

INFILTRACIÓN DE AGUA LLUVIA EN JARDINES DE BIORRETENCIÓN

ALEJANDRO DUSSAILLANT J.

Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile.
Av. Vicuña Mackena 4860. Casilla 222 Correo 22, Santiago, Chile.
Teléfono: 3544227; Fax: 3545876
e-mail: adussa@ing.puc.cl

RESUMEN

La gestión de aguas lluvias tradicional no mitiga la pérdida de agua subterránea producto del bombeo y la disminución de la recarga asociados a la urbanización. Las prácticas basadas en la infiltración, tales como los llamados jardines de biorretención, ofrecen una alternativa potencialmente efectiva para contrarrestar ésta pérdida de agua subterránea. Un jardín de biorretención es un jardín diseñado en una depresión poco profunda que recibe las aguas lluvia que escurren provenientes de superficies impermeables conectadas a éste, focalizando la recarga. Se desarrolló un modelo numérico que puede ser aplicado al diseño y evaluación de jardines de biorretención. El modelo considera el flujo de agua a través de tres capas del perfil de suelo del jardín – zona de raíces, zona de almacenamiento y zona de permeabilidad baja. Para simular continuamente la recarga, el rebalse y la evapotranspiración, el modelo acopla la ecuación de Richards con un balance del agua en la depresión superficial del jardín. Para una aplicación en la zona húmeda del medio oeste de EE.UU., los resultados de las simulaciones indican una alta tasa de recarga, el doble de la natural. Un jardín de sólo un 10% del área impermeable aportante maximiza la recarga.

ABSTRACT

Traditional stormwater management does not mitigate groundwater depletion resulting from groundwater pumping and reduction in recharge. Infiltration practices, such as rain gardens, offer a potentially effective approach for addressing groundwater depletion. A rain garden is a landscaped garden in a shallow depression that receives the stormwater from nearby impervious surfaces, focusing recharge. We have developed a numerical model that can be applied in rain garden design and evaluation. Water flow through the rain garden soil is modeled over three layers- a root zone, a middle storage layer of high conductivity, and a subsoil lower layer. To continuously simulate recharge, runoff and evapotranspiration, the model couples the Richards Equation with a surface water balance. For the climate of southern Wisconsin, simulation results show that very high recharge rates are possible (twice the natural annual rates). A rain garden with an area of approximately 10% of the contributing impervious area maximizes groundwater recharge.



INFILTRACIÓN DE AGUA LLUVIA EN JARDINES DE BIORRETENCIÓN

1 Introducción

La urbanización, de creciente ocurrencia mundial, tiene efectos hidrológicos adversos (Klein 1979; Leopold 1968). La preocupación principal del manejo del agua lluvia ha sido el aumento del peak del hidrograma urbano debido a la introducción de áreas impermeables y el sistema de drenaje. (Booth and Jackson 1997; Ferguson 1990; Leopold 1968). Pero la baja del agua subterránea ha sido un impacto de la urbanización usualmente menospreciado, causada por el aumento del bombeo y el descenso en la recarga.

Más de 1.5 billones de personas en el mundo dependen del agua subterránea como su fuente primaria de agua potable (Alley et al. 2002). Adicionalmente, ecosistemas acuáticos como lagos, ríos y humedales dependen usualmente de la descarga de agua subterránea (NRC 1992), que les provee de una fuente de agua relativamente constante en caudal, temperatura y calidad (Klein 1979).

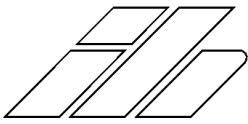
La gestión tradicional del agua lluvia, que se basa fuertemente en el almacenaje, no mitiga el descenso del agua subterránea que resulta del bombeo para usos humanos y de la reducción de la recarga por la impermeabilización del suelo (Ferguson 1990). De hecho la recarga artificial se está haciendo cada vez más interesante como una estrategia de manejo del agua subterránea (Alley et al. 2002), pero hace falta investigación sobre recarga localizada en zonas urbanas (Lerner 2002). Los jardines de biorretención son una nueva alternativa en pos de la recarga artificial.

Un jardín de biorretención consta de una depresión poco profunda en el terreno, de pequeña extensión, que recibe el agua lluvia de una o más superficies impermeables adyacentes, como techumbres o estacionamientos. Las plantas del jardín incentivan una zona de raíces biológicamente activa que ayuda a mantener la infiltrabilidad del suelo, a través de una red de macroporos que proveen una alta conductividad hidráulica, especialmente en condiciones de saturación (Beven and Germann 1982). Adicionalmente, la transpiración de las plantas entre episodios de lluvia ayuda a restaurar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Se desarrolló un modelo numérico de la recarga focalizada hacia el agua subterránea, denominado RECHARGE, que puede ser aplicado al diseño y evaluación de jardines de biorretención. El perfil de suelo del jardín se representa como tres capas homogéneas. La capa superior representa la zona de raíces, que sería diseñada típicamente como de textura gruesa y rica en materia orgánica. La zona intermedia, de almacenamiento, es una capa de conductividad alta para percolar el agua infiltrada rápidamente. La zona inferior representa el suelo urbano, que puede restringir el flujo ya sea por su contenido de arcilla o su compactación.

El propósito de este modelo es el simular el balance hídrico de un jardín de biorretención que recibe el escurrimiento de agua lluvia de una o más superficies impermeables. El modelo puede ser usado para diseñar las dimensiones críticas del jardín, incluyendo su área superficial, la profundidad de apozamiento y grosor de la zona de almacenamiento.

RECHARGE, que está basado en la ecuación de Richards, incluye los procesos más relevantes: almacenamiento por intercepción y depresión, escurrimiento desde una superficie impermeable, apozamiento e infiltración a través de un perfil heterogéneo de



suelo, así como evapotranspiración y rebalse, en un proceso de simulación continua donde el agua superficial y el flujo del agua en el suelo están acoplados.

El modelo se aplicó a las condiciones climáticas del sur de Wisconsin, EE.UU., durante la estación de lluvias (abril a septiembre) para el período 1992-1997. El objetivo de la aplicación del modelo fue explorar cómo las dimensiones del jardín de biorretención afectan la cantidad de recarga y la duración de las condiciones saturadas en la zona de raíces, que afectan la supervivencia de las plantas.

2 Métodos

2.1 Ecuación de Richards

El modelo RECHARGE está basado en la formulación mixta de la ecuación de Richards para flujo de agua en suelo en condiciones no saturadas (Richards 1931), incluyendo la transpiración de las plantas como un sumidero:

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

donde θ es el contenido volumétrico de humedad ($[L]^3/[L]^3$), h es la succión ($[L]$), z es la posición en el eje vertical ($[L]$), t es tiempo ($[T]$), K es la conductividad hidráulica no saturada ($[L]/[T]$) y S es la tasa de transpiración de las plantas ($1/[T]$). $\partial \theta / \partial h$ es la función de capacidad de humedad del suelo, y es referida más abajo como $M(h)$. La formulación utilizada asume flujo en una fase, unidimensional y vertical por la matriz del suelo, en condiciones isotérmicas y sin efectos del aire en el suelo

2.2 Balance del agua superficial

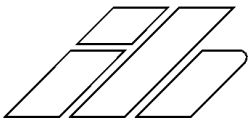
El balance hídrico de la depresión superficial del jardín de biorretención se puede expresar como:

$$A \frac{dh_s}{dt} = Q_{LLUVIA} + Q_{ESCORRENTIA} - Q_{INFILTRACION} - Q_{REBALSE}, \quad (2)$$

donde A es el área de jardín ($[L]^2$), h_s es la profundidad del agua apozada ($[L]$) y los flujos Q son los inputs y outputs de la depresión ($[L]^3/[T]$). Se consideró que la lluvia y escorrentía entrante se distribuyen uniformemente sobre el área de jardín. Se produce rebalse una vez que h_s supera la profundidad de apozamiento máxima h_d .

Si se supone que el tiempo de concentración para el escurrimiento es despreciable – que para el caso de una techumbre es razonable, dado que los tiempos de concentración son del orden de minutos en general (Hollis and Ovenden 1988) –, el gasto total de agua que entra al jardín se puede aproximar como:

$$Q_{IN} = Q_{LLUVIA} + Q_{ESCORRENTIA} = Q_{LLUVIA} \cdot \left(1 + \frac{1}{L} \right), \quad (3)$$



donde L representa la razón de área de jardín al área de superficie impermeable conectada. Q_{IN} además incluye una abstracción debida al almacenamiento en el techo, que se asume se evapora completamente entre eventos de lluvia.

2.3 Propiedades hidráulicas del suelo

Las propiedades del suelo $\theta(h)$, $K(h)$ y $M(h)$, necesarias para resolver la ecuación de Richards fueron aproximadas usando las ecuaciones de van Genuchten-Mualem (Mualem 1976; van Genuchten 1980), que considerando la ausencia de histerésis, son:



$$\theta(h) = \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{[1 + (\alpha|h)^n]^m} + \theta_{res}, \quad (4)$$

$$K(h) = K_{sat} \frac{\left\{1 - (\alpha|h)^{n-1} [1 + (\alpha|h)^n]^m\right\}^2}{[1 + (\alpha|h)^n]^{m/2}}, \quad (5)$$

$$M(h) = \frac{d\theta}{dh} = \frac{\alpha m (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left\{1 - [1 + (\alpha|h)^n]^m\right\}}{1 - m [1 + (\alpha|h)^n]^m}, \quad (6)$$

donde θ_{sat} es el contenido de humedad saturado ($[L]^3/[L]^3$), θ_{res} es el contenido de humedad residual ($[L]^3/[L]^3$), K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada ($[L]/[T]$), y m y n son parámetros (donde $m=n+1$).

2.4 Discretización del modelo

La forma mixta de la ecuación de Richards es discretizada usando un esquema de diferencias finitas del tipo Crank-Nicholson, donde la ponderación puede ser elegida en el rango 0.5 (Crank-Nicholson tradicional) a 1.0 (totalmente implícita). La forma discretizada para la ecuación (1) es:

$$\frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta z} \left[\left(w K_{i-1/2}^{n+1} \left(\frac{\Delta h_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right) + (1-w) K_{i-1/2}^n \left(\frac{\Delta h_{i-1/2}^n}{\Delta z} + 1 \right) \right) - \left(w K_{i+1/2}^{n+1} \left(\frac{\Delta h_{i+1/2}^{n+1}}{\Delta z} + 1 \right) + (1-w) K_{i+1/2}^n \left(\frac{\Delta h_{i+1/2}^n}{\Delta z} + 1 \right) \right) \right] - S_i^n,$$

donde i y n corresponden a los índices de discretización espacial y temporal, respectivamente. Notar que el nodo 1 está en la superficie del suelo. Dadas la condición de borde superior (ecuación 2), las propiedades hidráulicas del suelo (ecuaciones 4 a



6), y la condición de borde inferior (gradiente unitario), el problema resulta ser un sistema de N ecuaciones con N incógnitas, de la forma:

$$A_i h_{i-1}^{n+1} + B_i h_{i-1}^{n+1} + C_i h_{i-1}^{n+1} = D_i$$

donde los parámetros A , B , C , and D son constantes. Este sistema se resuelve usando el algoritmo de Thomas, con una iteración tipo Picard modificada para asegurar balance de masa (Celia et al. 1990). Se utilizó un esquema adaptativo de discretización del tiempo (Kavetski et al. 2001).

3 Resultados y Discusión

3.1 Aplicación del modelo: Madison, Wisconsin, EE.UU.

Se condujeron simulaciones continuas usando datos de lluvia horarios para Madison, Wisconsin (EE.UU.), para los meses de abril a septiembre del período 1992-1997, para evitar condiciones de congelamiento.

Las características del perfil de suelo (Tabla 1) corresponden a condiciones típicas (Rawls et al. 1993).

Tabla 1 Parámetros de Mualem-van Genuchten para las capas de suelo del jardín

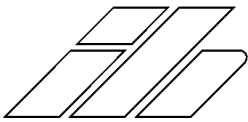
Característica	Zona de raíces	Zona almacenamiento	Zona confinante
Textura	Limo	Arena	Limo arcilloso
Grosor (cm)	30	{0, 30, 90}	10
α (cm ⁻¹)	0.01	0.01	0.01
n	1.600	1.378	1.242
$\theta_{residual}$	0.02	0.041	0.075
θ_{sat}	0.41	0.41	0.39
K_{sat} (cm/h)	10.16	15.00	{0.25, 1.00}

Interesaba determinar el efecto de los siguientes parámetros (valores explorados en paréntesis) en la recarga potencial, rebalse y condiciones saturadas para las plantas:

- (a) Razón (L) de jardín a superficie impermeable: {2.5, 5, 10, 20, 50} %.
- (b) Grosor (ST) de la zona de almacenamiento: {0, 30, 90} cm.
- (c) Profundidad de la depresión (h_d): {10, 15, 45} cm.
- (d) Conductividad hidráulica saturada del subsuelo (K_{ss}): {0.25, 1.00} cm/h.

(a) Razón de Áreas (L):

La razón de áreas determina la cantidad de agua que recibe el jardín. La Figura 1 ilustra los resultados de la simulación para $ST = 90$ cm, $h_d = 15$ cm. (Los flujos anuales están calculados en unidades de profundidad, y representan el volumen total anual dividido por el área conjunta de jardín y superficie impermeable conectada.) Las tendencias mostradas entre recarga y rebalse versus razón de áreas son representativas de todos los casos modelados. Al aumentar la razón de áreas, el rebalse tiende a cero. Los resultados para la recarga son algo más complejos. Al aumentar L , la recarga aumenta hasta alcanzar un máximo y luego decrece. Para el



caso mostrado en la Figura 1, aumentar la razón por sobre 10% no trae beneficio adicional. A mayor razón de áreas, la evapotranspiración tiende a aumentar proporcionalmente, pues el agua infiltrada percola a menos profundidad.

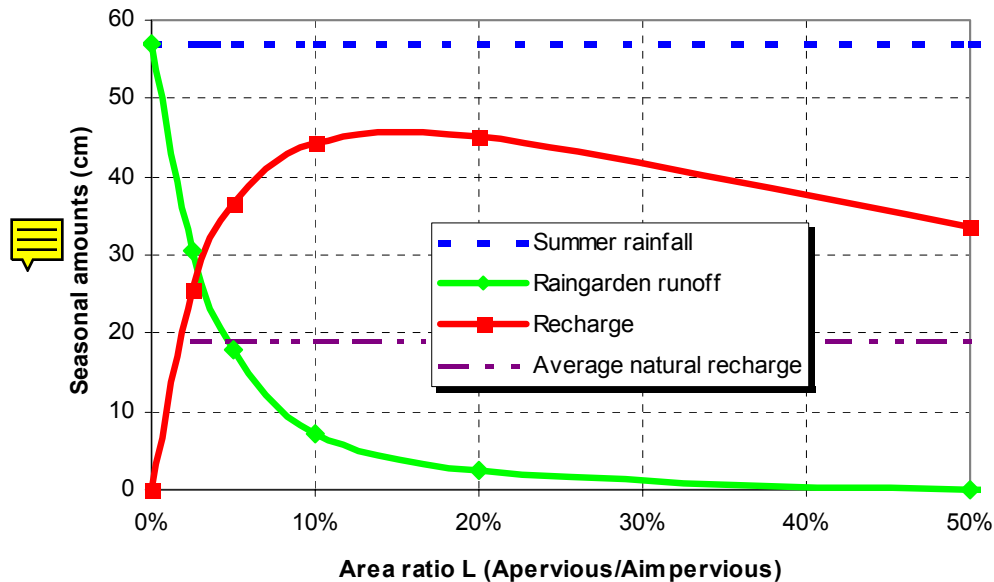


Figura 1: Resultados de simulaciones para recarga y rebalse (promedios areales considerando áreas impermeable y permeable) para Madison 1992-1997 ($ST=90$ cm, $h_d=15$ cm, $K_{ss}=1$ cm/h).

Para este caso, la máxima recarga alcanzó 45 cm, alrededor del 80% de la lluvia media anual para abril-septiembre. Este es del orden del doble que la tasa natural de recarga para los limos de esta región en condiciones de cubierta vegetal total.

(b) Grosor de la Capa de Almacenamiento (ST):

La zona de almacenamiento tiene como fin proteger la zona de raíces de períodos saturados demasiado largos, dejando tiempo para el drenaje. No obstante, los resultados indican que la percolación es bastante insensible incluso al triplicado de ST desde 30 a 90 cm.

La zona de almacenamiento provee beneficios modestos con respecto a controlar saturación de la zona de raíces (Tabla 2). Los resultados indican que el tiempo total decrece al aumentar ST , pero éste tiene baja influencia sobre el tiempo máximo de saturación, excepto para grandes áreas.

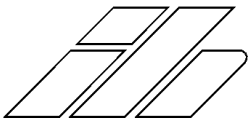


Tabla 2 Tiempos de saturación para 1992-1997 ($h_d=15$ cm, $K_{ss}=1.0$ cm/h)

L (%)	Tiempo de saturación máximo (h) / Tiempo de saturación total (h)		
	ST=0 cm	ST=30 cm	ST=90 cm
2.5	73 / 4680	73 / 4498	69 / 3983
5	54 / 3398	53 / 3072	51 / 2475
10	48 / 2068	44 / 1735	41 / 1196
20	38 / 963	37 / 703	37 / 407
50	27 / 293	22 / 153	15 / 56

(c) Depression Depth (h_d):

La depresión del jardín permite el almacenamiento de agua durante el tiempo donde la intensidad de la lluvia excede la tasa de infiltración. Los resultados para simulaciones con $K_{ss}=1$ cm/h indican que la recarga aumenta con h_d , especialmente para L bajo 20% (Figura 2). Sin embargo, los tiempos de saturación también aumentan al aumentar la profundidad de la depresión, especialmente para las razones de área menores (Tabla 3).

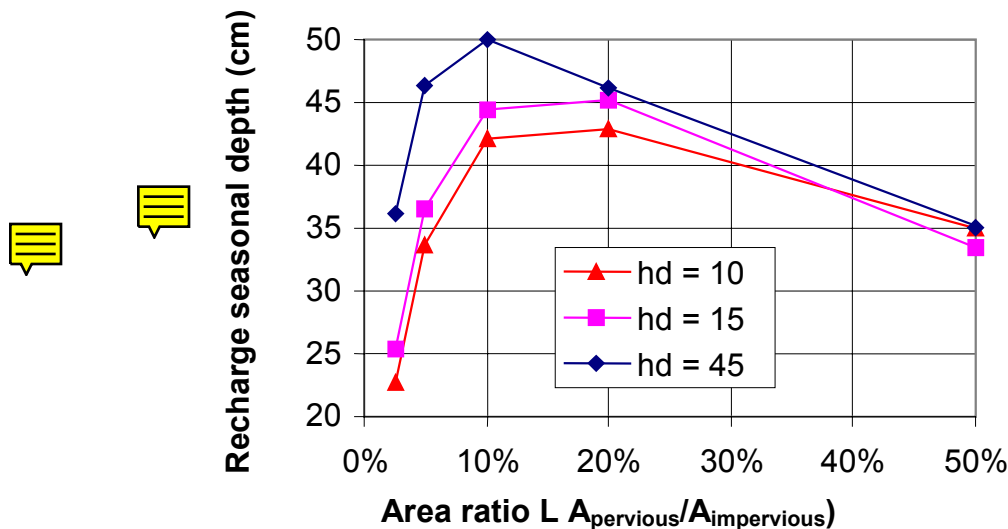


Figura 6: Resultados modelación recarga para Madison, 1992-1997, para depresiones h_d , de 10, 15 y 45 cm ($ST=90$ cm y $K_{ss}=1$ cm/h).



Tabla 3. Tiempos de saturación jardín para 1992-1997 ($ST=90$ cm, $K_{ss}=1.0$ cm/h)

L (%)	Tiempo de saturación máximo (h) / Tiempo de saturación total (h)		
	$h_d=10$ cm	$h_d=15$ cm	$h_d=45$ cm
2.5	48 / 3206	69 / 3983	192 / 6935
5	44 / 2060	51 / 2475	113 / 3836
10	35 / 1033	41 / 1196	71 / 1603
20	27 / 344	37 / 407	58 / 463
50	14 / 54	15 / 56	14 / 52

(d) Conductividad Hidráulica Saturada del Subsuelo (K_{ss})

Después de que las zonas de raíces y de almacenamiento se saturan, la infiltración es controlada por la conductividad hidráulica del subsuelo. Para una reducción de K_{ss} (0.25 cm/h en lugar de 1.0 cm/h), la recarga es moderadamente inferior y el máximo ocurre a un L mayor (Figura 3), lo que sucede para todos los casos de h_d . Sin embargo, los tiempos de saturación aumentan dramáticamente para K_{ss} menores (Tabla 4), y probablemente exceden las posibilidades de supervivencia de la mayor parte de las plantas.

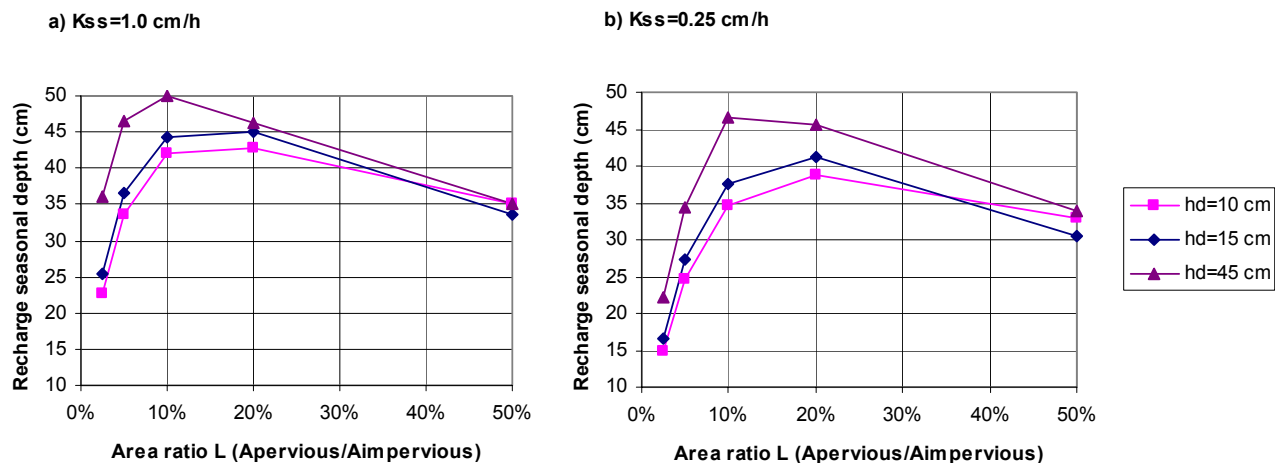
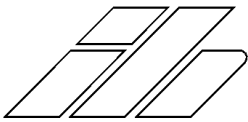


Figura 3: Recarga modelada para Madison, 1992-1997, para diferentes depresiones (h_d), para $ST=90$ cm y diferentes conductividades hidráulicas del subsuelo K_{ss} : a) $K_{ss}=1.0$ cm/h; b) $K_{ss}=0.25$ cm/h

Tabla 4. Tiempos de saturación jardín para 1992-1997 ($h_d=15$ cm, $K_{ss}=0.25$ cm/h)

L (%)	Tiempo de saturación máximo (h) / Tiempo de saturación total (h)		
	$ST=0$ cm	$ST=30$ cm	$ST=90$ cm
2.5	364 / 13547	363 / 13369	362 / 12456
5	362 / 11397	362 / 10810	360 / 9556
10	233 / 8135	232 / 7361	231 / 5691
20	188 / 4684	187 / 3833	180 / 2473
50	91 / 1770	81 / 1155	81 / 488



4 Conclusiones

El modelo RECHARGE provee un acople exitoso de la ecuación de Richards con el balance hídrico de la depresión superficial del jardín, como condición de borde superior. El modelo es una herramienta potencialmente útil para el diseño de jardines de retención, en particular para aumentar la recarga al agua subterránea.

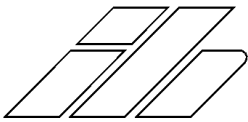
Para las condiciones climáticas del sur de Wisconsin, EE.UU., los resultados de las simulaciones del modelo indican que se pueden alcanzar tasa de recarga muy altas, incluso doblando las tasa naturales. Para este caso, la tasa de recarga se maximiza para un jardín de aproximadamente 10 a 20% del área de la superficie impermeable contribuyente.

El grosor de la capa de suelo de almacenamiento afecta la saturación de la zona de raíces suprayacente, especialmente si el subsuelo es relativamente permeable. Sin embargo, en un rango de diseño razonable, este parámetro parece no tener mucho efecto en la duración máxima de condiciones saturadas en la zona de raíces, factor clave para la supervivencia de las plantas. Notar que esto puede ser, al menos en parte, consecuencia de la unidimensionalidad del modelo; flujos laterales potencialmente pueden atribuir mayor valor a la zona de almacenamiento. Para las simulaciones realizadas, la profundidad de la depresión superficial tuvo un efecto significativo en los tiempos máximos y totales de saturación.

La efectividad de un jardín de biorretención depende de manera crítica de la conductividad hidráulica de la zona bajo la capa de almacenamiento. Para conductividades hidráulicas saturadas por debajo de aproximadamente 0.5 cm/h, la duración de condiciones de saturación en la zona de raíces sería excesivas, para las condiciones climáticas del sur de Wisconsin. Obviamente, se podría instalar un drenaje para controlar este caso, con algo de disminución de la recarga potencial claro está.

5 Agradecimientos

Quisiera agradecer al profesor John Norman por sus útiles comentarios sobre el modelo numérico. El financiamiento de este proyecto provino del fondo Water and Watersheds de la U.S.E.P.A. número R-82801001, de la Universidad de Wisconsin, de la P. Universidad Católica de Chile, y de MIDEPLAN Chile.



6 Referencias

- Alley, W. M., Healy, R. W., LaBaugh, J. W., and Reilly, T. E. (2002). "Flow and storage in groundwater systems." *Science*, 296, 1985-1990.
- Beven, K., and Germann, P. (1982). "Macropores and water flow in soils." *Water Resources Research*, 18(5), 1311-1325.
- Booth, D. B., and Jackson, C. R. (1997). "Urbanization of aquatic ecosystems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation." *J. American Water Resources Association*, 33(5), 1077-1090.
- Celia, M. A., Boulatas, E. T., and Zabra, R. L. (1990). "A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation." *Water Resources Research*, 27(7), 1483-1496.
- Ferguson, B. K. (1990). "Role of the long-term water balance in management of stormwater infiltration." *J. Environmental Management*, 30, 221-233.
- Hollis, G. E., and Ovenden, J. C. (1988). "The quantity of stormwater runoff from ten stretches of road, a car park and eight roofs in Hertfordshire, England during 1983." *Hydrological Processes*, 2, 227-243.
- Kavetski, D., Binning, P., and Sloan, S. W. (2001). "Adaptive time stepping and error control in a mass conservative numerical solution of the mixed form of Richards equation." *Advances in Water Resources*, 24, 595-605.
- Klein, R. D. (1979). "Urbanization and stream quality impairment." *Water Resources Bulletin*, 15(4), 948-963.
- Leopold, L. B. (1968). "Hydrology for urban land planning: a guidebook on the hydrologic effect of land use." *Circular 554*, U.S. Geological Survey.
- Lerner, D. N. (2002). "Identifying and quantifying urban recharge: a review." *Journal of Hydrogeology*, 10, 143-152.
- Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- N.R.C., U.S.A.-. (1992). *Restoration of aquatic ecosystems: science, technology and public policy*.
- Rawls, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L., and Shirmohammadi, A. (1993). "Infiltration and Soil Water Movement." *Handbook of Hydrology*, Maidment, ed., Academic Press, New York, 5.1-5.51.
- Richards, L. A. (1931). "Capillary conduction of liquids through porous mediums." *Physics*, 1, 318-333.
- Schnabel, R. R., and Richie, E. B. (1984). "Calculation of internodal conductances for unsaturated flow simulations: a comparison." *Soil Science of America Journal*, 48, 1006-1010.
- van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America J.*, 44, 892-898.