"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas
COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora

INFILTRACIÓN DEL AGUA HACIA EL SUELO DESDE UN TUBO ENTERRADO CON PARED POROSA

Fernando Brambila-Paz, Carlos Fuentes, Carlos Chávez, Antonio Quevedo, Fernando Alcántara-López

10 de junio de 2021

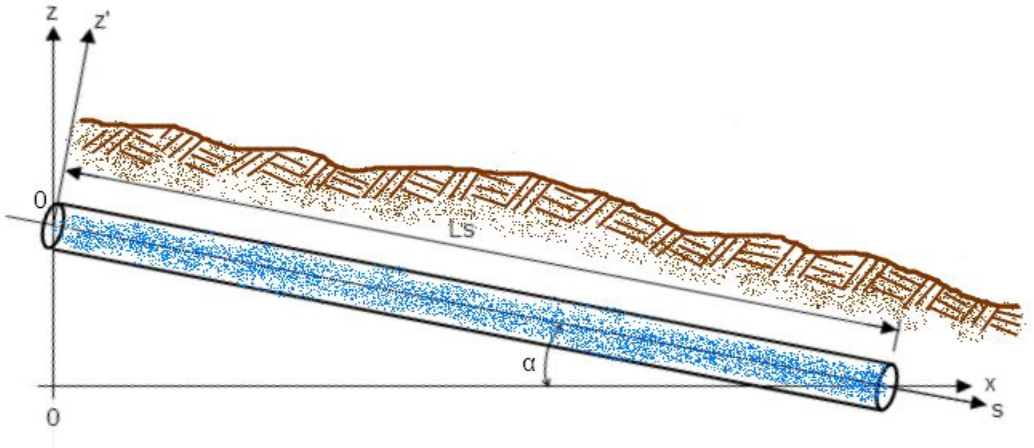
Motivación

En México existen muchos acuíferos sobreexplotados con abatimiento considerable de sus niveles estáticos que hace que las diferentes actividades se vuelvan incosteables por la profundidad de extracción del agua.

Existen diferentes métodos para inducir la recarga de agua de escorrentía como los pozos de infiltración que consideran tanto el flujo radial como el vertical, inclusive toman en cuenta la estratificación del medio poroso.

El agua de escorrentía puede ser utilizada para favorecer la infiltración a través de tubos con pared porosa enterrados en el suelo, con la finalidad de inducir una posible recarga de los acuíferos en regiones donde el abatimiento de los mismos hace que las diferentes actividades humanas se vuelvan incosteables.

Teoría



D_s – Diametro del tubo circular

L_s – Longitud del tubo

α – Ángulo del tubo con respecto a la horizontal

Ecuación de continuidad $$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot q$$

Ley de Darcy generalizada $$q = -K(\psi)\nabla H; \qquad H = \psi - z$$

Ecuación de Richards $$C(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}\left[K(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\psi)\frac{\partial \psi}{\partial z}\right] - \frac{dK}{d\psi}\frac{\partial \psi}{\partial z}$$

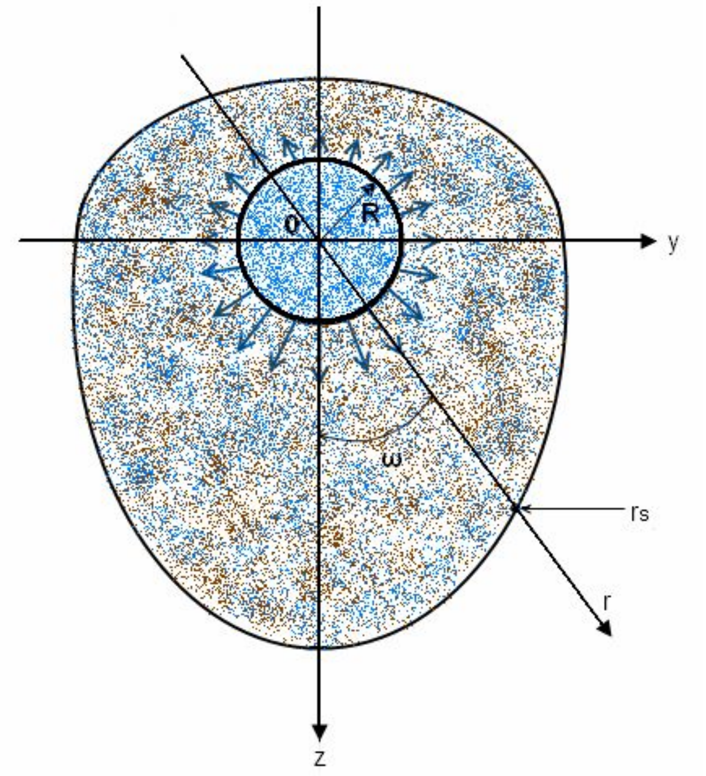
Teoría

$$C(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rK(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial r}\right]-\cos(\omega)\frac{dK}{d\psi}\frac{\partial\psi}{\partial r}$$

donde $\cos(\omega)=z/r$

r – Coordenada radial

ω – Ángulo que forma la coord. radial con respecto a la coord. vertical



Teoría

Considerando el enfoque de Green y Ampt (1911)

Se consideran las siguientes hipótesis:

1. El contenido de humedad inicial es constante a lo largo de la columna de suelo.

$$\theta_i = \theta_0, \qquad 0 \le z$$

2. Durante la infiltración se forman dos zonas de humedecimiento, una totalmente saturada y otra seca con el contenido de humedad inicial; nótese que la zona saturada evoca un pistón

$$\theta = \theta_s, \qquad 0 \le z \le z_f$$
$$\theta = \theta_0, \qquad z_f \le z$$

donde z_f es la posición del frente saturado.

3. La distribución de las presiones es hidrostática en la zona saturada, con

$$\psi = h_{sup}, z = 0$$
$$\psi = \psi_f, z = z_f; \qquad \psi_f = -h_f \le 0$$

Nótese que, lo anterior implica que $\psi = h_{sup} - \left(h_{sup} + h_f\right) z / z_f$

Teoría. Conclusiones preliminares

Nótese que,

- De la segunda hipótesis $$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0, \qquad 0 \le z \le z_f$$
- De la ecuación de continuidad $$\frac{\partial q}{\partial z} = 0, \qquad 0 \le z \le z_f$$

donde $$q_s(t) = \frac{dI}{dt}, \qquad I(t) = (\theta_s - \theta_0) z_f(t)$$

- De la tercera hipótesis $$\frac{\partial H}{\partial z} = -\left[1 + \frac{h_{sup} + h_f}{z_f}\right], \qquad 0 \le z \le z_f$$

De la ley de Darcy

$$\frac{dI}{dt} = K_s \left[1 + \frac{h_{sup} + h_f}{z_f(t)}\right], \qquad I(t) = (\theta_f - \theta_0) z_f(t)$$

Teoría. Conclusiones preliminares

Para adaptar las hipótesis de Green y Ampt, el tubo se considera totalmente lleno de agua de modo que en la sección ubicada en la posición s la presióne n la interfaz suelo-pared, r=R, es constante de acuerdo con el principio de Pascal: $\psi = h_R(s)$, donde R es el radio del tubo.

Durante la infiltración se forman dos zonas de humedecimiento, una totalmente saturada y otra seca con el contenido de humedad inicial:

$$\theta = \theta_s, \qquad R \le r \le r_f = r_f(t,\omega,s)$$
$$\theta = \theta_0, \qquad r_f(t,\omega,s) \le r$$

$r_f(t,\omega,s)$ – es la posición del frente saturado en la columna

La distribución de las presiones es hidrostática siguiendo el siguiente comportamiento:

$$\psi = h_R(s), \qquad r = R$$
$$\psi = \psi_f, \qquad r = r_f(t,\omega,s)$$

$$\psi = h_R - (h_R + h_f)(r - R)/(r_f - R)$$

Teoría

Nótese que,

- De la segunda hipótesis $$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0, \qquad R \le r \le r_f\left(t,\omega,s\right)$$
- De la ecuación de continuidad $$\frac{\partial q_r}{\partial r} = 0, \qquad R \le r \le r_f\left(t,\omega,s\right)$$

donde $$q_s\left(t,\omega,s\right) = \frac{dI}{dt}, \qquad I\left(t,\omega,s\right) = \left(\theta_s - \theta_0\right)\left(r_f\left(t,\omega,s\right) - R\right)$$

- De la tercera hipótesis $$\frac{\partial H}{\partial r} = -\left[\cos\left(\omega\right) + \frac{h_R + h_f}{r_f - R}\right]$$

De la ley de Darcy

$$q_r\left(t,\omega,s\right) = \frac{\partial I\left(t,\omega,s\right)}{\partial t} = K_s\left[\cos\left(\omega\right) + \frac{\lambda\left(s\right)}{I\left(t,\omega,s\right)}\right], \qquad \lambda\left(s\right) = \left(\theta_s - \theta_0\right)\left(h_f + h_R\left(s\right)\right)$$

Teoría

De donde se obtiene que

$$K_s \cos(\omega) t = I(t,\omega,s) - \frac{\lambda(s)}{\cos(\omega)} \ln\left[1 + \frac{I(t,\omega,s)}{\lambda(s)} \cos(\omega)\right]$$

Caso $\omega = 0:$

$$K_s t = I(t,0,s) - \lambda(s) \ln\left[1 + \frac{I(t,0,s)}{\lambda(s)}\right]$$

Green y Ampt (1911)

Caso $\omega = \pi/2:$

$$I(t,\pi/2,s) = S(s)\sqrt{t}, \qquad S(s) = \sqrt{2K_s \lambda(s)}$$

Caso $\omega = \pi:$

$$K_s t = \lambda(s) \ln\left[\frac{\lambda(s)}{\lambda(s) - I(t,\pi,s)}\right] - I(t,\pi,s)$$

de donde se deduce que la máxima lámina de agua que entra al suelo en esta posición es

$$I(\infty,\pi,s) = \lambda(s)$$

Teoría

En una sección transversal del tubo ubicada en la posición dada s, el volumen por unidad de longitud del mismo queda definida por:

$$A_I(t,s) = 2R\int_0^{\pi} I(t,\omega,s)\,d\omega$$

El volumen infiltrado a lo largo del tubo circular de diámetro D_S y longitud L_S, formando un ángulo α con respecto a la horizontal, queda definido por:

$$V_I(t) = \int_0^{L_S} A_I(t,s)\,ds$$

Aplicaciones

Se considera un suelo del Valle de Guadalupe con los siguientes valores de densidad total seca y densidad de sólidos, respectivamente

$$\rho_t = 1.35 \frac{g}{cm^3}, \qquad \rho_o = 2.65 \frac{g}{cm^3}$$

La porosidad se calcula mediante la formula $\phi = 1 - \rho_t / \rho_0$

El contenido de humedad a saturación se toma como $\theta_s = \phi$

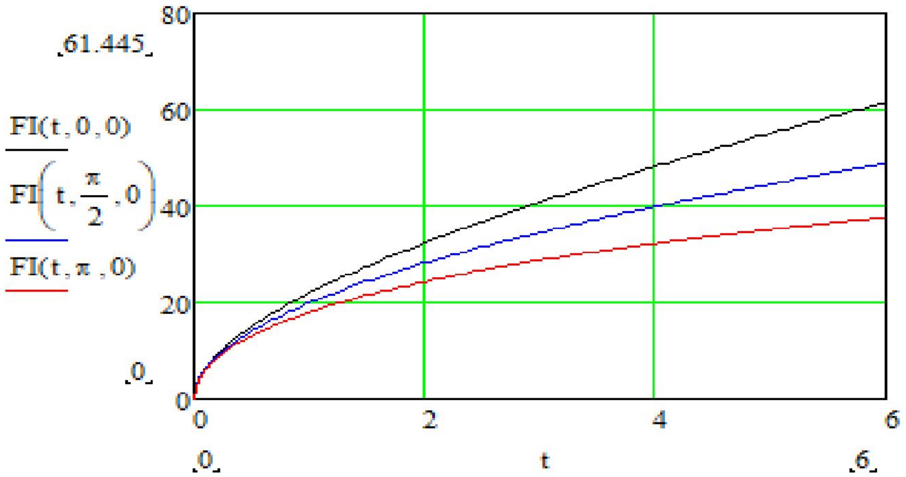
Numéricamente, los valores del contenido de humedad a saturación, de la conductividad hidráulica a saturación y de la succión en el frente de humedecimiento son:

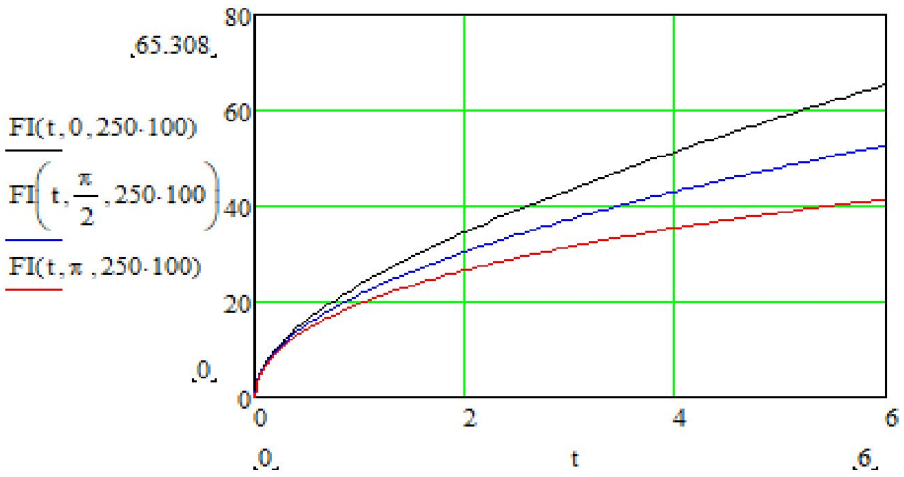
$$\theta_s = 0.4906 \frac{cm^3}{cm^3}, \qquad K_s = 3 \frac{cm}{h}, \qquad h_f = 30 \text{ cm}$$

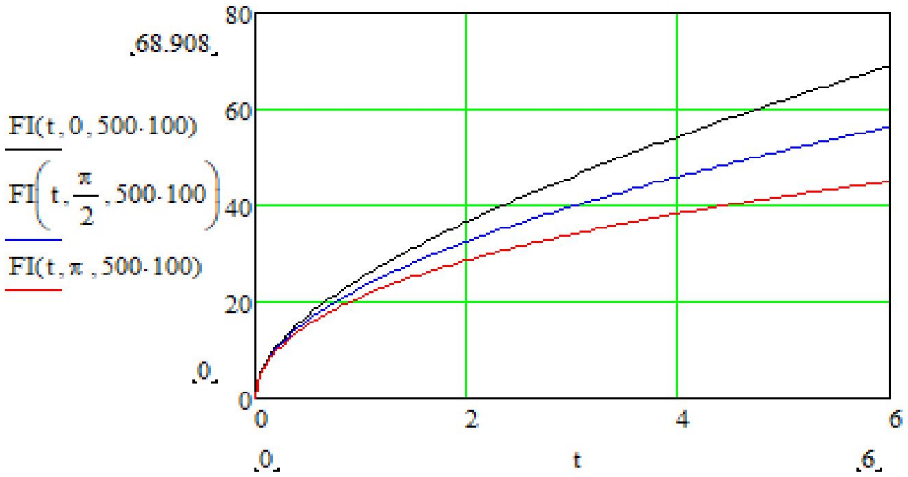
Se seleccionó un tubo de 6 pulgadas de diámetro, con longitud de 500m enterrado a una profundidad de 1.2m con una pendiente de 0.001 rad, la presión en la cabecera es tomada igual a la profundidad en la posición de inicio del tubo.

$$\theta_o = 0.05 \frac{cm^3}{cm^3}, \qquad \alpha = 0.001 \text{ rad}, \qquad h_o = 120 \text{ cm}$$

Aplicaciones

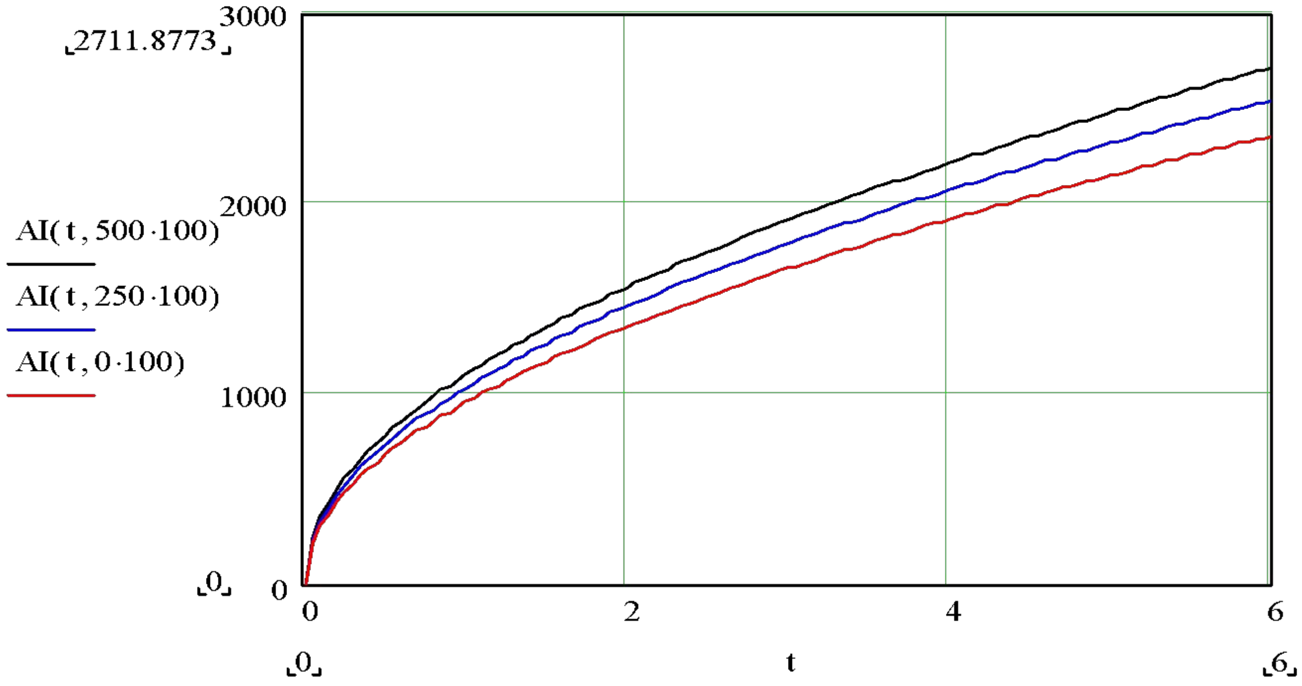






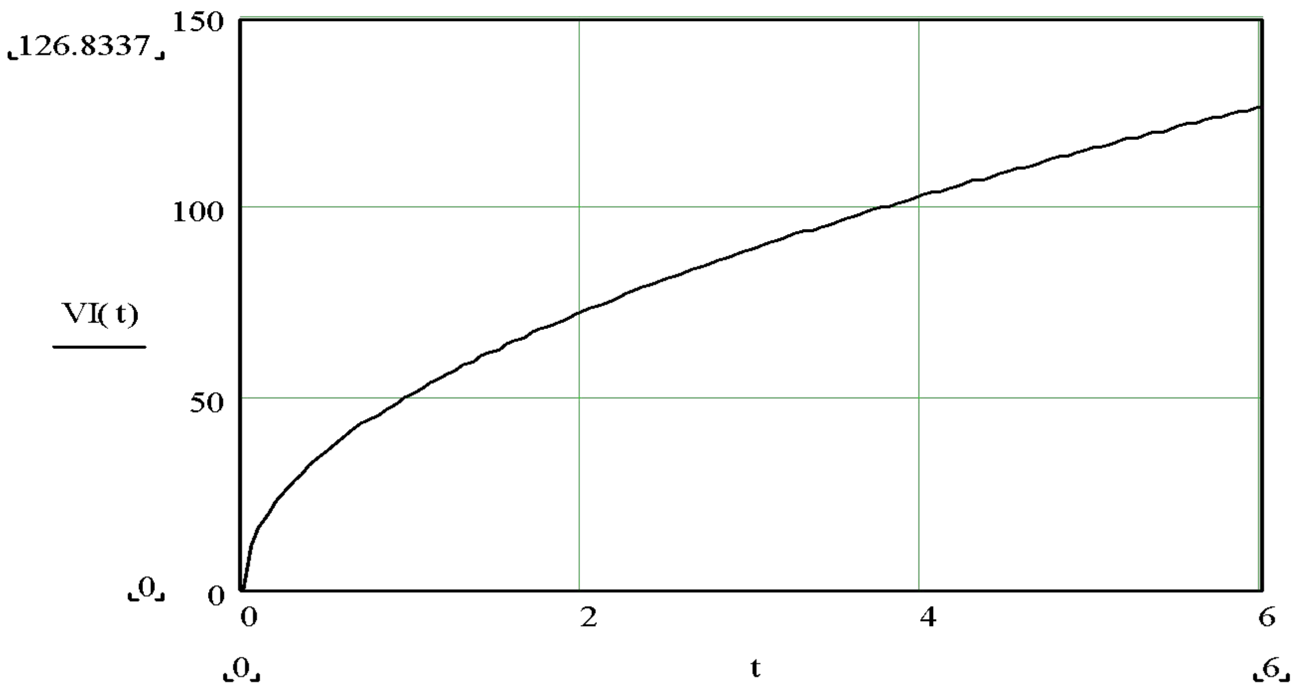
Evolución de la lámina infiltrada en la sección posicionada en a)0m, b)250m, c)500m, en las columnas ubicadas, respectivamente, en $\omega = 0, \pi / 2, \pi$. La ordenada está en cm^2 y el tiempo en horas.

Aplicaciones



Evolución del volumen infiltrado por unidad de longitud en las secciones: i)0m, inicio; ii)250m, mitad; iii)500m, final. La ordenada está en cm^2 y el tiempo en horas.

Aplicaciones



Evolución temporal del volumen infiltrado por un tubo de 6'' de diámetro, con pared porosa, de 500m de longitud, enterrado a una profundidad media 1.2m, con una pendiente 0.001, y completamente lleno de agua. El volumen está en m^3 y el tiempo en horas.

Conclusiones

La solución analítica obtenida para describir la infiltración a partir de un tubo completamente lleno de agua con la finalidad de una posible recarga del acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México, se ha ilustrado en una avenida dada y un tubo de 6" de diámetro, con pared porosa, de 500m longitud, enterrado a una profundidad media de 1.2m, con una pendiente de 0.001. En seis horas el volumen total infiltrado es de 126.834 m^3, mientras que el volumen en el interior del tubo es de 9.121 m^3. El volumen total captado por este sistema formado por un solo tubo es 135.954 m^3.

La captación de un volumen mayor de agua a través de este sistema con la finalidad de recargar el acuífero, se debe llevar a cabo mediante la instalación de un mayor número de tubos. Sin embargo, la decisión debe ser tomada después de un análisis de costos del sistema y de los beneficios obtenidos.

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

Sexto
Congreso Nacional de
Riego, Drenaje y Biosistemas
COMEII- 2021 / Hermosillo, Sonora

¡GRACIAS!

Fernando Alcántara López

Facultad de Ciencias, UNAM

alcantaralopezfernando@gmail.com