

MODELIZACIÓN DEL FLUJO TRANSITORIO EN SUELOS FRANCO-LIMOSOS UTILIZANDO HYDRUS-1D

C. Rubio¹, P. Llorens¹ y M. Th. Van Genuchten²

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (CSIC), Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028 Barcelona, España, crubio@ija.csic.es

² George E. Brown Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS, 450 Big Springs Rd. Riverside, CA, USA.

RESUMEN. El modelo Hydrus-1D (Simunek et al. 1998a), basado en la ecuación de Richards, se ha utilizado para estudiar los flujos transitorios en profundidad, de una terraza de cultivo abandonada con una cubierta vegetal herbácea (cuencas experimentales de Vallcebre, NE España). Con dicho modelo, se ha realizado un ejercicio de calibración y validación utilizando potenciales mátricos y humedades volumétricas del perfil. Los resultados obtenidos han mostrado un buen ajuste a los datos de tensiometría medidos en campo cuando el perfil se humecta, para la profundidad de -20 cm (RMSE=1kPa en validación), mientras que para el resto del perfil se observa una reacción más lenta del modelo. Los contenidos hídricos simulados sobreestiman ligeramente los medidos. Cuando la demanda evapotranspirativa es elevada, el modelo sobreestima ligeramente los potenciales mátricos y los contenidos hídricos, sobre todo para los niveles superficiales del perfil. Estas diferencias pueden relacionarse con procesos de contracción-expansión de este tipo de suelos franco limosos.

ABSTRACT. The Hydrus-1D software package (Simunek et al. 1998a), based on the Richards equation, was used to study transient flow in an abandoned terraced area under grass. The field site was located in the Vallcebre research catchments (Eastern Pyrenees, North-Eastern Spain). A split test was carried out to calibrate and evaluate the model using observed matric potential and water content profiles. Results obtained showed a good agreement with the field data during wetting at 20cm depth (RMSE=1kPa for the validation), but a slow reaction of the simulated potentials with depths. Observed water contents and pressure heads were overestimated during periods of high evaporative demand. Some of the results may have been caused by the presence of shrinkage/swelling processes in the silt loam soil, which were only partially accounted for in the model.

1. Introducción

Durante las últimas décadas, se han desarrollado modelos, empíricos y teóricos, para predecir los flujos

hídricos y el transporte de solutos en la zona no saturada del suelo. Estos modelos, todavía encuentran en su solución ciertas dificultades tanto conceptuales como de análisis, sobretudo a escala de evento transitorio (Abassi et al. 2004). La incertidumbre en la solución de los modelos se debe a la inestabilidad de los flujos hídricos, causada por las características intrínsecas del propio flujo, y por las características estructurales del suelo (Skopp, 1981; Flühler et al. 1996; Jarvis, 1998), como pueden ser los procesos de contracción-expansión.

Además, en las cuencas de investigación de Vallcebre uno de los principales problemas encontrados al utilizar los modelos hidrológicos TOPMODEL y SHETRAN (Gallart et al. (1993, 1997) y Anderton et al. (2002a, 2002b)), ha sido la simulación de la respuesta de las cuencas a los primeros eventos de lluvia después del periodo de sequía estival.

Dentro de este marco teórico, el modelo evaluado en este trabajo es el Hydrus-1D (Simunek et al. 1998a), que simula la dinámica de flujos unidimensionales solucionando la ecuación de Richards (1931).

El objetivo de este trabajo es evaluar HYDRUS-1D, para simular flujos en suelos franco-limosos que presentan procesos de contracción-expansión (Sole et al. 1992) y valorar la respuesta del modelo a los primeros eventos en condiciones antecedentes secas.

2. Material y métodos

Hydrus-1D puede utilizar el modelo combinado de Mualem (1976) y van Genuchten (1980) o puede utilizar la ecuación de Vogel y Císlerová (1988), que modificando al modelo anterior confiere flexibilidad al sigmoide de la curva de retención cerca del área de saturación, mejorando teóricamente la simulación de flujos hídricos en suelos con procesos de expansión-contracción.

El modelo se ha aplicado a un perfil de suelo (0-100 cm) bajo prado mesófilo, en una terraza de cultivo abandonada con especies gramíneas y leguminosas, localizado en la cuenca de investigación de Can Vila (Vallcebre, NE de España). La información de que se dispone son las curvas

de retención obtenidas a partir de muestras inalteradas con los recipientes de tensión hídrica o 'sand box' (pF a saturación, 0.4, 1.0 y 1.5) y la membrana a presión (pF 3.0, 3.5 y 4.2). Y la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}) determinada con permeámetro de Guelph.

La precipitación (P) se ha obtenido a partir de un pluviómetro automático de la estación meteorológica ubicada en la cuenca; mientras que la evapotranspiración de referencia (E_0) ha sido calculada según Penman-Monteith FAO (Smith et al. 1992), a partir de las variables meteorológicas medidas en la misma estación (Tabla 1).

Para la medida de potencial matricial se dispone de un perfil tensiométrico, con 3 tensiómetros (Skye instruments Ltd.) en continuo (20, 40 y 60 cm), con un registro cada 20 minutos en la parte central de la terraza. Paralelamente, en un perfil adyacente y en un segundo situado en la parte interna de la misma terraza (cerca del talud que forma esta terraza con la superior), se ha medido la humedad volumétrica una vez por semana a partir del método de Reflectometría en el Dominio Temporal (TDR), con mediciones a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm utilizando un cable téster Tektronics 1502C.

La distribución de las raíces se ha estimado a partir de observaciones de campo y se ha descrito con la función Trapezoidal de Absorción de Gardner (1967), mientras que para la simulación del efecto del estrés hídrico del suelo sobre la absorción radicular se ha utilizado la función S-Shape de van Genuchten (1987).

2.1. Calibración

Para la calibración del modelo HYDRUS-1D se ha utilizado el periodo comprendido entre 5 de Octubre de 1996 y 28 de Junio de 1997 a paso de tiempo diario.

El perfil de suelo se ha discretizado en dos capas, desde superficie hasta los -80 cm de profundidad que presenta una textura franco-limosa, y desde ésta a -100 cm con una textura franco-arcillo-limosa.

Utilizando el software RETC (van Genuchten et al. 1991) se ha ajustado la relación $\theta(\psi)$ de los datos observados a la curva de retención, obteniendo los parámetros θ_r , θ_s (humedad volumétrica residual y a saturación), y α y N que son parámetros de forma de curva.

Las conductividades hidráulicas saturadas de campo (K_{fs}) utilizadas en la ecuación de van Genuchten (1980) han sido los valores medidos en los ensayos infiltrométricos, mientras que, utilizando la ecuación de Vogel y Císlerová (1988), estos valores se han aumentado 5 veces con objeto de mejorar la K_{fs} para suelos, como en nuestro caso, con valores del parámetro de curva N (van Genuchten, 1980) comprendidos entre 1.0 y 1.3 (Luckner et al. 1989).

Se han calibrado, a partir del método de ensayo-error, la distribución del aparato radicular, obteniendo una profundidad máxima de raíces de 75 cm, y el coeficiente de reducción del potencial mátrico (h_{50}) con un valor de -35.9 kPa para el modelo de van Genuchten (1987).

2.2. Validación

Para la validación del modelo (28 de Septiembre a 22 de Diciembre de 2003), se han utilizado las mismas propiedades básicas e hidrodinámicas que para la calibración. Para las condiciones iniciales de potencial mátrico se han utilizado medidas tensiométricas a -20, -40 y -60 cm.

Se ha validado también el contenido hídrico del suelo utilizando los 2 perfiles de TDR, en la parte interna (I) y en el centro de la terraza (C).

Tabla 1. Totales de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (E_0), utilizados en la evaluación del modelo Hydrus-1D.

| | Año | Nº Obs. (días) | P_{total} (mm) | E_0_{total} (mm) |
|-------------|---------|----------------|------------------|--------------------|
| Calibración | 1996-97 | 267 | 977.5 | 429.5 |
| Validación | 2003 | 86 | 349.3 | 80.9 |

2.3. Eficiencia del modelo

Los criterios de eficiencia utilizados han sido, el error medio (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) para evaluar los potenciales matriciales simulados, y el coeficiente de determinación (r^2) para la bondad del ajuste de los contenidos hídricos.

3. Resultados

3.1. Calibración

La Tabla 2 muestra la eficiencia del modelo en la calibración, que puede considerarse de aceptable para las dos ecuaciones utilizadas, con diferencias de subestimación de 0.2 kPa para los niveles más superficiales, y de 0.6 kPa en profundidad.

Tabla 2. Evaluación de la calibración de HYDRUS-1D para el Perfil C. h = profundidad del tensiómetro (cm), ME= error medio, RMSE= raíz cuadrada del error cuadrático medio, VG= van Genuchten, VC= Vogel y Císlerová.

| Octubre 1996-Junio 1997 | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Ecuación | ME (kPa) | | | RMSE (kPa) | | |
| | h_{-20} | h_{-40} | h_{-60} | h_{-20} | h_{-40} | h_{-60} |
| VG | -1.2 | -0.6 | 0.1 | 2.4 | 1.1 | 0.9 |
| VC | -1.4 | -0.8 | -0.5 | 2.5 | 1.2 | 0.7 |

La ecuación de van Genuchten es la que presenta una menor dispersión de los valores simulados, siendo las diferencias con la ecuación de Vogel y Císlerová de 0.1 kPa a -20 y -40 cm, y de 0.2 kPa a -60 cm.

3.2. Validación. Potencial hídrico.

La simulación utilizando la ecuación de van Genuchten (1980) (Fig. 1), para los niveles profundos (-40 y -60 cm) presenta un importante desfase en el tiempo de respuesta del modelo a la primera humectación (25.8 mm precipitación) después de un periodo muy seco (28/09 a 28/10), mostrando en la respuesta, diferencias de sobre

estimación de alrededor de 10 kPa, mientras que la respuesta del modelo para el nivel más superficial (-20 cm), se ajusta aceptablemente a los datos medidos.

La estimación de E_0 por HYDRUS-1D para el periodo simulado, presentan un valor similar, con un incremento de 7 mm respecto a la evapotranspiración calculada según Penman-Monteith FAO.

Al utilizar la ecuación de Vogel y Císlerová (1988), los valores simulados no mejoran el ajuste a los valores observados (Fig. 1).

La Tabla 3, muestra la eficiencia en términos de ME y RMSE para el periodo de validación de HYDRUS-1D. El modelo de van Genuchten presenta una relativa menor sobre estimación en profundidad (-60 cm) y una menor dispersión para todas las profundidades simuladas.

Tabla 3. Evaluación de la validación de HYDRUS-1D para el perfil C. h= profundidad del tensiómetro (cm), ME= error medio, RMSE= raíz cuadrada del error cuadrático medio, VG= van Genuchten, VC= Vogel y Císlerová.

| Octubre-Diciembre 2003 (86 días) | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ecuación | ME (kPa) | | | RMSE (kPa) | | |
| | h ₋₂₀ | h ₋₄₀ | h ₋₆₀ | h ₋₂₀ | h ₋₄₀ | h ₋₆₀ |
| VG | -0.1 | 0.8 | 0.8 | 1.0 | 2.8 | 2. |
| VC | -0.1 | 0.8 | 1.1 | 1.3 | 3.0 | 3. |

3.3. Validación. Humedad volumétrica.

La Tabla 4 muestra los ajustes entre los contenidos hídricos simulados utilizando la ecuación de van Genuchten. Para ello, se han utilizado los dos perfiles de humedad de suelo, uno en la parte interna (I) y otro en la parte central de la terraza, adyacente al perfil de tensiometría utilizado (C).

Tabla 4. Coeficientes de determinación (r^2) entre las humedades volumétricas observadas y simuladas a partir del modelo de van Genuchten (1980) para los perfiles I y C en validación, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$.

| Octubre-Diciembre 2003 (n= 86) | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Profundidad (cm) | 0-20 | 20-40 | 40-60 |
| Perfil I | 0.424 | 0.685 | 0.065 |
| Perfil C | 0.884 | 0.702 | 0.471 |

Tal como era de esperar, los ajustes para los dos perfiles disminuyen su bondad en profundidad, siendo el perfil C el que muestra los coeficientes de determinación (r^2) más elevados en todos los casos.

4. Discusión y conclusiones

El desfase temporal entre, la rápida respuesta hidrodinámica del suelo y la más lenta del modelo, se

incrementa a medida que las observaciones se hacen más profundas, presentando problemas para simular una rápida humectación del perfil en profundidad después de un periodo seco. Este comportamiento puede ser atribuido a la entrada de agua por vías preferenciales, que se dan en suelos con macro poros (por ejemplo Jarvis, 1994; Jarvis y Larsson, 1998; Christiansen et al. 2004), en nuestro caso, principalmente causados por procesos de humectación-deseccación que comportaran la aparición de grietas observados en el campo. Según Simunek et al. (1998b y 1999) y Ross y Smettem (2000), el hecho de obtener un peor ajuste con la ecuación de Vogel y Císlerová, puede deberse a la menor estabilidad temporal que presenta el modelo cuando el frente húmedo se mueve con rapidez en profundidad, debido a la existencia de estas vías de flujo preferencial.

Los resultados obtenidos muestran que, HYDRUS-1D simula aceptablemente los flujos hídricos en los niveles superficiales (-20 cm), siendo capaz de simular, tanto la rápida humectación como la respuesta a la demanda evapotranspirativa. El modelo presenta mayor dificultad en simular los primeros eventos de lluvia después de un periodo seco, especialmente para los niveles más profundos, con un tiempo de reacción demasiado largo frente a la rápida respuesta del suelo.

Se ha observado que, la humedad antecedente en el perfil determina la respuesta del modelo, sobre todo para los niveles más profundos, donde las diferencias a la respuesta hidrodinámica han sido más acusadas.

Los mejores ajustes de los contenidos hídricos lógicamente se obtienen para el perfil de la zona central, adyacente al perfil tensiométrico.

Tal y como ocurre con HYDRUS-1D, la simulación hidrológica de los primeros eventos de lluvia después del periodo de sequía estival, es uno de los principales problemas encontrados por Gallart et al. (1993, 1997) y Anderton et al. (2002a, 2002b), al utilizar los modelos hidrológicos TOPMODEL y SHETRAN en las cuencas de Vallcebre. Este desajuste es debido a la dificultad en simular correctamente los eventos de transición típicos de estos ambientes sub-húmedos (Latron, 2003), que se producen en los periodos de humectación de la cuenca.

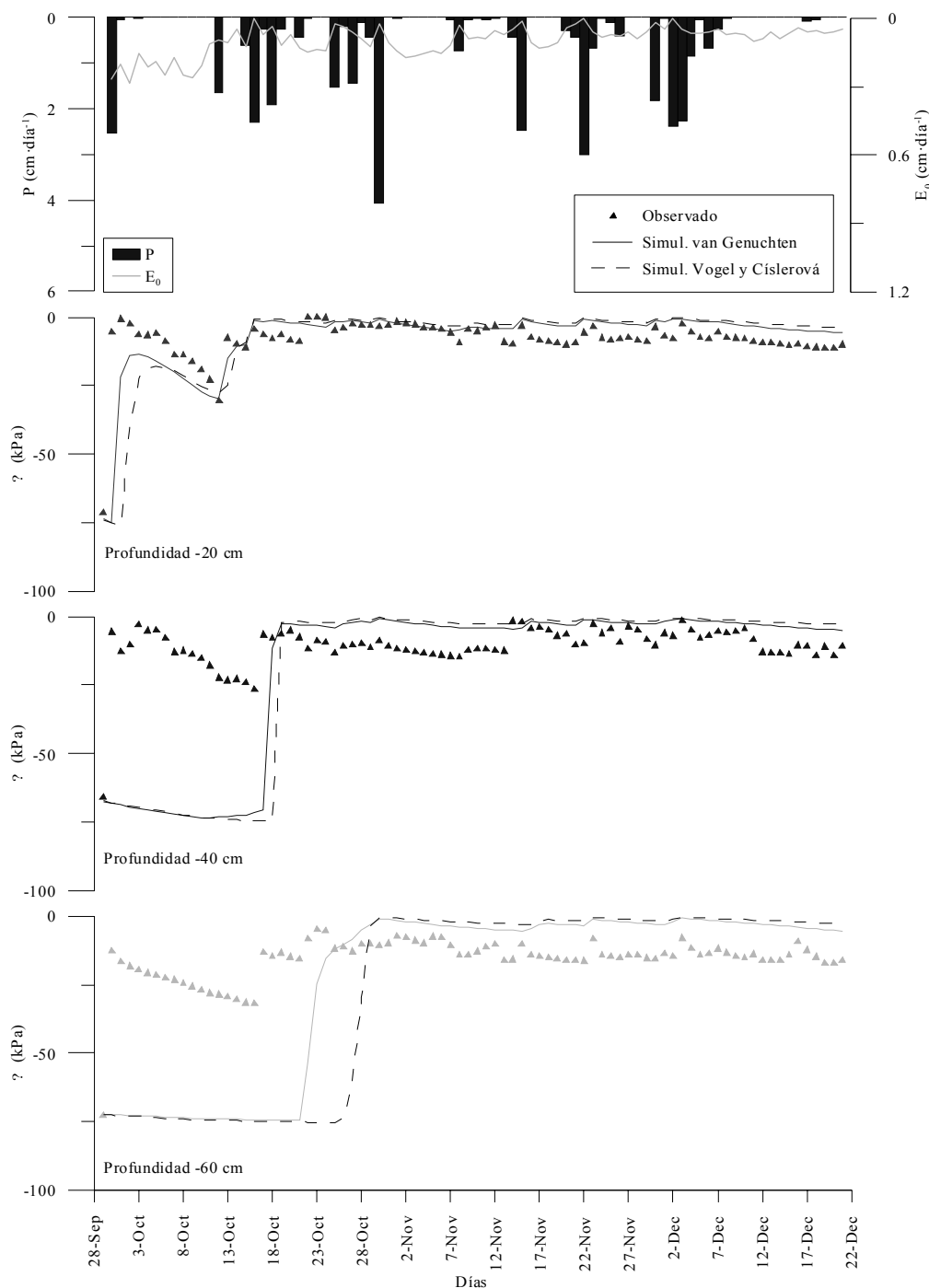


Fig. 1. Precipitación, E_0 y potenciales mátricos observados (perfil C) y simulados para el periodo de validación.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido posible gracias a una beca de investigación y Postgrado F.P.U. del Ministerio de Educación Ciencia y a los proyectos PIRIHEROS (REN2003-08678/HID) y CANOA (CGL2004-04919-C02-01/HID), así como al acuerdo CSIC-DGCONA (RESEL). Los autores agradecen la colaboración de: Dr. Francesc Gallart, Dr. Jérôme Latron, Rafael Poyatos y Núria Martínez-Carreras.

Referencias

- Abbasi, F., Feyen, J. y van Genuchten, M.Th. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *J. Hydrol.*, 290, 63-79 pp.
- Anderton, S., Latron, J. y Gallart, F. 2002a. Sensitivity analysis and multi-response, multi-criteria evaluation of a physically-based distributed model. *Hydrological Process.*, 16, 333-353 pp.
- Anderton, S., Latron, J., White, S., Llorens, P., Salvany, M.C. y Gallart, F. 2002b. Internal validation of a physically-based distributed model using data from a Mediterranean mountain catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6, 67-83 pp.
- Christiansen, J.S., Thorsen, M., Clausen, T., Hansen, S. y Refsgaard, J.C. 2004. Modelling of macropore flow and transport processes at catchment scale. *J. Hydrol.*, 299, 136-158 pp.
- Flühler, H., Durner, W. y Flury, M. 1996. Lateral solute mixing processes a key for understanding field-scale transport of water and solutes. *Geoderma*, 70, 165-183 pp.
- Gallart, F., Latron, J. y Llorens, P. 1993. Analysis of the hydrological role of old agricultural hillslope terraces using TOPMODEL concepts. *In:*

- Robinson, M. (Ed.), *Methods of hydrologic basin comparison*, report 120, Institute of Hydrology, Wallingford, 131-136 pp.
- Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. y Rabadà, D. 1997. Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modeling. *Hydrol. Process.*, 11, 1263-1272 pp.
- Gardner, W.R. 1967. Water uptake and salt distribution patterns in saline soils. In: *Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies*. Int. Atomic Energy Agency Proc. Ser., 335-341 pp.
- Gerke, H.H. y van Genuchten, M. Th. 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.*, 29, 305-319 pp.
- Gwo, J.P., Jardine, P.M., Wilson, G.V. y Yeh, G.T. 1995. A multiple-pore-region concept to modelling mass transfer in subsurface media. *J. Hydrol.*, 164, 217-237 pp.
- Jarvis, N.J. 1994. The MACRO model (Version 3.1). Technical description and sample simulations. Reports and Dissert, 19, Dept. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala, Sweden, 51pp.
- Jarvis, N.J. y Larson 1998. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. In: Selim, H.M.; Ma, L. (Eds), *Physical nonequilibrium in soils: Modeling and application*, Ann Arbor Press, Chelsea, MI, 195-221 pp.
- Latron, J. 2003. Estudio del funcionamiento hidrológico de una cuenca Mediterránea de montaña (Vallcebre, Pirineo catalán). Tesis Doctoral. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. 269 pp.
- Luckner, L., van Genuchten, M.Th. y Nielsen, D.R. 1989 A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resour. Res.*, 25, 2187-2193 pp.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 513-522 pp.
- Pruess, K. y Wang, J.S.Y. 1987. Numerical modelling of isothermal and non-isothermal flow in unsaturated fractured rock. A review. In: Evans, D.D. y Nicholson, T.J. (Eds), *Flow and transport through unsaturated fractured rock*, Geophysics monograph, 42. American Geophysical Union, Washington, DC, 11-22 pp.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1, 318-333 pp.
- Ross, P.J. y Smettem, K.R. 2000. A simple treatment of physical nonequilibrium water flow in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1926-1930 pp.
- Simunek, J., Huang, K., Sejna, M. y van Genuchten, M.Th. 1998a. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variable-saturated media. Version 1.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 162 pp.
- Simunek, J., Sejna, M. y van Genuchten, M.Th. 1998b. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251 pp.
- Skopp, J. 1981. Comment on Micro-meso and macroporosity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1246 pp.
- Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L, Perrier, A., Pereira, L. y Segeren, A. 1992. Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. United Nations-Food and Agriculture Organization, Rome, 54 pp.
- Sole, A., Josa, R., Pardini, G., Aringhieri, R., Plana, F. y Gallart, F. 1992. How mudrock and soil physical properties influence badland formation at Vallcebre (Pre-Pyrennes, NE Spain). *Catena*, 19: 287-300 pp.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898 pp.
- Van Genuchten, M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research report nº 121, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F.J y Yates, S.R.. 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Vogel, T. y Cislerová, M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*, 3, 1-15 pp.