo" empleada en el proceso de ejecución de "Desarrollo de una herramienta para la programación del riego en el cultivo de aguacate cv. Hass en el Valle del Cauca"

Simulación numérica con Hydrus 1D

Módulo de movimiento del agua en el suelo

El paquete Hydrus-1D se basa en la ecuación modificada de Richards, describiendo la variabilidad del agua con respecto al tiempo en el perfil de suelo parcialmente saturado para un flujo uniforme y un medio poroso rígido; despreciando los efectos de aire y el flujo de agua debido a los gradientes térmicos se tiene la ecuación 1.

$$\frac{\partial\theta(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h,x)\left(\frac{\partial h}{\partial x} + cos\ \propto\right)\right] - S(x,t) \quad 1$$

Donde θ es el contenido volumétrico [cm3cm-3], t es el tiempo [día], x es la coordenada espacial [cm] positiva hacia arriba, K es la función de conductividad hidráulica insaturada [cm día-1], h es la cabeza de presión de agua [cm], $\propto$ es el ángulo entre la dirección del flujo y el eje vertical (es decir, α = 0 para flujo vertical, 90 para flujo horizontal y 0 <α <90 para flujo inclinado), s es la absorción de agua por la raíz. K está dada por:

$$K(h,x) = K_s(x)K_r(h,x) \quad 2$$

Donde K_r es la conductividad hidráulica relativa y K_s es la conductividad hidráulica saturada [cm día-1].

Módulo de curva de retención de agua

Para un sistema de flujo de agua uniforme, se empleó el modelo de Genuchten (1980) basado en el modelo estadístico de distribución del tamaño de poro de Mualem (1976) para predecir la retención de agua en el suelo y conductividad hidráulica insaturada.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+|\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^{\,l}\left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m\right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (6)$$

Donde $\theta(h)$ es la función de retención de agua en el suelo; θ_r es la humedad residual del suelo [cm3cm-3]; θ_s es la humedad del suelo saturada [cm3cm-3]; K_s es la conductividad hidráulica saturada [cm día-1]; S_e es el contenido de agua efectivo; α es la presión de burbujeo [L-1]; n es el índice de distribución de tamaño de poro y l es el parámetro de conectividad de poro que fue estimado como aproximadamente 0.5, siendo un cálculo promedio para muchos suelos.

Módulo de evapotranspiración

Hydrus 1D, utiliza el método combinado de Penamn Monteith recomendada por la FAO (2006) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ETo (cm día-1), combinando los términos de radiación y aerodinámicos.

$$ETo = \left[\frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}\right] \quad (7)$$

Donde R_n es la radiación neta en la superficie [MJ m-2 d-1], G es el flujo de calor del suelo [MJ m-2 d-1], ρ es la densidad atmosférica [kgm-3], T es la temperatura media del aire a 2 m de altura [°C], U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura [m s-1], $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor [kPa], e_s es la presión de vapor de saturación a la temperatura T [kPa], e_a es la presión de vapor en el punto de rocío [kPa], y γ es la constante psicrométrica [kPa °C-1].

$$\Delta = \frac{4098\,e_a}{(T+237.3)^2} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{C_p P}{\varepsilon\lambda} * 10^{-3} = 0.00163\,\frac{P}{\lambda} \quad (9)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

$$R_{ns} = 0.77\left(0.25 + 0.50\frac{n}{N}\right)R_a \quad (11)$$

$$R_{nl} = \sigma\left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2}\right]\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)\left(1.35\,\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad (12)$$

Donde T es la temperatura promedio del aire [°C], c_p es [el calor especifico del aire húmedo (1.013 kJ kg-1 °C -1], P es la presión atmosférica [kPa], ε es la relación de pesos moleculares del vapor de agua y el aire seco (0.622) y λ es el calor latente [MJ kg-1], R_n es la radiación neta [MJ m-2 d-1], R_{ns} es la radiación neta de onda corta [MJ m-2 d-1], R_{nl} es la radiación neta de onda larga [MJ m-2 d-1], R_a es la radiación extraterrestre [MJ m-2 d-1], $\frac{n}{N}$ es la fracción de luz solar relativa [adimensional], σ es la constante de Stefan- Boltzmann [4.903 x10-9 MJ K-4 m-2 d-1], $T_{max,K}$ es la temperatura máxima absoluta durante 24 horas [K=°C+273.16], $T_{mIN,K}$ es la temperaura mínima absoluta durante 24 horas [K=°C+273.16], $\frac{R_s}{R_{so}}$ radiación relativa de onda corta (valores $\leq$1), R_s radiación solar medida o calculada [MJ m-2 d-1], R_{so} radiación en un día despejado [MJ m-2 d-1].

Parámetros del modelo para Hydrus-1D

Datos de entrada al modelo

Para simular el balance hídrico del suelo, se restringieron los datos de entrada a las condiciones atmosféricas y parámetros hidráulicos del suelo, asociados al contenido de humedad y retención de agua, se emplearon los datos del catálogo de suelos de Hydrus-1D y se empleó Ks y θ_s, para la calibración del modelo. El cálculo de la evapotranspiración se hizo a partir de datos meteorológicos. Se tomó en cuenta las precipitaciones con sus respectivas fechas y horas de ocurrencia para la simulación del evento de precipitaciones.

Determinación de las condiciones de contorno

Condición inicial

La solución de la ecuación de Richards, requiere del conocimiento inicial de la distribución del potencial mátrico dentro del dominio de flujo así:

$$h(x,t) = h_i(x) \qquad t = t_0$$

Donde t_0 es el momento en el que comienza la simulación y $h_i(x)$ es una función prescrita de x. Esta función se encontró con los datos de potencial mátrico a las profundidades de 15, 45 y 75 cm, en el momento exacto en el que se comenzó la simulación para el evento que se quiso describir de humedecimiento o secado seleccionado.

Condiciones de contorno dependientes del sistema

Involucra la interfaz suelo-aire, ya que el flujo real depende de las condiciones predominantes y transitorias de humedad del suelo cerca de la superficie. La solución numérica de la ecuación de Richards se obtiene limitando el valor absoluto del flujo superficial por las siguientes condiciones.

$$\left|-K\frac{\partial h}{\partial x} - K\right| \leq E \qquad en\ x = L$$

$$h_A \leq h \leq h_s \qquad en\ x = L$$

Donde E es la tasa potencial máxima de infiltración bajo las condiciones atmosféricas (LT-1); h_A es la carga de presión mínima en la superficie del suelo, en este caso de 5000 cm.c.a; h_s es la carga de presión máxima en la superficie del suelo bajo las condiciones predominantes del suelo, en este caso h_s es igual a cero; es decir, se asume que cualquier exceso de agua en la superficie por encima de cero se eliminará de inmediato. En este caso, se seleccionó la condición de contorno atmosférica de escorrentía superficial

Módulo de solución numérica de flujo variablemente saturado

Discretización de espacio y tiempo

Se utilizó un esquema de elementos finitos lineales agrupados en masa para la discretización de la ecuación de Richards según las ecuaciones 13 y 14. Este se basa en el principio de sustituir al sistema bajo análisis en muchos elementos finitos interconectados entre sí, cada uno de los cuales posee los fundamentos de cálculo que interesan, este proceso se conoce como el mallado o discretización del sistema como se muestra en la figura 4. El perfil de suelo se discretizó en 120 nodos, con 119 elementos, conectados entre sí. La profundidad del perfil fue de 100 cm, con una densidad de malla más fina en los límites superior de 0.1 e inferior de 0.3.

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1}-\theta_i^{j}}{\Delta t}=\frac{1}{\Delta x}\left(K_{i+1/2}^{\,j+1,k+1}\frac{h_{i+1}^{j+1,k+1}-h_i^{j+1,k+1}}{\Delta x_i}-K_{i-1/2}^{\,j+1,k}\frac{h_i^{j+1,k+1}-h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta x_{i-1}}\right)+\frac{K_{i+1/2}^{\,j+1,k}-K_{i-1/2}^{\,j+1,k}}{\Delta x}cos\alpha-S_i^{j} \quad (13)$$

$$\Delta t = t^{j+1}-t^{j} \quad (14)$$

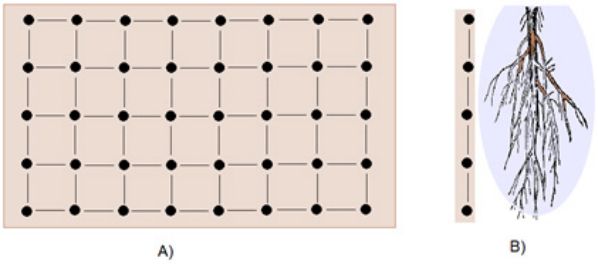
Donde,

$$\Delta x=\frac{x_{i+1}-x_{i-1}}{2} \qquad \Delta x_i = x_{i+1}-x_i \qquad \Delta x = x_i - x_{i-1} \quad (15)$$

$$K_{i+1/2}^{\,j+1,k}=\frac{K_{i+1}^{\,j+1,k}+K_i^{\,j+1,k}}{2} \qquad K_{i-1/2}^{\,j+1,k}=\frac{K_i^{\,j+1,k}+K_{i-1}^{\,j+1,k}}{2} \quad (16)$$

Los subíndices $i-1$, i, $i+1$ indican la posición en la malla, los superíndices k y $k+1$, Son las iteraciones anterior y actual, los superíndices j y $j+1$ indican el tiempo anterior y actual.

Figura 4. A) Esquema de discretización en mallado en un perfil de suelo en 2 D. Cada punto negro representa un nodo N y cada línea representa un elemento o segmento. B) Esquema para el caso a analizar a lo largo del perfil de suelo húmedo en 1D, es decir, a lo largo de la profundidad del suelo x.



Fuente: elaboración propia

El método de elementos finitos, conduce finalmente a la ecuación matricial 17.

$$[P_w]^{j+1,k}\{h\}^{j+1,k+1}=\{F_w\} \quad (17)$$

Donde $[P_w]$ es un matriz simétrica, las entradas d_i, e_i y f_i del vector $\{F_w\}$

Escenarios de simulación en Hydrus

La simulación consistió en predecir el flujo de agua en un perfil de suelo con pendiente de dos o tres capas de 100 cm, abarcando la profundidad efectiva de raíz del árbol de aguacate Hass. Para ello, fueron tomados un episodio de humedecimiento generado por precipitación y uno de secado, con una extensión de tiempo de observación de cuatro días. Esto se hizo en los tres puntos de monitoreo, en las tres fincas objeto de análisis, en el mes de agosto de 2020, la simulación utilizó el módulo directo de Hydrus 1D, teniendo en cuenta datos meteorológicos, valor de potencial mátrico antes del inicio de la ocurrencia del evento,

profundidad de horizontes, textura del suelo en cada horizonte, valor de conductividad hidráulica saturada y pendiente del terreno.

El periodo de humedecimiento generado por una precipitación en Laurentina, ocurrió el 18 de agosto de 2020, con un valor de 22.61 mm, con un periodo de observación hasta el 21 de agosto, el periodo de secado corresponde a aquellos días donde no hubo humedad del suelo por precipitación o riego, el cual se seleccionó desde el 6 hasta el 9 de agosto. En Ponceña, el evento de humedecimiento ocurrió el 14 de agosto con una precipitación de 15.97 mm y el de secado el 7 de agosto. Finalmente, en El Olival el periodo de humedecimiento y secado ocurrieron el 13 y 7 de agosto respectivamente, con la precipitación de 16.24 mm.

El perfil de suelo estaba inicialmente con una carga de presión para cada punto de monitoreo y para cada episodio. En los tres casos se implementó una condición de contorno atmosférica con escorrentía superficial (Atmospheric BC with surface Run off) para el límite superior y una condición de drenaje libre (Free Drainage) para el límite inferior. Se considera la evapotranspiración activa durante todos los días conforme al cálculo hecho con la ecuación de Penman Monteith. Las raíces se distribuyen de manera lineal hasta los 75 cm.

Se trabajó con 384 datos meteorológicos para cada episodio seleccionado, con una total de 1.125 datos por cada finca, correspondientes a datos de cada 15 min, a partir de esta información se calculó la evapotranspiración potencial diaria con Hydrus-1D y se definieron los periodos de precipitación exactos.

Calibración y validación de resultados

La calibración del modelo se hizo en cada finca y punto de monitoreo con el evento de precipitación, tomando en cuenta los parámetros hidráulicos Ks y θ_s; posteriormente, se realizaron las simulaciones de los eventos de secado, con los mismos parámetro calibrados. En la etapa de validación, fueron comparados los datos de potencial mátrico simulados y los reales, obtenidos con los sensores instalados en campo por medio del cálculo del error con la ecuación 21, las simulaciones ejecutadas, se consideraron validas cuando $\%E$ era máximo del 25%.

$$\%E = \frac{V_R - V_S}{V_R} * 100 \qquad 21$$

Resultados y discusión

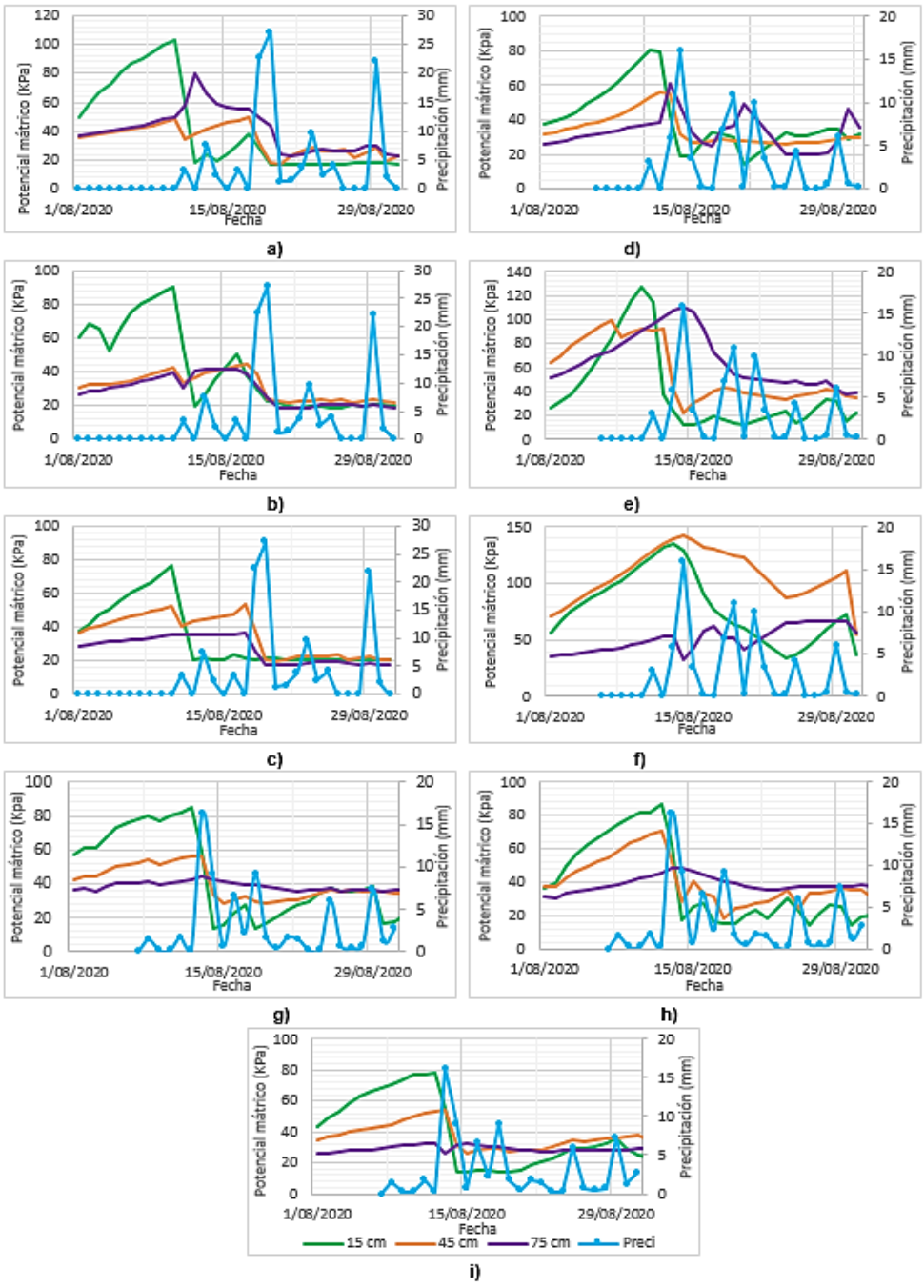
Análisis del potencial mátrico y la precipitación

La figura 5 muestra la variación del promedio diario de potencial mátrico en agosto para los tres puntos de monitoreo a las tres profundidades, en las fincas de estudio. De acuerdo con el balance hídrico, este mes presenta condiciones secas, con pocas lluvias y necesidad de riego; este año, mostró una condición inusual, con precipitaciones que mantuvieron las exigencias hídricas del cultivo, aproximadamente hasta la mitad del mes. Sin embargo, hasta el día 10 o 12, se mantuvo una condición seca con registros de potencial mátrico en el suelo que alcanzaron valores de: entre 40 y 100 KPa a 15 y 45 cm y entre 30 y 80 KPa a 75 cm para Laurentina; entre 40 y 140 KPa para 15 y 45 cm y entre 20 y 100 KPa a 75 cm para Ponceña y finalmente, entre 40 y 87 KPa para 15 y 45 cm y entre 30 y 50 KPa para 75 cm en El Olival.

El potencial mátrico se mantuvo con los valores más bajos para las condiciones secas a los 75 cm, debido a que es la zona que menos evapora, posteriormente con las precipitaciones, se recarga de agua, manteniendo en general, valores de potencial mátrico inferiores. En las condiciones de precipitación, su comportamiento

es fluctuante. Para el PM3 de las fincas Laurentina y Ponceña, después del evento de precipitación del 18 y 14 de agosto respectivamente, se observó que a 45 y 75 cm ocurre una disminución pero a 15 se mantiene constante para Laurentina, en el caso de Ponceña ocurre una disminución instantánea a los 75 cm y muy Paulatina a los 15 y 45 cm, Esto significa que las profundidades inferiores reciben primero el agua que las superiores que son las más cercanas a la superficie del suelo, situación que se explica en la siguiente sección.

Figura 5. Valores de potencial mátrico influenciados por la precipitación a lo largo de agosto en el punto de monitoreo (PM) a las profundidades de 15, 45 y 75 cm. a) PM1 Laurentina, b) PM2 Laurentina, c) PM3 Laurentina, d) PM1 Ponceña, e) PM2 Ponceña, f) PM3 Ponceña g) Olival PM1, h) Olival PM2, i) Olival PM3



Fuente: elaboración propia

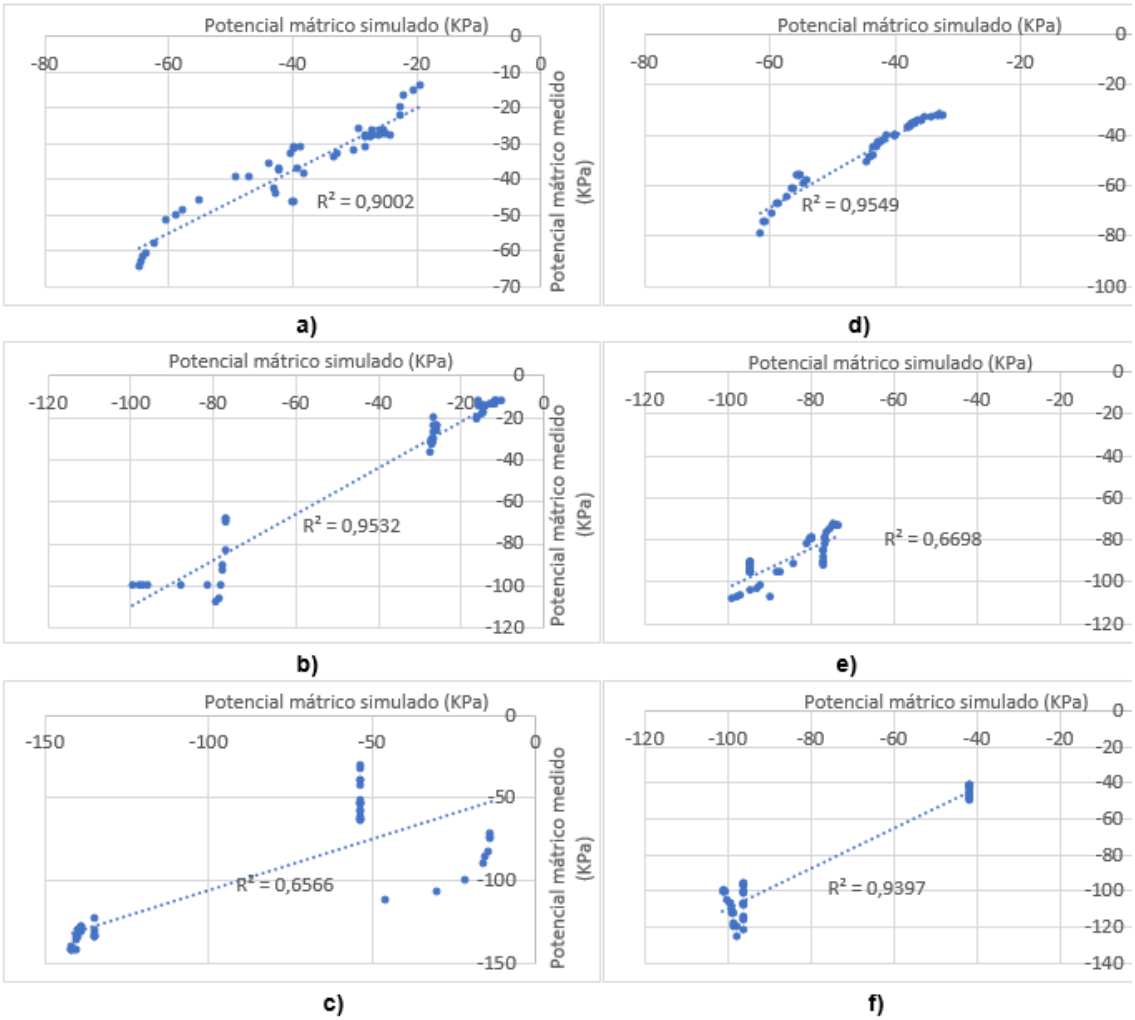
Calibración y validación del modelo Hydrus -1D

Para la calibración del modelo por estimación directa utilizando los datos de potencial mátrico y las condiciones climáticas, se empleó la conductividad hidráulica saturada y el contenido de humedad a saturación para calibración al igual que [39, 4]. El potencial mátrico se ajusta a los valores medidos en las profundidades de 15, 45 y 75 cm para los cuatro días de simulación en cada evento de precipitación y secado, en los lotes de las tres fincas analizadas como se muestra en las figuras 7-8 coincidiendo con los resultados encontrados por [4]. El valor de R2 alcanzó 0.982, el porcentaje de error varió entre 0 y 25 % para eventos de precipitación y entre 0 y 22 % para evento de secado; estando en su mayoría, errores inferiores al 12 %. El error fue menos recurrente y más bajo para los eventos de secado en todas las fincas y presentó en ambos eventos, un comportamiento muy variable sin tener una profundidad del perfil de suelo con error marcado, contrario a lo encontrado por [4] donde los errores más altos fueron a profundidades mayores, estando afectados por el nivel freático debido a que es zona plana, contario a lo trabajado aquí que fue zona de ladera.

Los parámetros hidráulicos derivados de la simulación de eventos de precipitación fueron empleados para las simulaciones de secado después del proceso de validación. Se descartaron precipitaciones inferiores a 1.5 mm, porque al realizar la simulación, se obtuvo que generaban impactos muy significativos en la disminución del potencial mátrico en el suelo, no coincidiendo con los registrado por los sensores en las tres fincas. De esto, se analizó que posiblemente, las precipitaciones por debajo de 1.5 mm, fueron captadas por la zona frondosa del árbol y por la capa vegetal que cubre la superficie del suelo. Al descartarlas se obtuvieron los resultados satisfactorios que muestran las figuras 7 y 8.

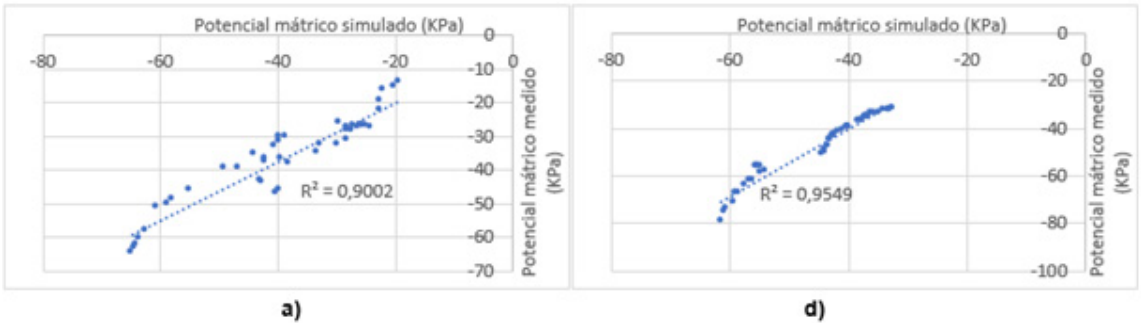
Los sensores del PM3, en las fincas Laurentina y Ponceña, a 45 y 75 cm, registraron la disminución de potencial mátrico ante la ocurrencia de un evento de precipitación, contrario a los instalados a 15 cm; esto se atribuye a la frondosidad del árbol, la cual impide que el agua llegue al suelo instantáneamente; además, a la pendiente del terreno que facilita el movimiento del agua en las zonas más profundas proveniente de la parte alta. En Hydrus, para la condición de contorno “Atmospheric BC with surface Run off”, ocurre un cambio gradual de humedad desde la superficie del suelo hasta las profundidades mayores, lo que generó un R2 bajo de 0.6566 y 0.7514 según muestran las figuras 7.c y 8.c al realizar las comparaciones, con porcentajes de error alto. Sin embargo, la calibración del evento de precipitación del PM3 fue útil para predecir satisfactoriamente el evento de secado en ambas fincas con R2 de 0.9654 y 0.9397. Adicionalmente, por medio de los resultados de las simulaciones, fue notable que la pendiente en Hydrus no produjo cambios significativos a los valores simulados con un flujo vertical.

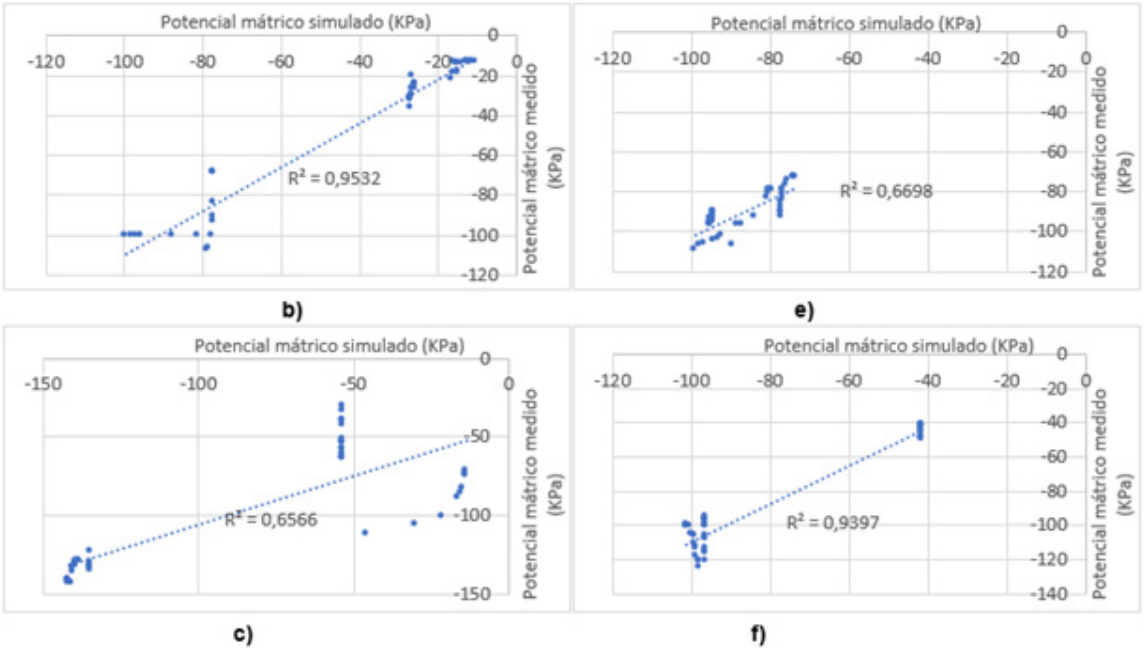
Figura 7. Validación de los valores de potencial mátrico en las profundidades de 15, 45 y 75 cm simulados y medidos para la finca Laurentina. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



Fuente: elaboración propia

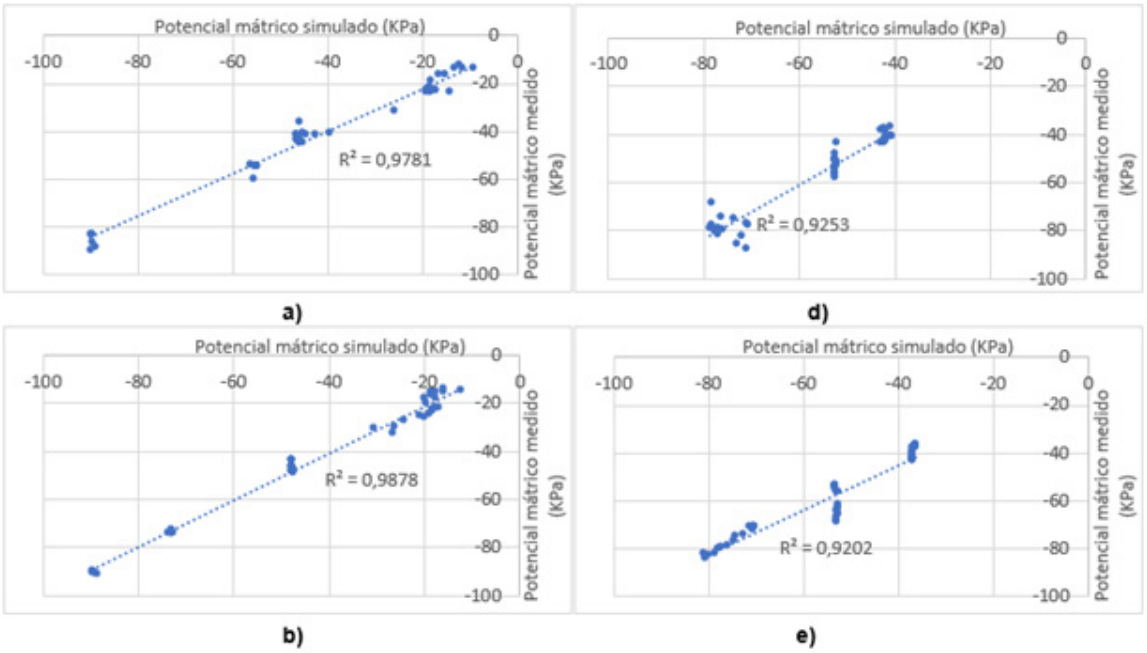
Figura 8. Validación de los valores de potencial mátrico en las profundidades de 15,45 y 60 cm simulados y medidos para la finca Ponceña en cm.c.a. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.

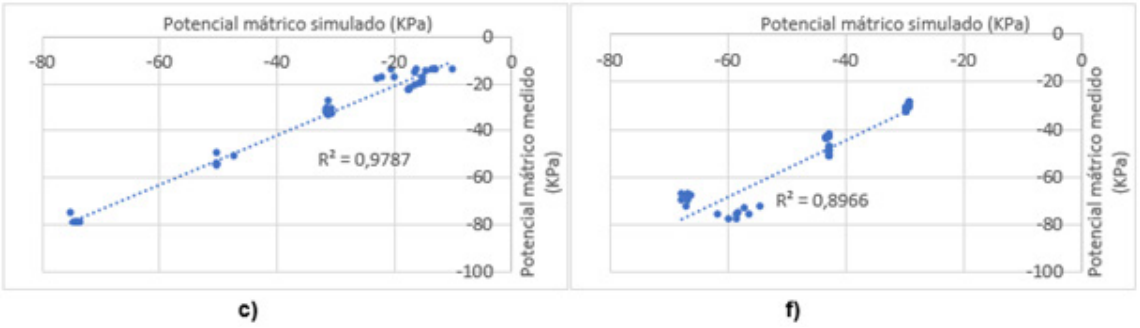




Fuente: elaboración propia

Figura 9. Validación de los valores de potencial mátrico en las profundidades de 15,45 y 75 cm simulados y medidos para la finca El Olival en cm.c.a. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



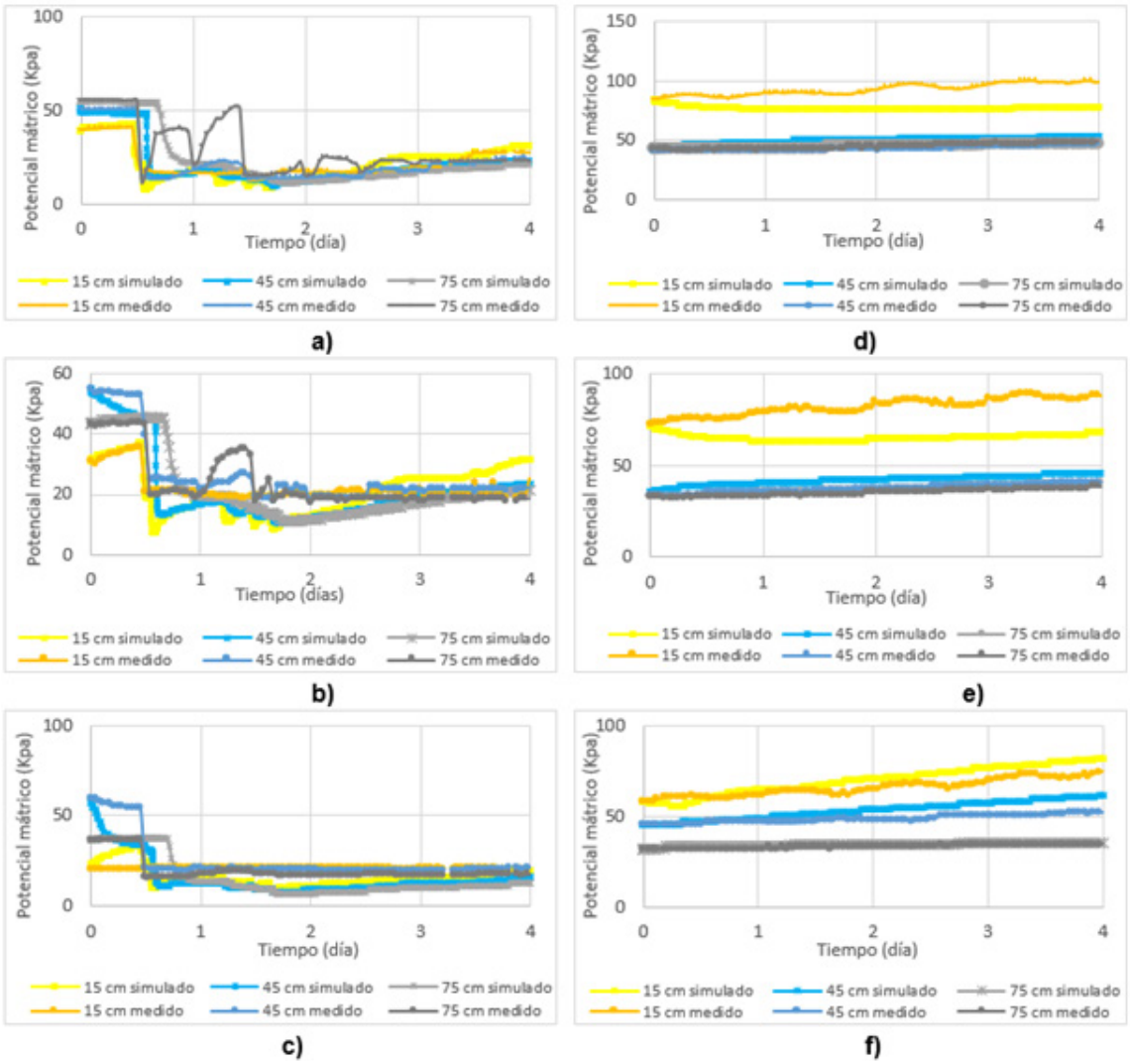


Fuente: elaboración propia

Las figuras 10-12 muestran la variación del potencial mátrico simulado y medido en función del tiempo para los eventos de precipitación y secado en los tres PM, a las tres profundidades en las tres fincas. En los gráficos se evidencia directamente la similitud del potencial mátrico que fue simulado, con los valores reales medidos en campo, corroborando las comparaciones que dieron lugar a los valores de R2. Se obtienen mayores variaciones cuando se presenta infiltración del agua en el suelo que cuando se simula el proceso de secado. Para el evento de precipitación que venían de una época seca, con presencia casi nula de lluvias, se observa un descenso drástico de potencial mátrico, después, pequeñas variaciones que contemplan aumentos y disminuciones para la finca Laurentina a los 15 y 45 cm y un ascenso de los valores más marcado a los 15 cm generado por le evaporación del agua en el suelo.

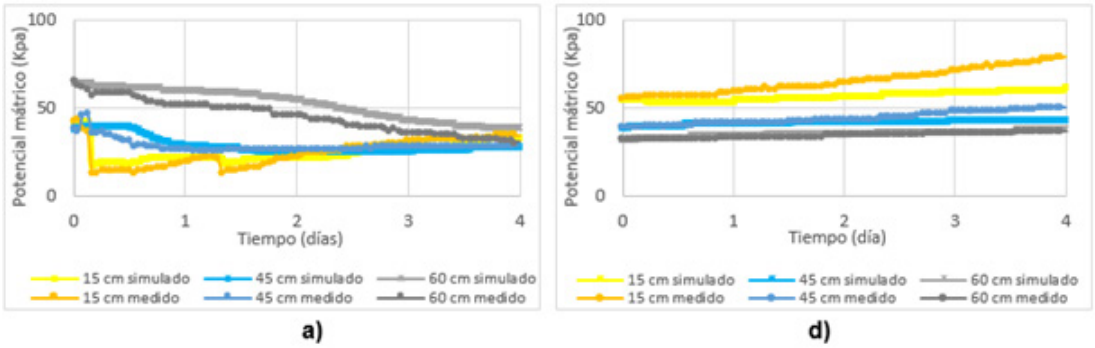
La finca Ponceña evidencia un comportamiento menos común, para PM2 hay pequeños descenso a los 15 y 45 cm y posterior ascenso del potencial mátrico y ascenso a los 60 cm que se mantiene constante y después disminuye, generado por la pérdida de agua y la posterior infiltración, no obstante el programa simula un descenso leve inmediato por infiltración de agua que realmente no ocurre en el PM2. En PM3 tuvo el mismo comportamiento de PM2 a los 15 y 45 cm y un descenso drástico para los 60 cm, por aporte de agua proveniente de la parte alta, favoreciendo la infiltración subsuperficial debido a la pendiente. La finca El Olival tuvo el mismo comportamiento de la finca Laurentina a los 15 y 45 cm pero a los 75 cm, en ninguno de los tres PM, presentó un cambio en el potencial mátrico, estando casi constante, lo que implica que el agua a esta profundidad no infiltraba ni se evaporaba, generado posiblemente por la presencia de horizontes de arcillas.

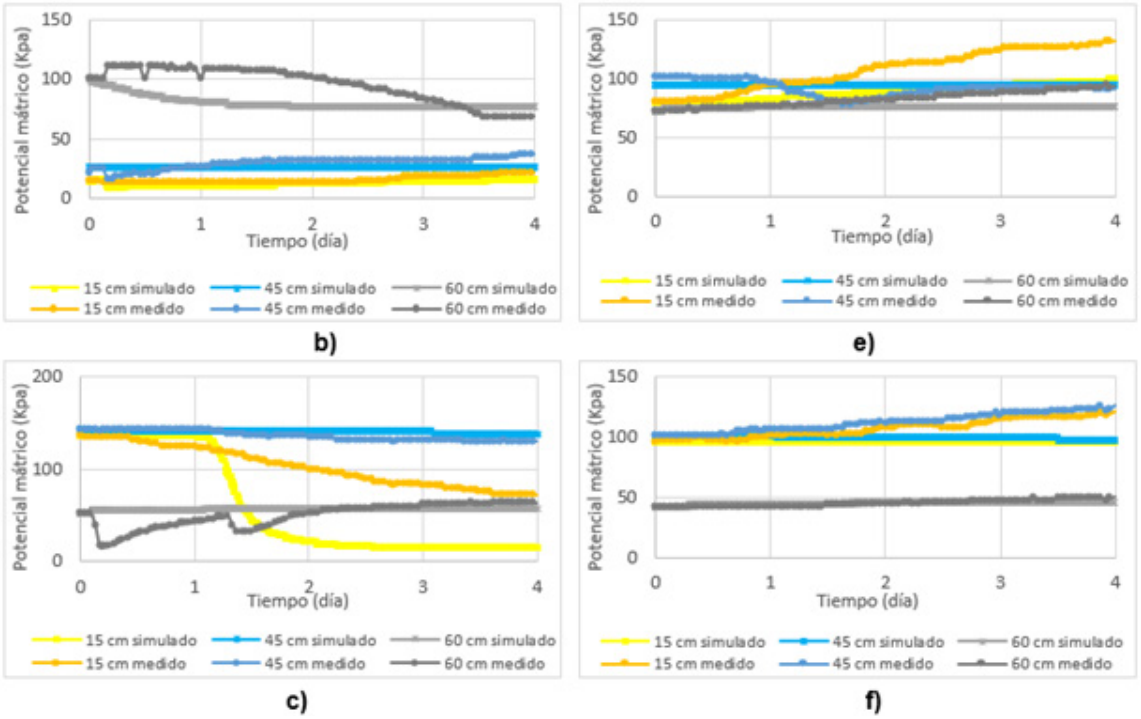
Figura 10. Comparación del potencial mátrico simulado y medido en función del tiempo para la finca Laurentina a los 15, 45 y 75 cm. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



Fuente: elaboración propia

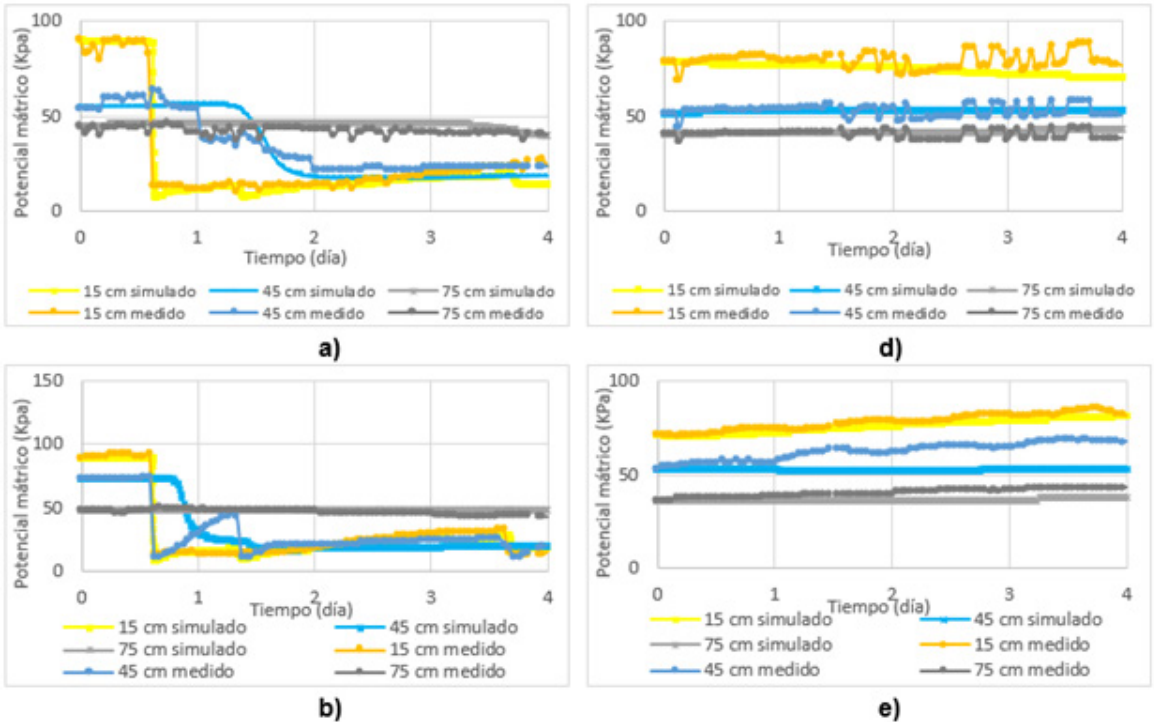
Figura 11. Comparación del potencial mátrico simulado y medido en función del tiempo para la finca Ponceña a los 15, 45 y 60 cm. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.

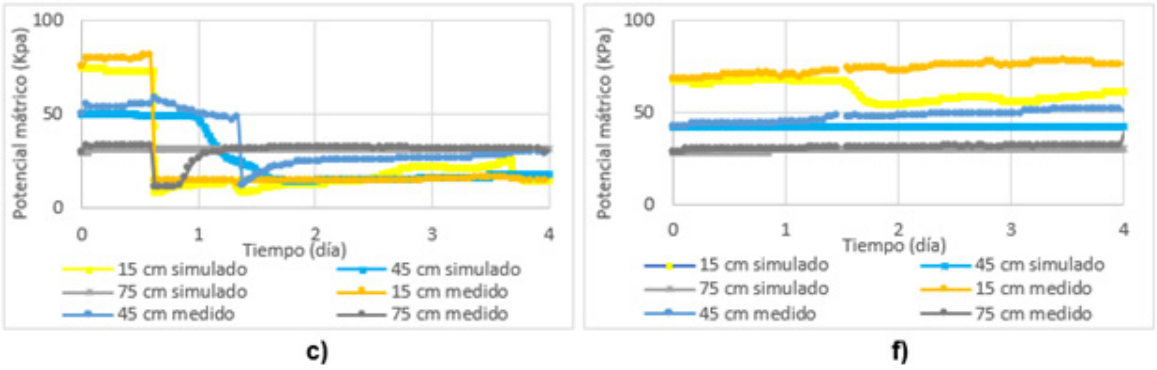




Fuente: elaboración propia

Figura 12. Comparación del potencial mátrico simulado y medido en función del tiempo para la finca El Olival a los 15, 45 y 75 cm. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.





Fuente: elaboración propia

Movimiento del agua en el suelo

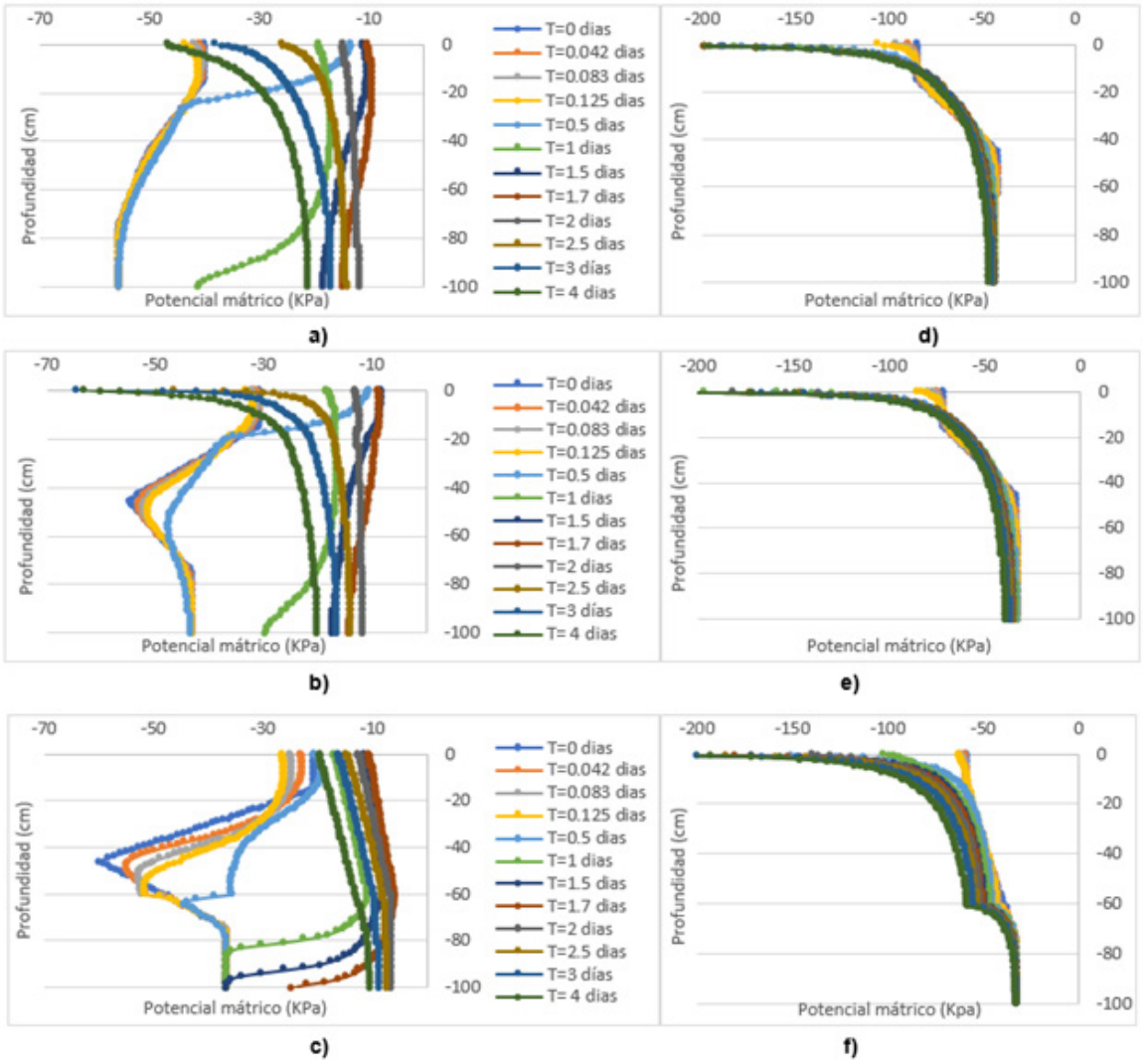
Las figuras 13-15 muestran el valor del potencial mátrico simulado a lo largo del perfil de suelo de 100 cm de profundidad. La finca Laurentina en el evento de precipitación ocurrido desde el 18 de agosto de 2020, registra el primer cambio de humedad a los 0.5 días hasta los 20 cm de profundidad, 0.5 días después (T=1 días) el agua ha llegado hasta los 95 cm de profundidad y se mantiene un incremento en la humedad hasta los 1.7 días en los 100 cm de suelo, llegando a 10 KPa; posteriormente, comienza a descender la humedad y por tanto a incrementarse el potencial mátrico hasta el día 4. Estos gráficos muestran la facilidad que presenta el suelo franco arenoso, de esta finca para permitir la infiltración del agua en el suelo y su distribución uniforme del agua a lo largo de la profundidad efectiva de raíces de la planta de aguacate Hass. En el evento de secado simulado desde el 6 de agosto de 2020, los tres PM alcanzan los 200 Kpa de potencial mátrico en la superficie del suelo, a los 15 cm para el PM1 y PM2 ocurre una diminución del potencial mátrico, generado por un incremento de la vapor de agua que humedece el suelo, en el PM3 ocurre un incremento del potencial mátrico de 57 a 77 KPa. A los 45 cm todos los PM presentaron un incremento y a los 75 cm tuvo un incremento leve en el orden de 2 a 4 KPa.

Agropecuaria Ponceña presentó la mayor variabilidad en la distribución de agua en el suelo. La ocurrencia de una precipitación da lugar a una disminución del potencial mátrico, generando una distribución uniforme de agua hasta los 35 cm para los PM1 y PM2, esta finca, registra el primer cambio de humedad a los 0.125 días que sigue en aumento hasta los 0.5 días con un Potencial mátrico de 20 KPa, donde posteriormente comienza a disminuir, lo que proporciona un incremento en el potencial mátrico. En el PM1, de los 40 a los 75 cm, se produce un incremento de la humedad, fruto de la infiltración del agua en el suelo que no se mantiene uniforme a lo largo de la profundidad. En el PM2, entre los 50 y 58 cm, sucede un incremento del potencial mátrico, como resultado del cambio de horizonte del suelo franco arenoso, con una alta conductividad hidráulica que permite el flujo del agua rápido y una alta evaporación. Entre los 58 y 80 cm ocurrió una diminución del potencial mátrico, por la infiltración. Se descarta el análisis de PM3 en el evento de precipitación por su baja correspondencia, sin embargo, la calibración arrojó resultados satisfactorios para el evento de secado, que si fue analizado. El evento de secado muestra un aumento del potencial mátrico hasta los 30 cm de profundidad que llega a 200 o 150 KPa en la superficie del suelo.

La finca El Olival, presentó una disminución en el potencial mátrico hasta 13 KPa en T= 1 día, que se prolongó hasta los dos días; después comenzó el aumento del potencial mátrico hasta el día tres, donde, ocurrida otra precipitación, disminuye el potencial mátrico en T= 4 días. En T= 1 día, el agua llega aproximadamente a los 30 cm para PM1 y 50 cm de profundidad para PM2 Y PM3, con una distribución uniforme hasta los 30 o 40 cm respectivamente, después ocurre una disminución variable y gradual a lo largo de la profundidad de

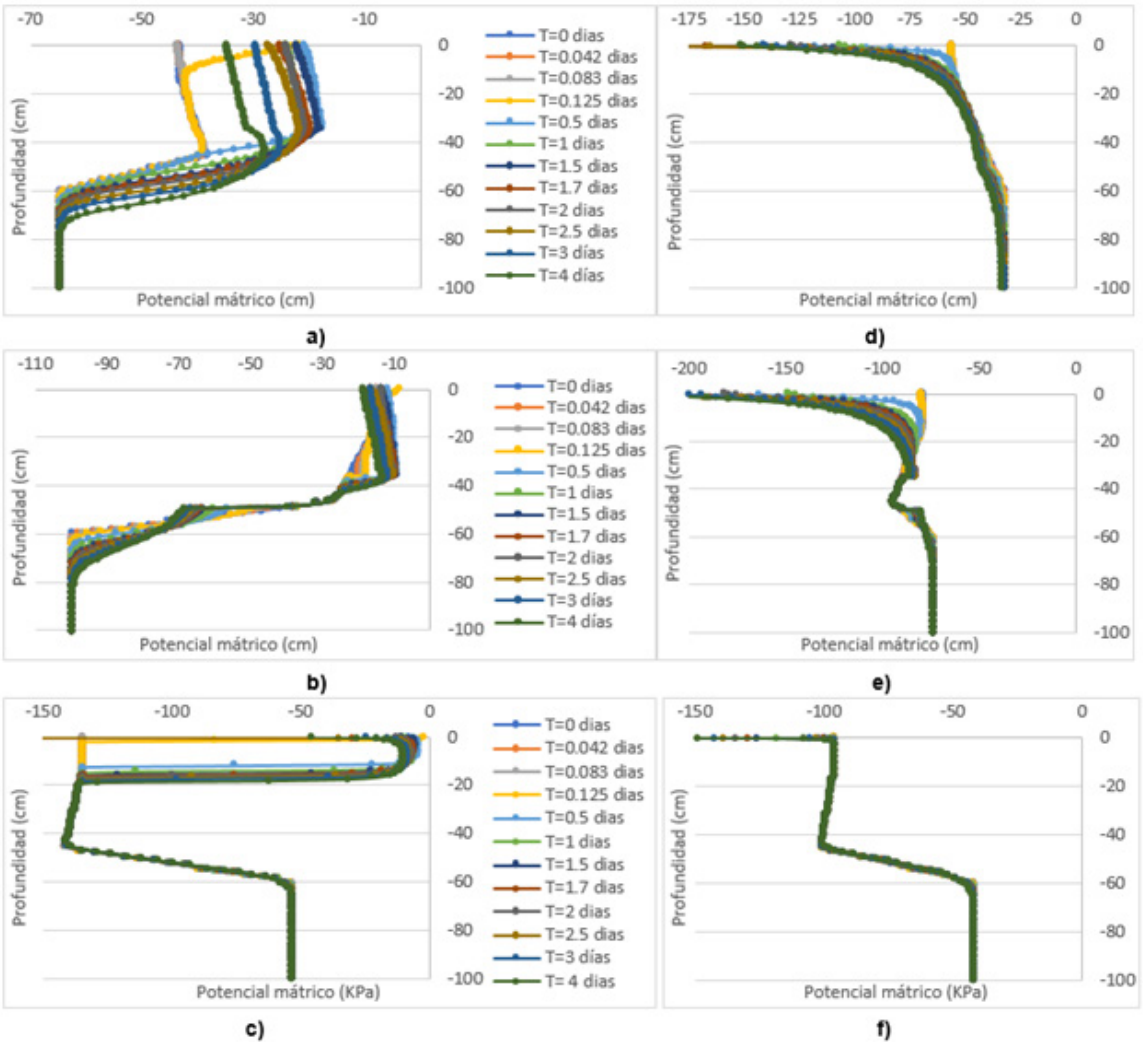
raíces del árbol de aguacate Hass, hasta los 70 u 80 cm. En el día cuatro, la distribución es completamente uniforme hasta los 70 cm de profundidad. En los eventos de secado, el PM1 y PM3 tuvieron comportamientos similares, con aumentos del potencial mátrico hasta el día 1, posteriormente, el potencial mátrico sufrió una disminución hasta los 20 cm de profundidad por una precipitación de 1 mm, que no generó ningún cambio en el PM2, por el contrario ocurrió un aumento del potencial mátrico, lo que implica que en esta finca, las precipitaciones inferiores a 1.5 mm no generan la misma influencia.

Figura 13. Potencial mátrico simulado a lo largo del perfil de suelo para la finca Laurentina. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



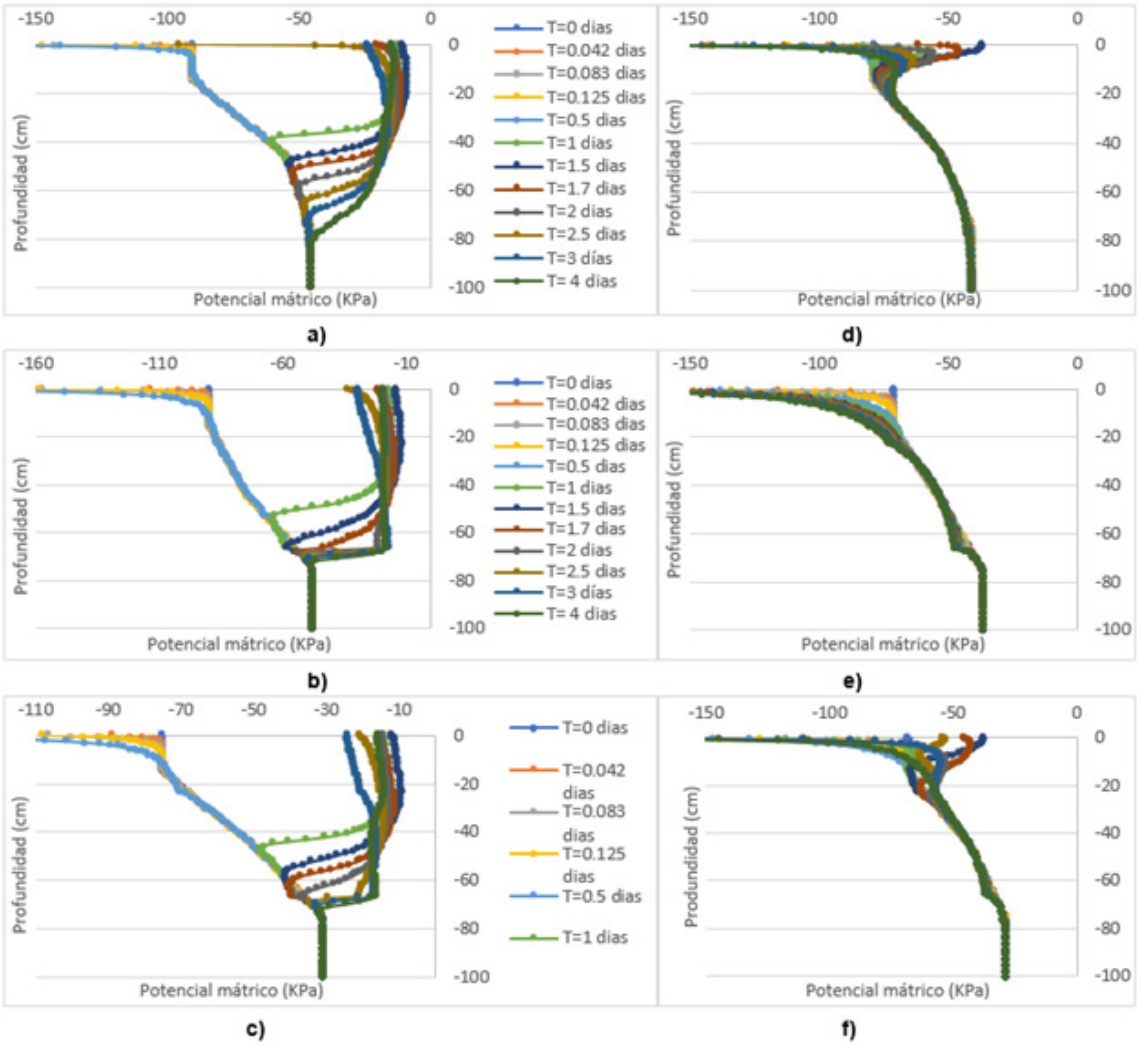
Fuente: elaboración propia

Figura 14. Potencial mátrico simulado a lo largo del perfil de suelo para la finca Ponceña. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Potencial mátrico simulado a lo largo del perfil de suelo para la finca El Olival. a) evento de precipitación PM1 (punto de monitoreo), b) evento de precipitación PM2, c) evento de precipitación PM3, d) evento de secado PM1, e) evento de secado PM2, f) evento de secado PM3.



Fuente: elaboración propia

El análisis de la distribución del agua en el suelo para las tres fincas, destaca la importancia de la aplicación del riego cuando no ocurren eventos de precipitación debido a que, antes de la ocurrencia del primer evento de precipitación de agosto, después de los 50 cm de profundidad se alcanzaron valores de potencial mátrico que oscilan entre 50 y 100 KPa, limitando la disponibilidad de agua para las raíces de aguacate Hass. Se destaca la variabilidad en la distribución de agua en el suelo para la finca agropecuaria Ponceña, influenciada en gran medida por los cambios bruscos en la pendiente del terreno, y la variabilidad espacial del suelo, así como el cambio de horizontes, lo que genera un reto en la forma de aplicación adecuado del riego para lugares con estas condiciones. Por otra parte, las fincas Laurentina y El Olival presentaron una similitud en la distribución del agua en el suelo entre los puntos de monitoreo, infiltrándose de manera uniforme a lo largo del perfil de suelo para la primera y hasta los 70 u 80 cm, con más variabilidad, para la segunda.

Conclusiones

En ladera, los árboles ubicados en la zona baja, tienden a recibir primero la humedad en las mayores profundidades, debido a la infiltración proveniente de las partes altas del terreno, esto se demostró con los resultados de este estudio, situación que se ve favorecida por la pendiente del terreno, permitiendo el flujo del agua subsuperficial en sentido de la pendiente. Este caso no se pudo simular satisfactoriamente en Hydrus-1D para la condición de contorno "Atmospheric BC with surface Run off" en PM3.

La finca Laurentina presentó una distribución de agua uniforme después del evento de precipitación por casi dos días, manteniendo un potencial mátrico entre -10 y -40 KPa, estando por debajo y cercano a -30 KPa, estos son valores óptimos porque aseguran que toda la profundidad efectiva de raíces del árbol de aguacate Hass llegue a capacidad de campo.

La finca Ponceña presentó una distribución de agua uniforme por dos días hasta los 35 cm, con potencial mátrico entre -15 y -30 KPa, a mayores profundidades, disminuye muy poco el potencial mátrico, manteniendo valores superiores a los -50 KPa, esto implica que no toda la profundidad de raíces, en especial la efectiva, se encuentra a capacidad de campo, lo que induce a la aplicación del riego que se presume puede funcionar mejor en riego con tiempo fraccionado [40, 41].

La finca El Olival presentó una distribución de agua uniforme hasta los 60 cm de profundidad con valores de potencial mátrico entre -10 y -15 KPa, llegando toda la profundidad efectiva de raíces a valores inferiores a -30 KPa, tomado en este estudio, como valor de referencia para capacidad de campo.

Las precipitaciones mayores a 10 mm inducen una disminución en el potencial mátrico en casi toda la profundidad efectiva de raíces con valores que dejaron el suelo a presiones por debajo de -30 KPa (capacidad de campo) para la clase textural que presentan las fincas de tipo franco arenoso, arenoso francoso y franco arcillo arenoso.

El evento de secado, demostró en las tres fincas, la necesidad de aplicación de riego en este cultivo con potenciales mátricos altos, superiores a los -50 KPa.

Referencias bibliográficas

1. Ministerio de Agricultura y Desarollo Rural (MinAgricultura), "Colombia se convierte en productor de aguacate Hass de clase mundial." MinAgricultura, Colombia, 2019.
2. C. Gutierrez, "Desde el Valle del Cauca se exporta aguacate hass al mercado norteamericano," *Gobernación del Valle del Cauca*, Cali, Colombia, 17-Jun-2019.
3. T. H. Skaggs, T. J. Trout, J. Šimůnek, and P. J. Shouse, "Comparison of HYDRUS-2D Simulations of Drip Irrigation with Experimental Observations," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 130, no. 4, pp. 304–310, 2004.
4. H. Zhou and W. zhi Zhao, "Modeling soil water balance and irrigation strategies in a flood-irrigated wheat-maize rotation system. A case in dry climate, China," *Agric. Water Manag.*, vol. 221, pp. 286–302, 2019.
5. C. Jyotiprava Dash, A. Sarangi, D. K. Singh, A. K. Singh, and P. P. Adhikary, "Prediction of root zone water and nitrogen balance in an irrigated rice field using a simulation model," *Paddy Water Env.*, vol. 13, pp. 281–290, 2015.

6. X. Besoain, C. Arenas, and E. S. B. A. Latorre, "Efecto del Periodo de Inundación en el Desarrollo de la Tristeza del Palto (Persea americana), Causada por Phytophthora cinnamomi," *Cienc. e Investig. Agrar.*, vol. 32, no. 2, pp. 97–103, 2005.
7. G. Doupis, N. Kavroulakis, G. Psarras, and I. E. Papadakis, "Growth , photosynthetic performance and antioxidative response of ' Hass ' and ' Fuerte ' avocado (Persea americana Mill .) plants grown under high soil moisture," *Photosynthetica*, vol. 55, no. 4, pp. 655–663, 2017.
8. R. E. Sterne, G. A. Zentmyer, and M. R. Kaufmann, "The Effect of Matric and Osmotic Potential of Soil on Phytophthora Root Disease of Persea indica Tension Plate Pressure Plate," *Ecol. Epidemiol.*, vol. 67, pp. 1491–1494, 1977.
9. A. Tafteh and A. R. Sepaskhah, "Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields," *Agric. Water Manag.*, vol. 113, pp. 19– 29, 2012.
10. G. Wang, J. Chen, Q. Zhou, X. Chu, and X. Zhou, "Modelling analysis of water-use efficiency of maize in Heihe River Basin," *Phys. Chem. Earth*, vol. 96, pp. 50–54, 2016.
11. L. W. Zhao and W. Z. Zhao, "Evapotranspiration of an oasis-desert transition zone in the middle stream of Heihe River, Northwest China," *J. Arid Land*, vol. 6, no. 5, pp. 529–539, 2014.
12. Y. Wang, C. Zhao, Z. Xu, and H. Peng, "Estimate crop evapotranspiration of spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin, Northwestern China," *2010 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 1, pp. 1537–1540, 2010.
13. K. He, Y. Yang, Y. Yang, S. Chen, Q. Hu, X. Liu, and F. Gao, "HYDRUS Simulation of Sustainable Brackish Water Irrigation in a Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in the North China Plain," *Water*, vol. 9, no. 7, pp. 1–19, 2017.
14. G. Moreno, C. Pliego, D. Sarmiento, A. Barceló, and E. Martínez, "Yield and fruit quality of avocado trees under different regimes of water supply in the subtropical coast of Spain," *Agric. Water Manag.*, vol. 221, pp. 192–201, 2019.
15. E. Holzapfel, J. A. de Souza, J. Jara, and H. C. Guerra, "Responses of avocado production to variation in irrigation levels," *Irrig. Sci.*, vol. 35, no. 3, pp. 205–215, 2017.
16. A. Silber, Y. Israeli, M. Levi, A. Keinanb, O. Shapira, G. Chudi, A. Golanb, M. Noy, I. Levkovitcha, and S. Assouline, "Response of 'Hass' avocado trees to irrigation management and root constraint," *Agric. Water Manag.*, vol. 104, pp. 95–103, 2012.
17. E. Román-paoli, F. M. Román-pérez, and J. Zamora-echevarría, "Evaluation of microirrigation levels for growth and productivity of avocado trees 12," *J. Agric. Univ.*, vol. 93, no. 3–4, pp. 173–186, 2009.
18. Z. D. Du and L. T. Shao, "Simulation of deep percolation in fields with greater depth of groundwater," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 448–453, no. 1, pp. 1158–1164, 2014.
19. D. Li and M. Shao, "Temporal stability analysis for estimating spatial mean soil water storage and deep percolation in irrigated maize crops," *Agric. Water Manag.*, vol. 144, pp. 140–149, 2014.
20. D. Ventrella, M. Castellini, S. Di Prima, P. Garofalo, and L. Lassabatère, "Assessment of the Physically-Based Hydrus-1D Model for Simulating the Water Fluxes of a Mediterranean Cropping System," *Water*, vol. 11, pp. 2–19, 2019.
21. K. L. Grecco, J. H. de Miranda, L. K. Silveira, and M. T. van Genuchten, "HYDRUS-2D simulations of water and potassium movement in drip irrigated tropical soil container cultivated with sugarcane," *Agric. Water Manag.*, vol. 221, pp. 334–347, 2019.

22. D. Mbabazi, K. W. Migliaccio, J. H. Crane, C. Fraisse, L. Zotarelli, K. T. Morgan, and N. Kiggundu, "An irrigation schedule testing model for optimization of the Smartirrigation avocado app," *Agric. Water Manag.*, vol. 179, pp. 390–400, 2017.

23. B. Xi, M. Bloomberg, M. Watt, Y. Wang, and L. Jia, "Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid Populus tomentosa plantation located on the North China Plain," *Agric. Water Manag.*, vol. 176, pp. 243–254, 2016.

24. M. Kandelous and J. Šimůnek, "Comparison of numerical , analytical , and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation," *Irrig. Sci.*, vol. 28, pp. 435–444, 2010.

25. X. Tan, D. Shao, and H. Liu, "Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D," *Agric. Water Manag.*, vol. 132, pp. 69–78, 2014.

26. C. Xu, W.-Z. Zeng, J.-W. Wu, and J.-S. Huang, "Effects of different irrigation strategies on soil water, salt, and nitrate nitrogen transport," *Ecol. Chem. Eng. S*, vol. 22, no. 4, pp. 589–609, 2015.

27. Y. Li, J. Šimůnek, L. Jing, Z. Zhang, and L. Ni, "Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D," *Agric. Water Manag.*, vol. 142, pp. 38–46, 2014.

28. Y. Wu, A. Yang, Y. Zhao, and Z. Liu, "SIMULATION OF SOIL WATER MOVEMENT UNDER BIOCHAR APPLICATION BASED ON THE HYDRUS-1D IN THE BLACK SOIL REGION OF CHINA," *Appl. Ecol. Environ. Res.*, vol. 17, no. 2, pp. 4183–4192, 2019.

29. S. Shekhar, D. R. Mailapalli, N. S. Raghuwanshi, and B. S. Das, "Hydrus-1D model for simulating water fow through paddy soils under alternate wetting and drying irrigation practice," *Paddy Water Environ.*, 2019.

30. R. F. Vázquez, D. Isidoro, and B. Sayah, "Modeling the unsaturated flow associated with a border irrigation event on an alfalfa plot," *Rev. Semest. la DIUC MASKANA*, vol. 4, no. 1, pp. 91–106, 2013.

31. V. Phogat, M. Mahadevan, M. Skewes, and J. W. Cox, "Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design," *Irrig. Sci. Sci*, vol. 30, no. 1, pp. 315–333, 2012.

32. H. Li, J. Yi, J. Zhang, Y. Zhao, B. Si, R. L. Hill, L. Cui, and X. Liu, "Modeling of Soil Water and Salt Dynamics and Its Effects on Root Water Uptake in Heihe Arid Wetland, Gansu, China," *Water*, vol. 7, no. 1, pp. 2382–2401, 2015.

33. J. Šimůnek, M. T. Van Genuchtenb, and M. Šejnac, "Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes," *Vadose Zo. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 587–600, 2008.

34. L. Hou, Y. Zhou, H. Bao, and J. Wenninger, "Simulation of maize (Zea mays L.) water use with the HYDRUS-1D model in the semi-arid Hailiutu River catchment, Northwest China," *Hydrol. Sci. J.*, vol. 62, no. 1, pp. 93–103, 2016.

35. D. Autovino, G. Rallo, and G. Provenzano, "Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under di ff erent irrigation systems with Hydrus-2D : Model performance and scenario analysis," *Agric. Water Manag.*, vol. 203, no. 2017, pp. 225–235, 2018.

36. R. S. Van Pelt and P. J. Wierengab, "Temporal Stability of Spatially Measured Soil Matric Potential Probability Density Function," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 65, no. 3, pp. 668–677, 2001.

37. Genuchten, "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," *SOIL SCI. SOC. AM. J.*, vol. 44, pp. 892–898, 1980.

38. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), *Evapotranspiración del cultivo . Guias para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO, 2006.

39. C. J. Obando Gamboa, "Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos: lluvia ácida", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 5, n.º 2, pp. 190-206, 2017. DOI:https://doi.org/10.17081/invinno.5.2.2761

40. K. Polo Bornachera., D.D. López Juvinao, and A. Henríquez Jaramillo, "Transferencia tecnológica para la producción limpia en la minería de materiales aluviales en La Guajira, Colombia," Investigación e Innovación en Ingenierías ., vol. 8, pp. 6–20, 2020. DOI: https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3535

41. S. Shekhar, D. Rao, M. Narendra, S. Raghuwanshi, and B. Sankar, "Hydrus - 1D model for simulating water flow through paddy soils under alternate wetting and drying irrigation practice," *Paddy Water Environ*., vol. 18, no. 1, pp. 73–85, 2020.