

1 **PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA EN**
2 **UN CULTIVO DE TRIGO**

3 **Parameters controlling the deep percolation in a wheat crop**

4
5 **Eduardo Teófilo Salvador^{1,‡}, Guillermo Pedro Morales Reyes¹, María Vicenta Esteller**
6 **Alberich¹ y René Muciño Castañeda²**

7 ¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca –
8 Atlacomulco Km 14.5. Unidad San Cayetano. C.P. 50200.

9 [‡] Autor de correspondencia: ici.ts.eduardo2010@gmail.com

10 ² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria, C. P. 50100, Toluca, Estado
11 de México.

12
13 **RESUMEN**

14 Para estimar la percolación del agua en el suelo es común utilizar el método del balance hídrico, el
15 cual requiere de diversos datos diarios, los cuales muchas veces son incompletos o no son verificados en
16 campo, además de que existe cierta incertidumbre en la estimación de la evapotranspiración del cultivo. En
17 este trabajo se identificaron los parámetros que controlan la percolación profunda a partir de la estimación
18 de balances hídricos locales diarios con diferentes coeficientes de cultivo, utilizando para ello datos de
19 estaciones climatológicas y parámetros edafológicos. En el sitio de estudio se llevó a cabo un monitoreo
20 constante de las etapas fenológicas de un cultivo de trigo (temporal) y mensualmente se realizó un muestreo
21 de suelo durante un año en diferentes puntos dentro del sitio. Paralelamente, se realizó el acopio de datos
22 procedentes de estaciones climatológicas, la evaporación se midió con el tanque evaporímetro, se estimó
23 para la evapotranspiración del cultivo un coeficiente único, dual y ajustado por estrés con base en el manual
24 de la FAO, y, a partir de estos datos, se determinó la percolación profunda. Cuando la superficie del suelo
25 estaba saturada o sobresaturada, la evapotranspiración del cultivo fue despreciable, además el crecimiento
26 vertical máximo de la planta fue de 1.02 m y la profundidad de la raíz de 0.35 m. Precipitaciones diarias

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 superiores a 10 mm o acumulado de tres días consecutivos mayor de 18 mm de lluvia; propiciaron la
2 percolación profunda, pero ésta decreció a casi por goteo conforme aumentó el espesor de la franja radicular
3 de 0.30 m a 0.52 m. El crecimiento del cultivo, el espesor de la zona radicular y la incidencia de la
4 precipitación en la superficie del suelo controlaron la percolación profunda. Los valores obtenidos permiten
5 aproximar aún más el valor real de recarga del agua subterránea.

6

7 **Palabras clave:** *Evapotranspiración, profundidad radicular, recarga.*

8

9

SUMMARY

10 To evaluate the water percolation in the soil is common the water balance method, which requires
11 different daily data, which are often incomplete or aren't verified in field, in addition to some uncertainty
12 in the evapotranspiration of the crop. In this research, the parameters that control the deep percolation were
13 identified, bases on the estimation of daily local water balances with different crop coefficients, using data
14 from climatological stations and edaphic parameters. At the site of study was carried out a constant
15 monitoring of the phenological stages of a wheat crop (temporal), and monthly soil sampling was performed
16 for one year at different points within the site. At the same time, data were collected from climatological
17 stations, the evaporation was measured with the evaporimeter tank, evapotranspiration of the crop was
18 estimated for a single coefficient, dual and adjusted for stress based on the FAO manual, and from these
19 data was determined the deep percolation. When the soil surface was saturated or supersaturated the
20 evapotranspiration of the crop was negligible, in addition, the maximum vertical growth of the plant was
21 1.02 m and the depth of the root of 0.35 m. Daily rainfall greater than 10 mm or cumulative of three
22 consecutive days greater than 18 mm of rainfall; led to deep percolation, but this decreased to almost drip
23 as it increased the thickness of the root fring of 0.30 m to 0.52m. The growth of the crop, the thickness of
24 the root zone and the incidence of precipitation on the soil surface controlled the deep percolation. The
25 values obtained allow us to approach even more the actual value groundwater recharge.

26

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 ***Index words:*** *Evapotranspiration, root depth, recharge*

2

3

INTRODUCCIÓN

4

5 Actualmente es indispensable la estimación de la percolación profunda en la zona no saturada pues
6 es un dato imprescindible para conocer los procesos de recarga de un acuífero, pero las técnicas utilizadas
7 hoy en día presentan ciertas limitaciones, ya que los métodos indirectos no permiten realizar
8 comprobaciones de los resultados con medidas experimentales; y los métodos directos modifican la
9 estructura del suelo ocasionando flujos preferenciales (Arauzo *et al.*, 2007). Hoy en día es recurrente la
10 modelación numérica cuyos resultados son comparados con mediciones en lisímetros, pero estos últimos
11 reportan cierta variación en las mediciones (Soldevilla-Martínez *et al.*, 2014).

12 La implementación de diversos modelos numéricos está orientada a obtener mejores resultados,
13 tanto en el campo de predicción meteorológica como en temas hidrológicos (Botey & Moreno, 2015). Con
14 respecto a los modelos matemáticos de evaporación y transporte en medios porosos de agua líquida, estos
15 incorporan muchos factores empíricos de corrección, introducidos para que los cálculos concuerden con las
16 medidas experimentales (Grifoll, 2011). Así mismo, se han desarrollado modelos empíricos para simular
17 flujo de agua en suelo con presencia de macroporos, con base en curvas de conductividad hidráulica sintética
18 de Gerke y van Genuchten (Zavala *et al.*, 2012). También es común la modelación con imágenes satelitales
19 para estudiar la evolución temporal de la infiltración (Pedretti *et al.*, 2011), pero debe considerarse que ésta
20 depende de condiciones físicas, biológicas y químicas, por lo que los resultados suelen ser muy generales.

21 Arauzo *et al.* (2005) realizaron balances hídricos con el uso de sensores de capacitancia y dieron
22 seguimiento al contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades. Botey *et al.* (2011) indicaron que
23 es posible obtener buenos resultados con el balance hídrico exponencial diario al utilizar un valor apropiado
24 de agua disponible total para las plantas en cierta profundidad. Mestas *et al.* (2009) incluyeron la fenología
25 del cultivo, la cual fue evaluada cada semana en ciclos anuales, ya que la vegetación se adapta a la forma y
26 condiciones del suelo, y ello se ve reflejado en la profundidad radicular (Pinheiro *et al.*, 2013). Así mismo,

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 el tipo de vegetación y su influencia en la evolución del contenido de agua del suelo puede incidir más que
2 los factores climáticos en el control de la infiltración a través de la zona de raíces (Martínez-Fernández *et*
3 *al.*, 2007). Por lo tanto, la primera capa de suelo es determinante en la tasa de infiltración de agua, aun para
4 simulaciones en series de capas equivalentes (Salas-García *et al.*, 2011). Po lo que, si se cuantifica de forma
5 adecuada la percolación profunda de la zona radicular es posible estimar la cantidad que seguirá su
6 trayectoria a capas más profundas (Fan *et al.*, 2015).

7 Además, en terrenos de cultivo el paso de maquinaria agrícola genera un mayor grado de
8 compactación en la superficie lo que se refleja en una baja conductividad hidráulica (Bozbey & Guler,
9 2006), de esta forma se retarda el tránsito del agua por efecto de la fuerza de gravedad, lo cual genera una
10 redistribución de agua en el medio poroso. Por otro lado, la labranza genera alteración estructural del suelo
11 lo que reduce el grado de compactación (Martínez *et al.*, 2015; Yimer *et al.*, 2008). Por lo anterior, la
12 conductividad hidráulica y porosidad varían en diferentes órdenes de magnitud entre diferentes suelos
13 (Hunt, 2005), debido a la variabilidad de la estructura del suelo por el tratamiento agrícola.

14 También se ha comprobado que al realizar un balance hídrico de un suelo se debe considerar por
15 separado la evaporación de la transpiración, ya que generalmente ésta es menor a la anterior o muy parecida
16 para diferentes profundidades de zona radicular (Bachand *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2013). Además de que
17 solo los grandes eventos de lluvia causan una escorrentía superficial, y esta aumenta conforme se eleva la
18 pendiente del suelo (Arbat *et al.*, 2007). En suelos sensiblemente planos se puede reducir el escurrimiento
19 con la presencia de cultivos, así como de hierba, lo que aumenta la conductividad hidráulica en una escala
20 temporal más amplia (Biddoccu *et al.*, 2013).

21 A pesar de las mejoras desarrolladas, los métodos actuales de cálculo de balance hídrico aún utilizan
22 datos mensuales con valores promedio, además la mayoría de las estimaciones de estos balances se realizan
23 con registros obsoletos, incompletos y sin ser verificados in situ. Con base en lo expuesto, el objetivo de
24 este trabajo fue identificar los parámetros que controlan la percolación profunda, a partir de la estimación
25 del balance hídrico local diario utilizando datos de estaciones climatológicas y parámetros edafológicos,
26 para con ello obtener una estimación más precisa del valor de esta percolación profunda.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La mayor parte de la agricultura en el Estado de México es de tipo temporal, es decir depende del periodo de lluvias para el desarrollo de cultivos, por lo anterior se seleccionó un terreno para cultivo de trigo en una superficie sensiblemente plana, por lo que la topografía se verificó mediante observaciones dentro y fuera de la superficie. Del 1 de enero al 31 de diciembre del 2014 se recabó información sobre las prácticas agrícolas (preparación, siembra, desarrollo y cosecha de la planta), se monitoreo el crecimiento del cultivo, se recabaron datos climatológicos y se realizaron muestreos de suelo.

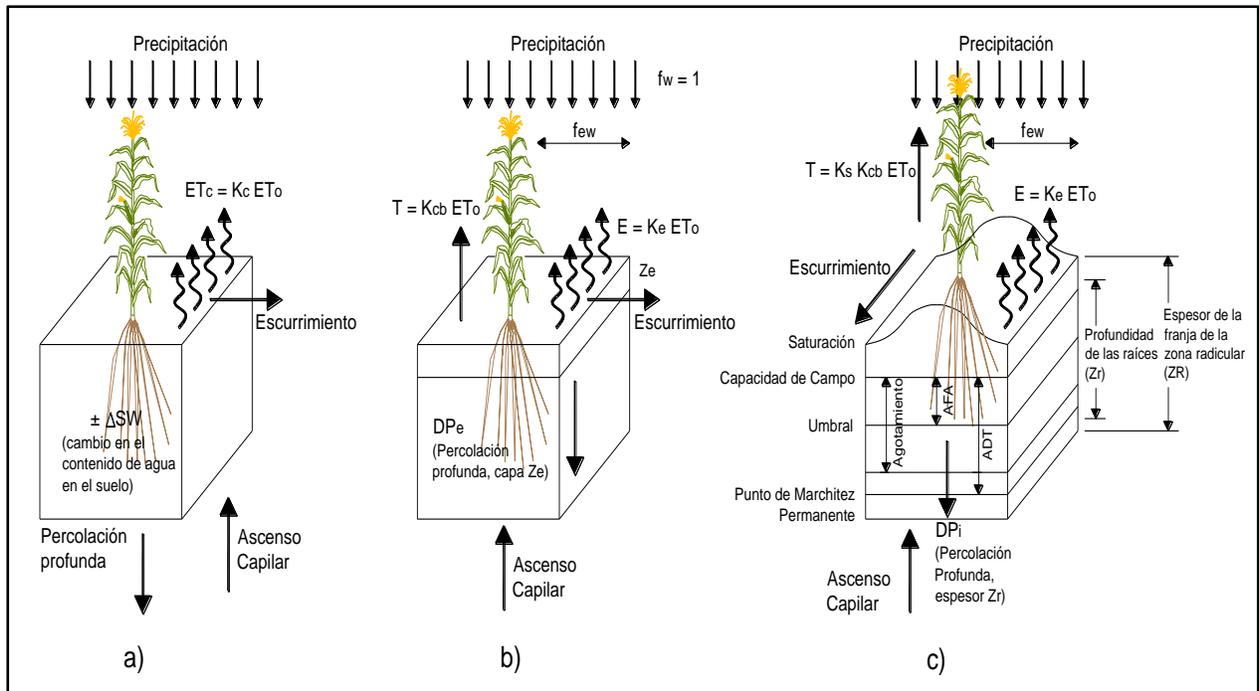
Datos climatológicos

Se realizó el acopio de datos horarios de temperatura máxima, mínima, velocidad de viento, humedad relativa, precipitación y evaporación procedentes de la estación climatológica del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), la cual se encontró a 200 m en línea recta al terreno de cultivo. También, se identificaron otras estaciones cercanas por lo que se solicitaron registros climatológicos actualizados a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de las estaciones 15003 (Almoloya de Juárez), 15063 (Nueva Santa Elena) y 15203 (Calixtlahuaca), las cuales se consideraron como auxiliares.

Estimación del coeficiente del cultivo

Para la recolección y tratamiento de los datos se tomó en cuenta que para la estimación del balance hídrico la evapotranspiración del cultivo es quizás el parámetro que requiere un análisis más detallado, por lo que se consideró un volumen de control de la franja de la zona radicular para el cual se tomaron en cuenta tres casos (Figura 1): a) coeficiente de cultivo único, b) dual y c) ajustado por estrés hídrico. Para cada caso se definieron las variables principales involucradas, las cuales a su vez dependieron de otros parámetros.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA



1
2 **Figura 1. Variables del balance de agua en la zona radicular con coeficientes de cultivo: a) único, b)**
3 **dual y, c) ajustado por estrés hídrico (elaboración propia basado en Allen *et al.*, 2006).**

4
5 Se realizó una síntesis de estas variables requeridas para la estimación del balance hídrico local
6 (Cuadro 1), con base en la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
7 (FAO) (Allen *et al.*, 2006). De este modo se identificó cuáles variables dependen de mediciones in situ
8 (cultivo, climatología, muestreo de suelo), o bien de valores propuestos por la FAO. Las formulaciones
9 expuestas en el Cuadro 1 se programaron en una hoja de cálculo.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 **Cuadro 1. Síntesis de requerimientos para obtener la evapotranspiración del cultivo (elaboración propia basado en Allen *et al.*, 2006).**

Variable	Ecuación	Requerimientos	Observación
Precipitación (P)	Estación climatológica		Principal factor que controla la recarga de acuíferos (Turkeltaub <i>et al.</i> , 2015)
Escurrimiento (RO)	Revisión previa en el sitio		Suelo bien drenado, poca pendiente y cultivado (Botery y Moreno, 2015)
Evaporación (E)	Tanque evaporímetro (clase A)		Radiación, viento, temperatura y humedad, (Allen <i>et al.</i> , 2006)
Evapotranspiración de referencia (ET _o)	ET _o = K _{tan} * E K _{tan} : coeficiente del tanque	Distancia al cultivo, velocidad de viento y humedad relativa	Manual de la FAO (Allen <i>et al.</i> , 2006)
Evapotranspiración del cultivo (ET _c)	ET _c = K _c *ET _o Coeficiente único del cultivo	K _c : f(K _{ini} , K _{des} , K _{med} y K _{fin}) K _{ini} : etapa inicial, K _{des} : desarrollo, K _{med} : medio y K _{fin} : final	Desarrollo del cultivo (FAO: Allen <i>et al.</i> , 2006; USDA: Ángeles <i>et al.</i> , 2002)
	ET _c = (K _{cb} + K _e) * ET _o Coeficiente dual del cultivo K _{cb} : coeficiente basal del cultivo K _e : coeficiente de evaporación del suelo	$K_{c\max} = \max \left\{ \left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right\}$ u ₂ : velocidad del viento (promedio), HR _{min} : humedad relativa mínima Agua evaporable total (AET) $AET = 1000 * (\Theta_{FC} - 0.5 \Theta_{WP}) * Ze$ Θ _{FC} contenido de humedad a capacidad de campo Θ _{WP} contenido de humedad a punto de marchitez Ze: espesor del suelo secado a través de evaporación (0.10 a 0.15 m) Coeficiente de reducción de la evaporación del suelo K _r : (0-1)	Muestreo y textura de suelo, tablas del manual de la FAO (2006) Fracción del suelo en la que ocurre la mayor evaporación $few = \min(1 - fc, fw)$ 1-fc: fracción expuesta, sin sombra por vegetación (0.01-1) fw: fracción superficial promedio humedecida por lluvia (0.01-1) fc fracción de suelo cubierta por vegetación
	ET _{c_{aj}} = (K _s *K _{cb} + K _e)*ET _o Coeficiente bajo condiciones de estrés hídrico K _s : coeficiente de estrés hídrico	Agua disponible total (ADT) de la zona radicular $ADT = 1000(\Theta_{FC} - \Theta_{WP}) * Zr$ Zr: profundidad de las raíces Agua fácilmente aprovechable (AFA) en el suelo $AFA = p * ADT$ $K_s = \frac{ADT - Dr}{ADT - AFA}$ Dr: agotamiento de humedad en la zona radicular	$fc = \left(\frac{K_{cb} - K_{c\min}}{K_{c\max} - K_{c\min}} \right)^{(1+0.5h)}$ K _{c_{min}} valor mínimo de K _c sin cobertura y seco (0.15-0.20) K _{c_{max}} valor máximo de K _c (húmedo), h altura promedio de la planta ZR: profundidad promedio de la franja de la zona radicular Medición en campo Manual FAO (2006) con [p= 0.605]

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 Muestreo de suelo in situ y tratamiento en laboratorio

2 Mensualmente, en diferentes puntos dentro del sitio de estudio, se extrajeron muestras de suelo de
 3 la zona radicular con ayuda de un barrenador cilíndrico. En cada perforación se midió la profundidad y se
 4 cuantificó su volumen para determinar el peso volumétrico del suelo (Coras, 1989); así mismo, durante la
 5 presencia del cultivo dichas perforaciones se agrandaron para revisar y medir el crecimiento descendente de
 6 la raíz, el cual se comparó con la altura correspondiente de la planta. El material de las muestras de suelo se
 7 transportó al Laboratorio de Mecánica de Suelos para determinar su peso húmedo. Posteriormente fue
 8 secado a 110 °C. y nuevamente pesado. Con los datos obtenidos se calcularon los parámetros hídricos de la
 9 zona radicular detallados en el Cuadro 2.

10

11 Cuadro 2. Relaciones hídricas aplicadas a las muestras de suelo.

Relación	Ecuación	Observaciones
Densidad natural (campo)	$\rho = \frac{M_T}{V_T}$	[kg/m ³] ρ : densidad M _T : masa total V _T : volumen total
Densidad seca	$\rho_b = \frac{M_S}{V_T}$	[kg/m ³] ρ_b : densidad seca M _S : masa de sólidos V _T : volumen total Skopp (2002)
Humedad gravimétrica (contenido de humedad)	$\theta_M = \frac{M_W}{M_S}$	[kg/kg] θ_M : humedad gravimétrica M _W : masa de agua M _S : masa de sólidos (seco) Or y Wraith (2002)
Humedad volumétrica	$\theta_w = \frac{V_W}{V_T}$	[m ³ /m ³] θ_w : humedad volumétrica V _W : volumen de agua V _T : volumen de sólidos (seco) Or y Wraith (2002)
Porosidad	$n = \frac{V_V}{V_T}$	[m ³ /m ³ , %] n: porosidad V _V : volume de vacios V _T : volume total
Lámina de agua equivalente	$h_\theta = h_{ZR} \frac{W_{HS} - W_{SS}}{V_M}$	[m*kg/m ³ , m] h_θ : lámina de agua equivalente de la zona radicular h_{ZR} : espesor de la franja de la zona radicular W _{HS} : peso húmedo del suelo W _{SS} : peso seco del suelo V _M : volumen de la muestra En estado estático su valor es resultado del producto de una densidad por unidad de longitud, o bien la relación del volumen de la muestra de suelo con el volumen de agua contenida la cual es igual a la relación de la profundidad de muestreo con la lámina de agua equivalente, concordando con Baver <i>et al.</i> (1980) quienes señalaron una profundidad por masa por unidad de volumen para una muestra de suelo.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 Del material seco se fraccionó de 600 a 1000 g para la prueba de tamizado, y con ello se
 2 determinaron los porcentajes de arena, limo y arcilla. Los datos obtenidos se usaron para la clasificación del
 3 suelo en el triángulo de texturas del U. S. Department of Agriculture (2004). Estos datos permitieron
 4 determinar el comportamiento edafológico de la zona radicular en función del tratamiento agrícola y de la
 5 presencia o ausencia de agua durante el año de estudio.

6

7 **Estimación de la percolación profunda**

8 Con el conjunto de datos recolectados se realizó el cálculo del balance hídrico local anual de la zona
 9 radicular para los doce muestreos de suelo, considerando los tres casos (con coeficiente de cultivo único,
 10 dual y ajustado por estrés). Las formulaciones utilizadas para este cálculo de muestran en el Cuadro 3.
 11 Posteriormente, se evaluaron los resultados obtenidos de los balances, dando prioridad a los más cercanos
 12 a la realidad. También se realizó una valoración lineal con el fin de correlacionar los valores obtenidos de
 13 percolación con la profundidad de muestreo de la zona radicular.

14

15 **Cuadro 3. Formulaciones para obtener la percolación profunda a partir del balance hídrico local.**

Balance hídrico local de la zona radicular		
	$P = E + ET_c + DP + RO \pm \Delta SW$	
coeficiente único	Evapotranspiración del cultivo coeficiente dual	Coeficiente ajustado por estrés hídrico
$\pm \Delta SW_i = \Delta SW_{i-1} + P_i - ET_{c_i} - DP_i$ <p>ΔSW_i: cambio en el contenido de agua en el suelo del día i, ΔSW_{i-1} para el día anterior i-1, P_i: precipitación del día i, ET_{c_i}: evapotranspiración del cultivo del día i y DP_i: percolación profunda en el día i</p>	$D_{e,i} = D_{e,i-1} - P_i + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i}$ <p>$D_{e,i}$: lámina acumulada de evaporación después de un humedecimiento completo al final del día i, $D_{e,i-1}$: misma condición anterior, pero del día i-1, P_i: precipitación del día i, E_i: evaporación del día i, $T_{ew,i}$: lámina de transpiración que ocurre en la fracción expuesta y humedecida de la cobertura vegetal en el día i (para raíces poco profundas puede ser ignorada) y $DP_{e,i}$: percolación a partir de la capa superficial del suelo en el día i, después de la capa Ze,</p>	$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + ET_{c_i} + DP_i$ <p>$D_{r,i}$: agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i con límites $0 \leq D_{r,i} \leq ADT$, $D_{r,i-1}$: contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior i-1, P_i: precipitación del día i, ET_{c_i}: evapotranspiración del cultivo en el día i y DP_i: pérdidas de agua en la zona radicular por percolación profunda en el día i</p>

16

17

18

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 **Sitio de estudio**

2 Los datos más representativos de la zona de estudio son los mostrados en el Cuadro 4. Es importante
3 destacar que dentro del sitio no existieron cambios de pendiente que dieran origen a escurrimientos
4 importantes. El cultivo de trigo fue temporal por lo que las lluvias fueron el único aporte de agua para el
5 desarrollo de la planta. El espesor de la capa evaporante varió de 0.10 m a 0.15 m debido al tratamiento
6 agrícola, como lo fue el barbecho, rastreo y siembra.

7

8 **Cuadro 4. Datos del sitio de estudio seleccionado.**

Parámetro	Datos
Coordenadas geográficas	19°23'52.40" N, 99°42'54.75" O
Elevación	2615 msnm
Área	5.6 hectáreas
Pendiente perimetral	-1 a +1 %
Uso de suelo	Agrícola (Trigo temporal)
Espesor de capa evaporante	0.10 a 0.15 m
Coloración visible de suelo	gris claro en seco, negro en húmedo

9

10 **Datos climatológicos**

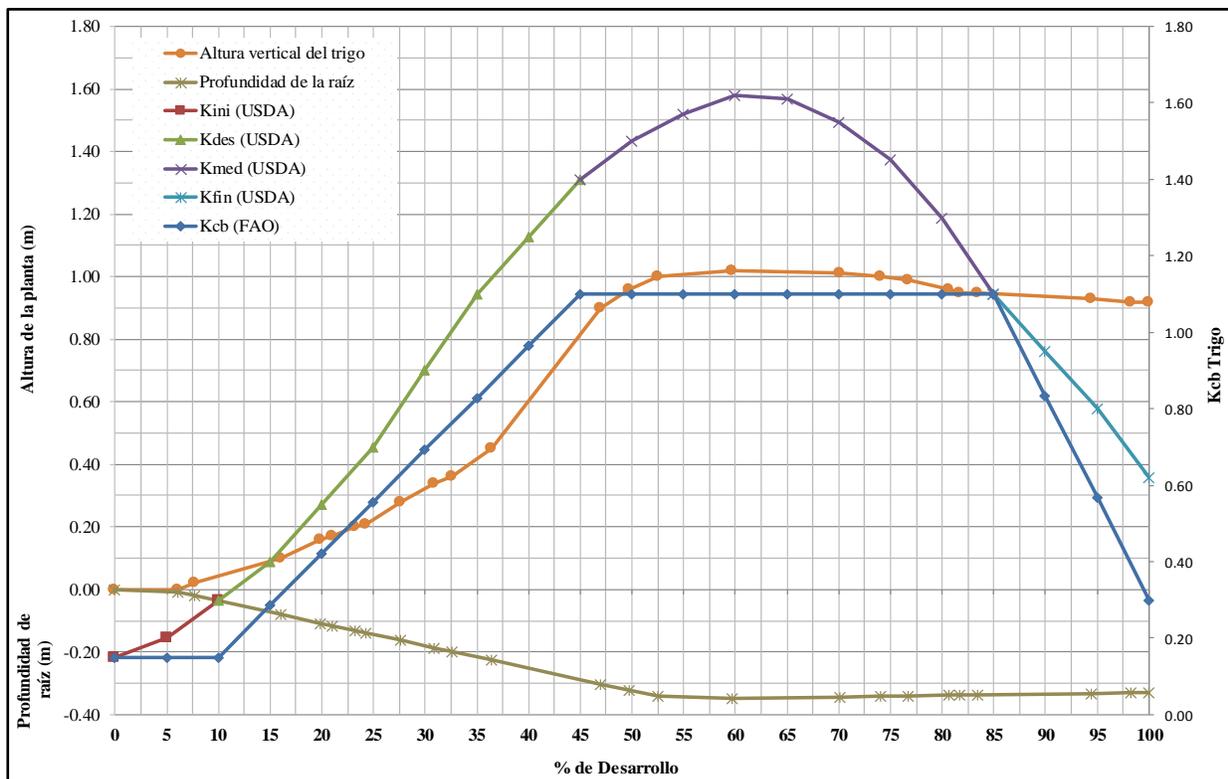
11 Con base en los datos de la estación climatológica del CIRA se cuantificó 856.02 mm de
12 precipitación anual. Este dato se comparó con las mediciones del pluviómetro y los registros de la estación
13 Nueva Santa Elena. Así mismo, el escurrimiento del sitio de estudio fue despreciable debido al grado de
14 inclinación y la formación de hileras para el cultivo, con lo que solo se identificaron pequeños
15 encharcamientos. Con respecto a la medición de la evaporación se observó que la lluvia ejerció una fuerte
16 influencia sobre la superficie de agua libre, ya que la masa, velocidad de impacto y radio de las gotas
17 disminuyeron en la colisión (Fajardo et al., 2012), lo anterior generó distorsión, y esto llevó a la producción
18 de nuevas gotas por la fragmentación. Además, la acción del viento provocó que eventualmente faltaran
19 milímetros de agua dentro del tanque cuando se realizó la compensación por precipitación. Por lo anterior,
20 diariamente se trató de mantener el mismo nivel de agua dentro del tanque para evitar que el agua estuviera
21 cerca del borde de la superficie y con ello evitar que se evaporara con mayor rapidez (Manzur y Cardoso,
22 2015). También se compararon los datos de evaporación con los de la estación Nueva Santa Elena.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 Coeficiente del cultivo

2 El barbecho y rastreo de suelo se llevó a cabo en los primeros días de mayo, el 14 del mismo mes
3 se realizó la siembra, y la cosecha fue el 10 de noviembre. En primera instancia, para la estimación de la
4 evapotranspiración del cultivo se graficaron los valores de coeficiente del cultivo para los 160 días según la
5 FAO (Allen et al., 2006) y USDA (Ángeles et al., 2002), cuyo comportamiento se muestra en la Figura 2.
6 Además, se integró la altura vertical de la planta para el crecimiento del 0 al 100 % durante los 181 días del
7 periodo vegetativo observado en campo.

8



9

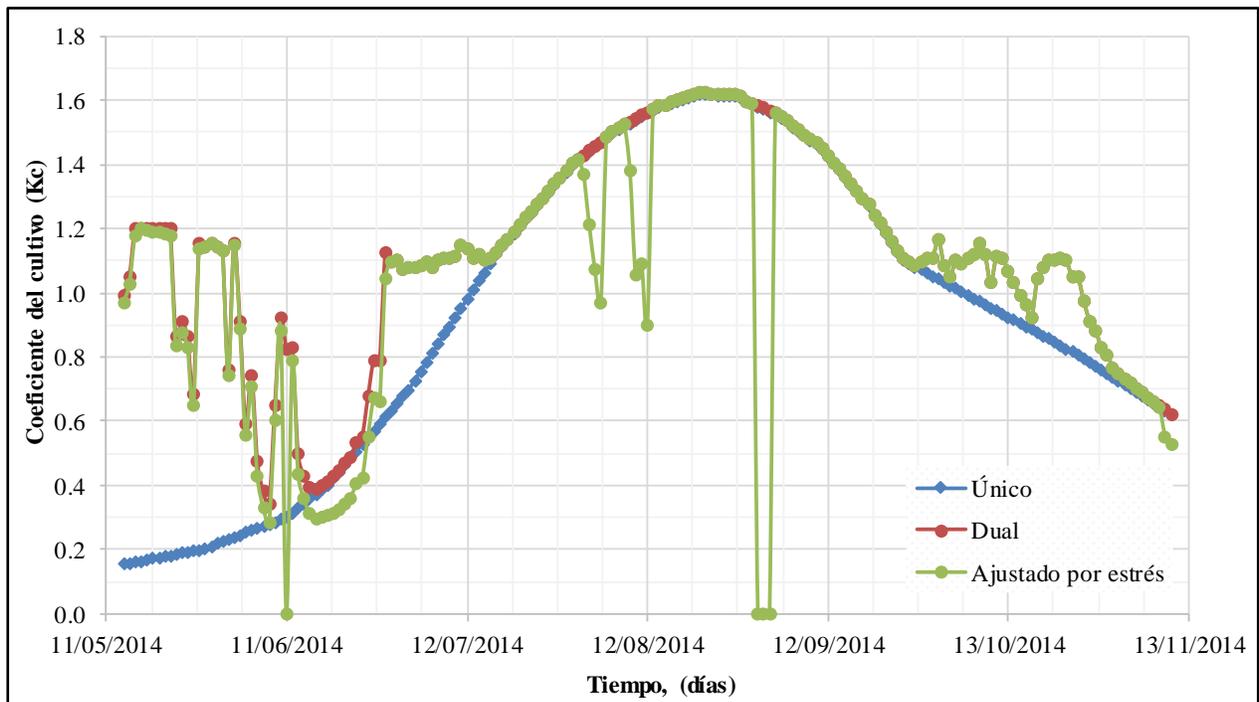
10 **Figura 2. Coeficientes de cultivo USDA y FAO para el desarrollo del trigo, con mediciones in situ de**
11 **la altura y profundidad de raíz (elaboración propia).**

12

13 Debido a que el crecimiento del cultivo no fue lineal, se eligieron los valores de Kc sugeridos por
14 la USDA para determinar el Kc para coeficiente dual y ajustado por estrés hídrico. La comparación de los
15 resultados se muestra en la Figura 3. La variación entre el dual y el ajustado por estrés se debió a que esté

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 ultimo considera el agua disponible total y el efecto de estrés por la profundidad de las raíces de la planta.
2 Además, el ajustado por estrés hídrico tomó en cuenta el efecto climatológico de días en los que la
3 evaporación fue cero (mal tiempo), tal que la masa de suelo estaba completamente sobresaturada sin
4 evaporación en la parte expuesta o libre. En esos días se consideró que no existe estrés hídrico lo que implicó
5 despreciar la evapotranspiración del cultivo, por la abundancia de agua en la zona radicular (Chin, 2008).
6



7
8 **Figura 3. Comparación de los valores obtenidos para los coeficientes de cultivo único, dual y ajustado**
9 **por estrés para el cultivo de trigo (elaboración propia).**

10

11 **Parámetros hídricos y edafológicos del suelo**

12 La profundidad de muestreo de suelo varió de 0.30 m y 0.52 m, con distancia entre puntos de
13 muestreo de 7 a 8 m de separación. La densidad natural osciló entre 1.86 g/cm³ para enero y 1.36 g/cm³ en
14 mayo, valores que corroboraron la resistencia presentada in situ para el mes de enero por lo que también se
15 obtuvo menor humedad gravimétrica y porosidad en dicho mes (Cuadro 5). Además, el tratamiento agrícola
16 realizado en mayo ocasionó mayor porosidad comparada con los otros meses, pero no se excedió el 60 %

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 de porosidad (Hudak, 2000; Domenico & Schwartz, 1990). La lámina de agua equivalente de la zona
2 radicular tuvo un mínimo de 69 mm para enero y un máximo de 165 mm en el mes de marzo, lo cual se
3 relaciona con la profundidad máxima de la zona radicular que para este mes fue de 0.52 m.

4

5 **Cuadro 5. Parámetros hídricos del suelo muestreado mensualmente.**

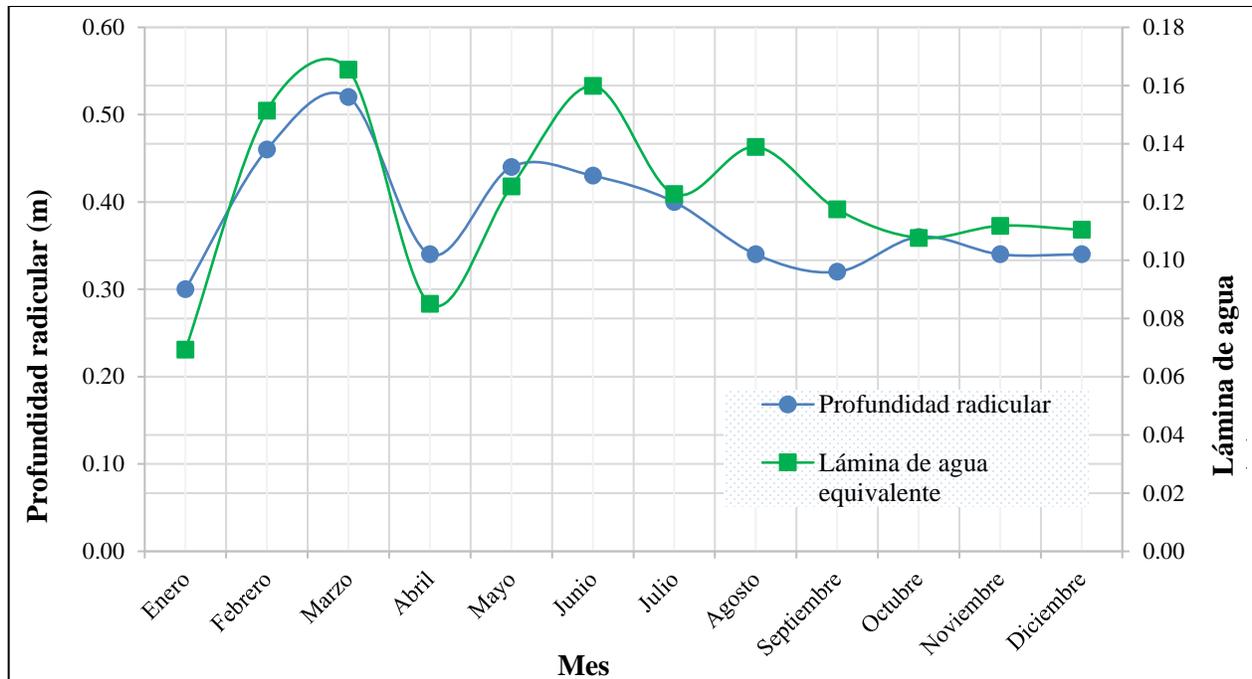
Mes	Profundidad de zona radicular (m)	Densidad natural (gr/cm ³)	Humedad gravimétrica (%)	Lámina de agua equivalente (m)	Porosidad (%)
Enero	0.30	1.86	14.15	0.069	38.47
Febrero	0.46	1.69	24.17	0.151	48.61
Marzo	0.52	1.83	21.04	0.165	42.93
Abril	0.34	1.74	16.77	0.085	43.72
Mayo	0.44	1.36	26.59	0.125	59.59
Junio	0.43	1.84	25.34	0.160	44.64
Julio	0.40	1.61	23.57	0.123	50.88
Agosto	0.34	1.72	31.24	0.139	50.65
Septiembre	0.32	1.76	26.38	0.117	47.51
Octubre	0.36	1.39	27.54	0.108	59.02
Noviembre	0.34	1.76	23.04	0.112	46.13
Diciembre	0.34	1.72	23.24	0.110	47.26

6

7 En la Figura 4 se presenta la fluctuación de la profundidad radicular, así como la variación de la
8 lámina de agua equivalente de la franja de la zona radicular. Inicialmente, se observaron máximos, pero ello
9 es efecto de la irregularidad existente en la capa subyacente debajo de la zona radicular. Posteriormente, los
10 valores de la profundidad radicular y lámina de agua se tuvieron casi constantes. A partir del mes de
11 septiembre, la lámina de agua equivalente presento una tendencia casi horizontal debido a la distribución
12 del agua de precipitación en la zona radicular. Físicamente significa que la densidad del suelo aumenta
13 progresivamente al aumentar el contenido de agua, pero disminuye con adiciones posteriores (Baver *et al.*,
14 1980), lo que sucede a partir del mes de diciembre por la ausencia de lluvias.

15

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA



1

2 **Figura 4. Evolución temporal del contenido de agua en la zona radicular de cada muestreo.**

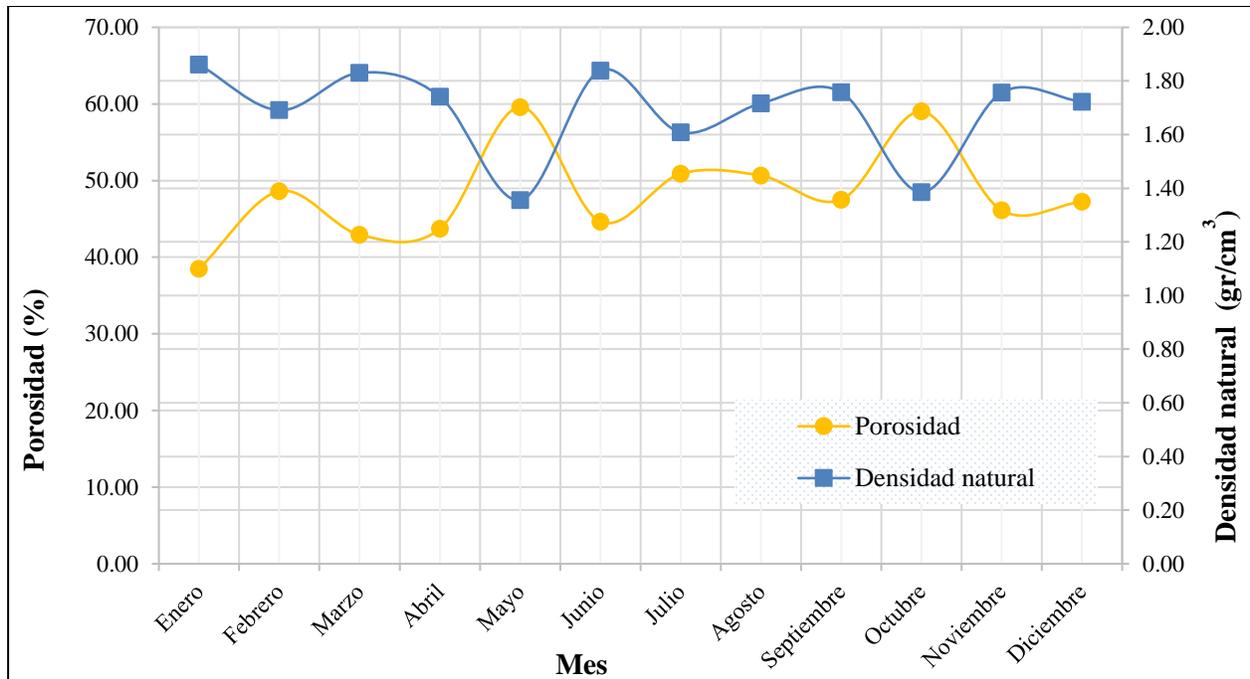
3

4 En la figura 5 se muestra como varió la porosidad a lo largo del año, y cómo fue que ésta se vio
5 afectada por la densidad natural del suelo. El máximo de porosidad se presenta en el mes de mayo debido
6 al tratamiento agrícola y en el mes de junio disminuyó drásticamente por el paso de la maquinaria agrícola
7 para realizar los surcos de drenado. En octubre, volvió a incrementarse la porosidad por la aparición de aire
8 en el suelo debido al inicio de agrietamiento por la escasez de las lluvias. La densidad presenta un
9 comportamiento inverso a la porosidad.

10 Además, es importante comentar que la clase textural del suelo fue de tipo arenoso-franco para todas
11 las muestras. Esta textura influyó en que la porosidad aumentó conforme la densidad natural disminuyó,
12 debido al reacomodo de partículas en la masa de suelo. Como existe esta relación entre la porosidad y
13 densidad, se puede justificar la variación del contenido de agua aun para una misma clase textural de suelo.

14

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA



1
2 **Figura 5. Evolución temporal de la porosidad y densidad para los muestreos de la zona radicular.**

3

4 **Percolación profunda a partir del balance hídrico local**

5 Durante la revisión de los valores de precipitación se observó que precipitaciones diarias superiores
6 a 10 mm o acumulado de tres días consecutivos mayor de 18 mm, propiciaron la presencia de percolación
7 profunda. En el Cuadro 6 se muestran los resultados del cálculo de los balances hídricos realizados para los
8 tres tipos de coeficiente de cultivo, considerando: la profundidad de la franja radicular, la precipitación, y
9 la evapotranspiración del cultivo. Para el caso del Kc único y dual se observa que los valores de percolación
10 se mantienen constantes, debido a que solo se evalúan el agua que atraviesa o percola la capa evaporante,
11 (primeros 15 cm del suelo), lo que da lugar a la presencia de mayor incertidumbre la cual no se puede ajustar
12 al conjunto de datos (Burden & Douglas, 2002). Para la percolación con coeficiente ajustado por estrés
13 existe una variación significativa mes por mes debido a la variación del espesor de la franja radicular,
14 además de la influencia de los parámetros edafológicos. De esta forma, el almacenamiento de agua en la
15 zona radicular varió de 15.92 mm a 28.22 mm, lo cual verifica el efecto de la densidad de la masa del suelo
16 para el desarrollo de la raíz y la retención de agua ya que, para el mes de enero, con 0.30 m de profundidad,

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 el almacenamiento fue de 16.01 mm, ligeramente mayor a los 15.92 mm obtenidos para los meses con 0.34
 2 m de profundidad (abril, agosto, noviembre y diciembre).

3

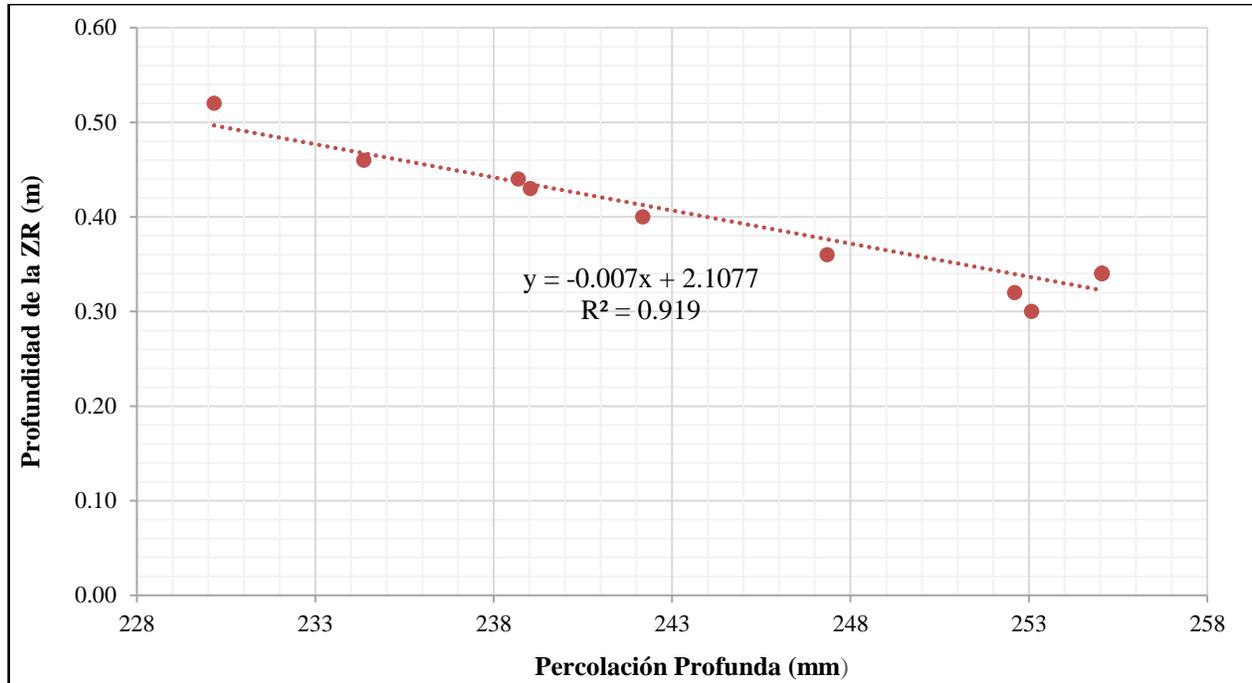
4 **Cuadro 6. Valores de percolación profunda y almacenamiento anual para cada muestreo de suelo.**

Mes de prueba	Profundidad de la zona radicular (m)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración del cultivo Ajustado por estrés (mm)	Percolación profunda			Almacenamiento (mm)
				Único (mm)	Dual (mm)	Ajustado por estrés (mm)	
Enero	0.30	856.02	586.94	384.19	482.09	253.07	16.01
Febrero	0.46	856.02	594.08	384.19	482.09	234.36	27.58
Marzo	0.52	856.02	597.64	384.19	482.09	230.16	28.22
Abril	0.34	856.02	585.05	384.19	482.09	255.05	15.92
Mayo	0.44	856.02	592.92	384.19	482.09	238.69	24.41
Junio	0.43	856.02	592.17	384.19	482.09	239.03	24.82
Julio	0.40	856.02	589.69	384.19	482.09	242.18	24.15
Agosto	0.34	856.02	585.05	384.19	482.09	255.05	15.92
Septiembre	0.32	856.02	585.96	384.19	482.09	252.60	17.46
Octubre	0.36	856.02	585.59	384.19	482.09	247.34	23.09
Noviembre	0.34	856.02	585.05	384.19	482.09	255.05	15.92
Diciembre	0.34	856.02	585.05	384.19	482.09	255.05	15.92

5

6 Estos datos confirman que para una mayor precisión en la estimación de la percolación profunda es
 7 necesario el ETc ajustado por estrés hídrico, el cual requiere del espesor de la franja de la zona radicular, de
 8 la posición de la planta, la profundidad y distribución de las raíces, ya que estas variables inciden en el
 9 almacenamiento de la humedad del suelo y la percolación inicial (Sahoo & Panda, 2014). Al relacionar la
 10 profundidad de la zona radicular y la percolación profunda mediante una relación lineal (Figura 6), se
 11 obtuvieron resultados consistentes con Song-Hao y Xiao-Min (2011), ya que la mayor percolación se
 12 presentó con una menor profundidad radicular y esta disminuyó conforme se incrementó el espesor. La
 13 interpretación física de estos resultados permite concluir que, si el espesor radicular es muy pequeño, la
 14 percolación profunda tenderá a ser el valor de la precipitación (descontando la evapotranspiración), pero si
 15 la profundidad radicular es muy grande, la percolación profunda tenderá a cero, lo cual es equivalente a
 16 considerar que el agua percola por goteo cuando el suelo está completamente sobresaturado. El valor de
 17 recarga estimado osciló de 230 mm a 255 mm para profundidades de 0.52 m a 0.34 m, respectivamente.

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA



1
2 **Figura 6. Relación entre la percolación profunda anual obtenida para evapotranspiración con**
3 **coeficiente de estrés hídrico y la profundidad de la franja radicular de cada muestreo de suelo.**

CONCLUSIONES

6 El sitio seleccionado fue adecuado para la investigación, tanto para el monitoreo del cultivo de trigo,
7 como para la recolección de información edafológica y climatológica, además de que las condiciones
8 topográficas permitieron omitir el escurrimiento de la ecuación de balance hídrico. El balance hídrico local
9 diario requiere de datos los cuales deben ser actualizados, revisados y verificados in situ. Aunque el
10 coeficiente del cultivo ajustado por estrés hídrico requiere de gran cantidad de datos climatológicos,
11 edafológicos y de cultivo, la estimación con este método presenta mayor precisión en los resultados hasta
12 de un 50% y de 89% para coeficiente único y dual respectivamente. El tratamiento agrícola es un factor
13 determinante que genera cambios estructurales en el suelo, aumentando y disminuyendo la porosidad, pero
14 ello permite un adecuado desarrollo del cultivo y distribución de la raíz. Por otro lado, la densidad del suelo
15 es de suma importancia para la distribución del flujo de agua dentro de la zona radicular. Los principales
16 parámetros que permiten aproximar aún más estimación de la percolación profunda son: el coeficiente de

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

1 cultivo ajustado por estrés hídrico, el espesor y densidad de la franja de la zona radicular y la incidencia de
2 la precipitación en la superficie del suelo.

3

4

Literatura Citada

5 Allen, G. R., Pereira, L. S., Raes, D., y Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los*
6 *requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la
7 Alimentación, Estudio FAO Riego y Drenaje 56, p 298. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/x0490s/x0490s.pdf> y
8 de <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>

9 Ángeles, M. V., Fernández, C. V., Ba, K. M., y Díaz, C. D. (2002). *Elementos básicos de riego presurizado para productores:*
10 *Microirrigación*. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México y Universidad Autónoma de
11 Chapingo, p. 227.

12 Arauzo, M., Díez, J. A., Martínez-Bastida, J. J., Valladolid, M., y Hernáiz, P. (2007). Comparación de un método directo y un
13 método indirecto para la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada. *Estudios de la Zona no Saturada,*
14 *8*, 77-82.

15 Arauzo, M., Díez, J. A., y Hernáiz, P. (2005). Observaciones a escala horaria del contenido de agua en la zona no saturada mediante
16 el uso de sensores de capacitancia. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo*, *7*, 33-38.

17 Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Barragán, J., y Ramírez, C. F. (2007). Distribución del agua en el suelo en riego por
18 superficie: aplicación del código HYDRUS. *Estudios de la Zona no Saturada*, *8*, 305-311.

19 Bachand, P. A. M., Bachand, S., Fleck, J., Anderson, F., y Windham-Myers, L. (2014). Differentiating transpiration from
20 evaporation in seasonal agricultural wetlands and the link to advective fluxes in the root zone. *Science of the Total Environment*,
21 *484*, 232-248. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.026>

22 Baver, L.D., Gardner, W.H., y Gardner, W.R. (1980). *Física de Suelos*. UTHEA. Nueva York, E.U.A. p. 529.

23 Biddoccu, M., Ferraris, S., Cavallo, E., Opsi, F., Previati, M., y Canone, D. (2013). Hillslope vineyard rainfall-runoff measurements
24 in relation to soil infiltration and water content. *Procedia Environmental Sciences*, *19*, 351-360. Doi:
25 10.1016/j.proenv.2013.06.040

26 Botey, R., Pérez-Arias, L., y Moreno, J. V. (2011). Estimación del contenido de agua del suelo mediante el balance hídrico
27 exponencial diario y comparación con medidas insitu en un típico haploxeralf en la zona centro (Madrid – España). *Estudios en*
28 *la Zona no Saturada del Suelo*, *10*, 303-308. Recuperado de <http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications/p303.pdf>

29 Botey, F. R., y Moreno, G. J. V. (2015). Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial
30 diario. *Área de Climatología y Aplicaciones Operativas (AEMET)*, *2*, 1-22. Recuperado de
31 http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/balance_hidrico/Metodologia.pdf

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

- 1 Bozbey, I., y Guler, E. (2006). Laboratory and field testing utilization of an excavated soil as landfill liner material. *Waste*
2 *Management*, 26, 1277-1286. Doi: 10.1016/j.wasman.2005.10.014
- 3 Burden, R. L., y Douglas, F. J. (2002). Análisis numérico. Thompson Learning. México, D.F. p. 839.
- 4 Cheng, X., Huang, M., Cheng, B., Yu., M., y Shao, M. (2013). The differences of water balance components of Caragana korshinkii
5 grown in homogeneous and layered soil in the desert-loess plateau transition zone. *Journal of Arid Environments*, 98, 10-19.
6 Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.07.007>
- 7 Chin, D. A. (2008). Phenomenological models of hydrologic processes in south Florida. *Journal of Hydrology*, 349, 230-243. Doi:
8 10.1016/j.jhydrolo.2007.11.003
- 9 Coras, M. P. M. (1989). Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego. México: Universidad Autónoma de Chapingo,
10 Departamento de Fitotecnia, p 250.
- 11 Domenico, P. A., y Schwartz, F. W. (1990). Physical and chemical hydrogeology. *John Wiley & Sons*. USA. p. 824.
- 12 Fajardo, A., López, R., Cardeña, S., Rojano, G. D., y Najera, D. (2012). Estudio de teoría y experimento de la dinámica de colisión
13 de dos gotas de agua macroscópicas. *LV Congreso Nacional de Física*. Morelia Michoacán, Sociedad Mexicana de Física, 59,
14 octubre 2012
- 15 Fan, J., Scheuermann, A., Guyot, A., Baumgartl, T., y Lockington, D. A. (2015). Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone
16 soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ETR and spatial TDR. *Journal of Hydrology*, 523,
17 475-488. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydro.2015.01.064>
- 18 Grifoll, J. (2011). Contribución de la dispersión del vapor de agua en el suelo al proceso de evaporación. *Estudios en la Zona no*
19 *Saturada del suelo*, 10, 247-252.
- 20 Hudak, P. F. (2000). Principles of hydrogeology. Lewis Publishers. United States of America. p. 204.
- 21 Hunt, A. G. (2005). Percolation theory and the future of hydrogeology. *Hydrogeol J*, 13, 202-205. Doi: 10.1007/s10040-004-0405-
22 6
- 23 Manzur, A., y Cardoso, J. (2015). Velocidad de evaporación del agua. *Revista Mexicana de Física*, 61, 31-34. Recuperado de
24 http://rmf.smf.mx/pdf/rmf-e/61/1/61_1_31.pdf
- 25 Martínez, V. J. J., Vaca, G. V. M., Esteller, A. M. V., González, H. A., Rubí, A. M., y Gutiérrez, R. F. (2015). Mean infiltration
26 speed in a vertisol under different tillage systems. *Terra Latinoamericana*, 33, 95-99.
- 27 Martínez-Fernández, J., Cano, A., Hernández-Santana, V., y Morán, C. (2007). Evolución de la humedad del suelo bajo diferentes
28 tipos de cubierta vegetal en la cuenca del Duero. *Estudios en la Zona No Saturada del suelo*, 8, 275-280.
- 29 Mestas, V. R., García, M. I., Báez, M. D., y Paz, G. A. (2009). Estimación del consumo de agua en el cultivo del maíz, mediante el
30 seguimiento de humedad en la zona radicular con sondas de capacitancia (FDR). *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*,
31 9, 1-6. Recuperado de <http://congress.cimne.com/zns09/admin/files/filepaper/p393.pdf>

PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA PERCOLACIÓN PROFUNDA

- 1 Or, D. y Wraith, J. M. (2002). Soil water content and water potential relationships. En A. W. Warrick (Ed), *Soil physics companion*
2 (pp. 49 – 84). Washington, D.C. USA. ISBN 0-8493-0837-2
- 3 Pedretti, D., Fernández-García, D., Sánchez-Villa, X., Barahona-Palomo, M., y Bolster, D. (2011). Combining physical-based
4 models and satellite images for the spatio-temporal assessment of soil infiltration capacity. *Stoch Environ Res Assess*, 25, 1065-
5 1075. Doi: 10.1007/s00477-011-0486-4
- 6 Pinheiro, E. A. R., Costa, C. A. G., y de Araújo, J. C. (2013). Effective root depth of the Caatinga biome. *Journal of Arid*
7 *Environments*, 89, 1-4. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.003>
- 8 Sahoo, B., y Panda, S. N. (2014). Rainwater harvesting options for rice-maize cropping system in rainfed uplands through root-
9 zone water balance simulation. *Biosystems Engineering*, 124, 89-108. Recuperado de
10 <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.010>
- 11 Salas-García, J., Gárfias, J., Llanos, H., y Martel, R. (2011). Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no
12 saturada, acuífero del valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(1), 147-160. Recuperado de
13 <http://www.redalyc.org/articuloBasic.oa?id=57220090011>
- 14 Skopp, J. M. (2002). Physical properties of primary particles. En A. W. Warrick (Ed), *Soil physics companion* (pp. 1 – 16).
15 Washington, D.C. USA. ISBN 0-8493-0837-2
- 16 Soldevilla-Martínez, M., Quemada, M., López-Urrea, R., Muñoz-Carpena, R., y Lizaso, J. I. (2014). Soil water balance: comparing
17 two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations. *Agricultural Water Management*, 139,
18 53-63. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.011>
- 19 Song-Hao, S., y Xiao-Min, M (2011). A physicoempirical model for soil water simulation in crop root zone. *Pedosphere*, 21(4),
20 512-521.
- 21 Turkeltaub, T., Kurtzman, D., Bel., G., y Dahan, O. (2015). Examination of groundwater recharge with a calibrated/validated flow
22 model of the deep vadose zone. *Journal of Hydrology*, 522, 618-627. Recuperado de
23 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.026>
- 24 United States Department of Agriculture, USDA. (2004). *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Laboratory
25 Investigations Report, 42, 735 p.
- 26 Yimer, F., Messing, I., Ledin, S., y Abdelkadir, A. (2008). Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment
27 in the highlands of Ethiopia. *Soil Use and Management*, 24, 344-349. Doi: 10.1111/j.1475.2743.2008.00182.x
- 28 Zavala, M., Saucedo, H., Fuentes, C., y Bautista, C. (2012). Modelo de conductividad hidráulica para el movimiento del agua en
29 suelos macroporosos. *Agrociencia*, 46(3), 205-220. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30223119001>