

# APLICACIÓ DEL MODEL NUMÈRIC SIMDAS PER AL DISSENY AGRONÒMIC EN REG PER DEGOTEIG

**GERARD ARBAT;<sup>1</sup> JAUME PUIG-BARGUÉS;<sup>1</sup> JAVIER BARRAGÁN;<sup>2</sup>**

**FRANCESC RAMÍREZ DE CARTAGENA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA, AGRÀRIA I TECNOLOGIA AGROALIMENTÀRIA, ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR, UNIVERSITAT DE GIRONA

<sup>2</sup> DEPARTAMENT D'ENGINYERIA AGROFORESTAL, ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA, UNIVERSITAT DE LLEIDA  
*francisco.ramirez@udg.es*

## **Resum**

El disseny agronòmic adequat d'un reg comporta un estalvi de l'aigua i l'energia necessàries per al reg. En particular, en un sistema de reg per degoteig cal conèixer prèviament quina serà la distribució d'aigua al sòl per un degotador d'un cabal determinat en aplicar un volum d'aigua conegut. En aquest sentit, la utilització de models matemàtics que puguin estimar com es distribueix l'aigua al sòl tenint en compte les seves propietats pot resultar molt útil. En aquest treball es presenta el model numèric SIMDAS, basat en l'equació de Richards, el qual permet predir la distribució d'aigua al sòl en reg per degoteig. En comparar els resultats obtinguts amb el model amb els determinats experimentalment a camp, s'ha pogut comprovar que el model desenvolupat és una eina útil per al disseny agronòmic d'aquest tipus de regs.

## 1. Introducció

En la fase inicial de disseny d'un sistema de reg per degoteig és necessari triar el cabal dels emissors, la seva separació i el nombre d'emissors per planta per tal d'aconseguir un determinat percentatge de sòl mullat (P), que es defineix com la superfície de sòl humitejada amb relació a la superfície conreada (Keller i Bliesner, 1990). Aquest percentatge de sòl mullat s'ha d'aconseguir sense provocar pèrdues d'aigua per percolació profunda més enllà de les necessàries en el rentat de les sals.

La distribució d'aigua al sòl pot variar molt segons de les seves propietats hidràuliques i, per tant, un disseny agronòmic correcte les ha de tenir en compte. Una manera de considerar-les és a partir de la utilització de models de simulació del moviment d'aigua al sòl basats en l'equació de Richards, que van començar a ser utilitzats en recerca fa més de trenta anys per Brandt *et al.* (1971), tot i que el seu ús quant al disseny d'instal·lacions no és gens comú. Rodrigo-López *et al.* (1992) apunten la dificultat de caracteritzar les propietats hidràuliques del sòl com la principal causa que ha limitat l'ús de models de simulació per a fins pràctics, com el disseny agronòmic.

Els darrers anys s'han fet avanços a l'hora de poder estimar les propietats hidràuliques del sòl, consistents en la utilització de la teoria de xarxes neuronals lligada a funcions d'edafotransferència, que permeten obtenir la millor estimació possible a partir de la informació disponible (Schaap *et al.*, 2001; Minasny *et al.*, 2003).

En aquest treball es vol mostrar la utilitat del codi de simulació SIMDAS (Ramírez de Cartagena i Sáinz, 1997; Arbat, 2006), enfront de mètodes més simplificats com el de Schwartzmass i Zur (1985), per a predir els paràmetres necessaris en el disseny agronòmic dels sistemes de reg per degoteig.

Aquest objectiu es concreta comparant els continguts d'aigua en el sòl, mesurats en diferents proves de camp, amb els simulats amb el codi SIMDAS.

En segon terme es comparen els paràmetres bàsics necessaris per al disseny agronòmic (extensió ( $d$ ) i profunditat ( $z$ ) màximes del volum de sòl mullat), utilitzant el codi de simulació SIMDAS, amb els determinats a camp i amb els estimats amb equacions empíriques com les de Schwartzmass i Zur (1985).

## 2. Material i mètodes

### 2.1. El codi de simulació SIMDAS

El codi SIMDAS, que va ser desenvolupat per Ramírez de Cartagena i Sáinz (1997) resolva l'equació de Richards mitjançant el mètode de les diferències finites, aplicant les condicions de contorn adequades per a modelar la distribució d'aigua al sòl sota un emissor aïllat. Arbat (2006) introduí canvis en el model per contemplar la bassa que es pot formar sota els emissors a més d'implementar les funcions hidràuliques segons el model de Van

Genuchten-Mualem (Van Genuchten, 1980). Les corbes de retenció i de conductivitat hidràulica ( $K$ ) segons aquest model s'indiquen en les equacions (1) i (2):

$$(1) \quad \theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \qquad (2) \quad K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2$$

on:  $\theta$  ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ) representa el contingut d'aigua;  $\theta_s$  ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ) i  $\theta_r$  ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ) són els continguts a saturació i residual d'aigua al sòl;  $h$  (L), la pressió d'aigua al sòl;  $\alpha$  ( $L^{-1}$ ),  $l$ ,  $n$  i  $m$  són paràmetres de forma de les corbes.  $S_e$  és el grau de saturació efectiu que es defineix com:

$$(3) \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Normalment també s'assumeix que la relació entre  $m$  i  $n$  ve definida per:

$$(4) \quad m = 1 - 1/n$$

La descripció dels algorismes de càlcul que utilitza el codi SIMDAS es poden trobar a Arbat (2006).

**2.2. Mètode simplificat per al disseny agronòmic**

El mètode simplificat de Schwartzmass i Zur (1985) permet estimar els paràmetres necessaris per al disseny agronòmic, que són l'extensió ( $d$ ) i la profunditat ( $z$ ) de sòl mullades per un emissor (figura 1). El mètode té en compte el cabal de l'emissor ( $q$ ), el volum d'aigua aplicat en el reg ( $V$ ) i la conductivitat de l'aigua al sòl a saturació ( $K_s$ ), segons es mostra en les equacions (5) i (6):

$$(5) \quad d = 0,031 V^{0,22} \left( \frac{K_s}{q} \right)^{-0,17}$$

$$(6) \quad z = 29,2 V^{0,63} \left( \frac{K_s}{q} \right)^{0,45}$$

Quan s'apliquen aquestes fórmules cal utilitzar les unitats següents:  $d$  i  $z$  en m;  $K_s$  en m/s i  $V$  en L.

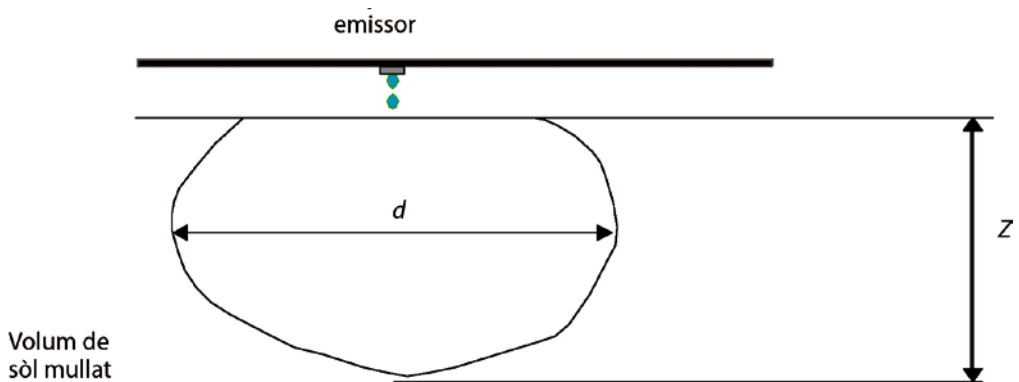


Figura 1. Paràmetres necessaris en el disseny agronòmic d'un sistema de reg per degoteig.

### 2.3. Propietats del sòl on es van fer les proves de camp

Les proves de camp per a validar el model es van fer a l'Estació Experimental Agrícola Mas Badia (Baix Empordà), en un sòl descrit com «xerofluent oxiàquic, franca grossa, mesclada, semiactiva, tèrmica» (Soil Survey Staff, 2006). Les dades analítiques corresponents als diferents horitzons edàfics s'indiquen a la taula 1.

Els paràmetres de les equacions de van Genuchten-Mualem van ser estimats utilitzant el codi informàtic ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001). Els paràmetres es mostren en la taula 2.

### 2.4. Proves de camp realitzades

Es van realitzar tres proves de camp, consistents a aplicar diferents volums d'aigua amb un emissor d'un cabal de 4 l/h. Els volums aplicats en cada prova van ser de 8 l a la prova 1, 16 l a la prova 2 i 25 l a la prova 3.

Per tal de fixar les condicions inicials en el model i poder determinar experimentalment l'amplada i la profunditat màximes del volum de sòl mullat en les proves de camp, es van

Taula 1. Propietats físiques dels horitzons edàfics

Horitzó i profunditat (cm)	Textura			Densitat aparent (g/cm <sup>3</sup> )	
	Classificació USDA	Argila (%)	Llim (%)		Arena (%)
Ap (0-35)	Franca	11,5	38,9	49,6	1,65
Bw1 (35-75)	Franca	12,6	48,8	38,5	1,53
Bw2 (75-120)	Franca arenosa	4,9	26,0	69,1	1,44
Bw3 (>120)	Franca arenosa	7,0	17,3	75,7	1,68

Taula 2. Paràmetres hidràulics del sòl seguint les funcions de van Genuchten-Mualem determinades amb el codi Rosetta

Horitzó	$\theta_r$ (-)	$\theta_s$ (-)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$ (-)	$m$ (-)	$K_s$ (cm/h)	$l$ (-)
Ap	0,037	0,329	0,023	1,361	0,262	0,557	-1,146
Bw1	0,046	0,352	0,010	1,515	0,340	0,567	-0,264
Bw2	0,035	0,383	0,037	1,488	0,328	3,188	-0,997
Bw3	0,039	0,335	0,046	1,539	0,350	1,773	-1,195

realitzar mesures del contingut volumètric d'aigua al sòl mitjançant una sonda TDR (IMKO-TRIME-T). Els tubs d'accés de la sonda es van disposar tal com s'indica a la figura 2 i es van realitzar mesures a intervals de 15 cm de profunditat. Cada mesura es va prendre en les dues direccions perpendiculars x i y, i es va adoptar la mitjana dels dos valors com la representativa.

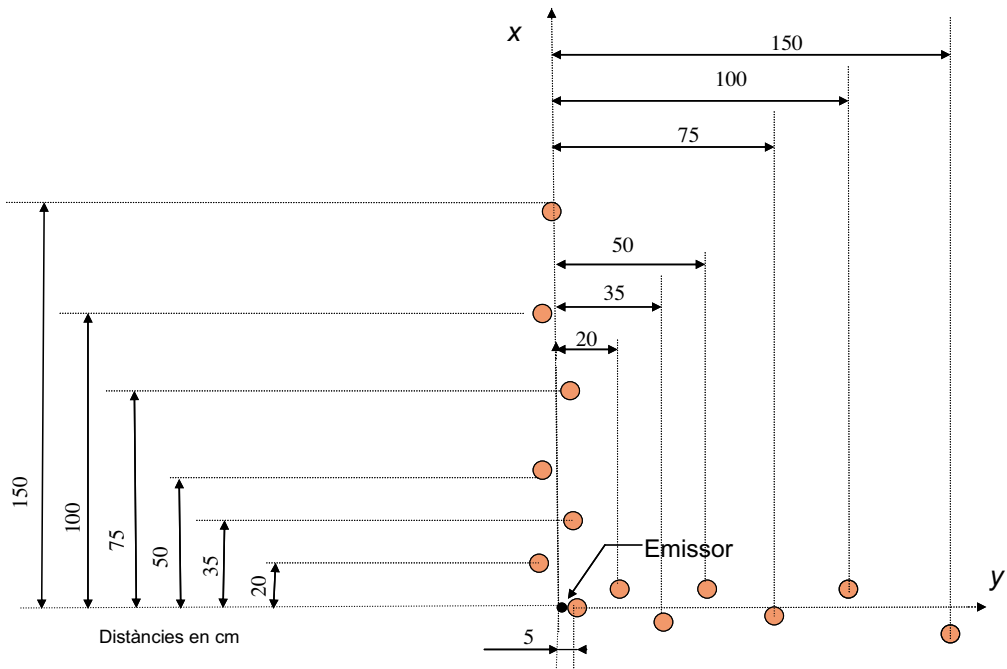


Figura 2. Distribució en planta dels tubs d'accés de la sonda TDR.

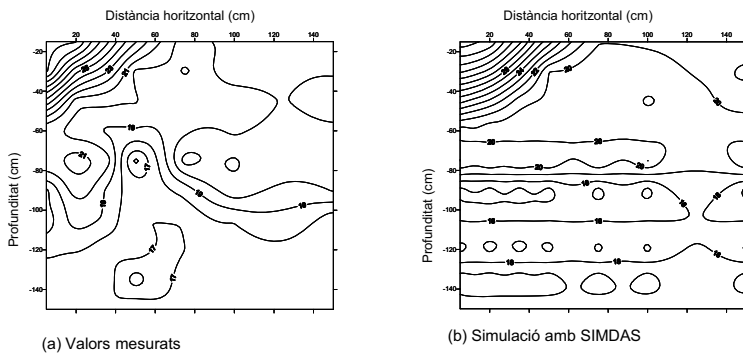


Figura 3. Comparació de la distribució d'aigua al sòl mesurada i simulada amb SIMDAS corresponents a l'aplicació de 25 l amb un emissor de 4 l/h.

### 3. Resultats i discussió

#### 3.1. Distribució d'aigua al sòl simulada amb SIMDAS i observada

A la figura 3 es comparen visualment els resultats calculats amb el model SIMDAS i els observats per al cas d'un volum aplicat de 25 l. Les corbes d'isocontingut d'aigua es van obtenir amb el mètode del krigeat (estimació de variables), utilitzant el programa informàtic SURFER (Golden Software, 1999).

No obstant les limitacions que suposa la comparació gràfica, s'observa que el volum de sòl mullat determinat amb els valors mesurats i observats són visualment molt semblants. Una comparació més objectiva entre els resultats simulats i observats s'ha obtingut utilitzant estadístics de comparació. A la taula 3 s'indiquen els valors calculats de l'arrel de l'error quadràtic mitjà (RMSE) i el coeficient de determinació de la regressió lineal ( $R^2$ ) en les diferents proves realitzades. Es pot observar que el RMSE ha estat sempre inferior al 2 %. Els valors que va prendre aquest estadístic, que es caracteritza pel fet d'expressar-se en les mateixes unitats que el paràmetre mesurat, van ser equiparables a la precisió característica de l'aparell de mesura, que segons el fabricant és del 2 %. Pel que fa al coeficient de determinació ( $R^2$ ), aquest augmentà en les proves on el volum aplicat va ser més gran. Els valors de  $R^2$  han estat similars als calculats per Arbat *et al.* (2005), on es comparaven els potencials d'aigua simulats amb el model HYDRUS-2D (Simunek *et al.*, 1999) amb els mesurats a camp en un reg amb microaspersió.

#### 3.2. Comparació de la profunditat i l'extensió màximes del volum de sòl mullat determinades a partir dels diferents mètodes

Per tal d'estudiar com es comporten el codi SIMDAS i les funcions empíriques de Schwartzmass i Zur (1985) a l'hora de determinar l'amplada màxima ( $d$ ) i la profunditat

Taula 3. Estadístics de comparació de la distribució d'aigua mesurada i simulada amb SIMDAS corresponents a les proves realitzades

	Prova 1 (8 l)	Prova 2 (16 l)	Prova 3 (25 l)
RMSE (%)	1,6	1,6	1,4
R <sup>2</sup>	0,54	0,66	0,82

màxima (z) del volum de sòl mullat, s'han comparat amb els mateixos paràmetres determinats experimentalment. A la taula 4 es mostra quant valen en cada cas.

El mètode de Schwartzmass i Zur (1985) va predir una profunditat i amplada sensiblement inferiors als mesurats a camp, mentre que amb el codi SIMDAS els valors van ser molt propers als mesurats a camp en els tres casos estudiats. Aquest fet pot ser explicat fàcilment per les condicions en què es van desenvolupar les proves. En els assajos de laboratori realitzats per Schwartzmass i Zur (1985), el sòl es va assecar a l'aire abans de fer les proves, en canvi en els assajos de camp que es presenten en aquest treball es van realitzar en un sòl on el contingut d'aigua a l'inici de les proves va ser relativament alt i, per tant, el volum de sòl mullat per un volum d'aigua determinat va ser més gran que no pas en un sòl inicialment més sec.

El fet que el model simplificat de Schwartzmass i Zur (1985) estimi un volum de sòl mullat més petit que el que realment és, comportaria un factor de seguretat més gran a l'hora de realitzar el disseny agronòmic, o el que és el mateix, comportaria un sobredimensionament del sistema de reg; però en canvi no donaria un valor realista de la profunditat i l'amplada mullades per l'emissor, ja que en aquest tipus de regs el contingut inicial d'aigua acostuma a ser elevat.

L'altre aspecte que cal considerar és que els assajos de camp es van fer en un sòl que presentava diferents horitzons edàfics, fet que es va tenir en compte en les simulacions realitzades amb SIMDAS, però, en canvi, no es va poder considerar quan es van aplicar les

Taula 4. Amplada (d) i profunditat màximes (z) del volum de sòl mullat determinades experimentalment i calculades

Mètode	Volum d'aigua aplicat					
	8 l		16 l		25 l	
	d (cm)	z (cm)	d (cm)	z (cm)	d (cm)	z (cm)
Experimental	70	45	100	45	100	75
SIMDAS	80	45	100	50	120	75
Schwartzmass i Zur	60	14	70	22	77	29

equacions empíriques de Schwartzmass i Zur (1985), ja aquests autors les van obtenir en un sòl reconstituït sense capes. Aquest fet podria explicar en part les grans diferències entre els valors de  $d$  i  $z$  estimats amb les equacions empíriques i les observacions de camp.

#### **4. Conclusions**

El codi de simulació SIMDAS, basat en l'equació de Richards, va donar una estimació de la distribució d'aigua bastant propera a la mesurada al camp en les proves realitzades.

L'amplada ( $z$ ) i la profunditat ( $d$ ) del volum de sòl mullat, calculades a partir de les prediccions del model SIMDAS, van ser molt semblants a les mesurades al camp. Per la seva banda, les prediccions realitzades amb les equacions de Schwartzmass i Zur (1985) van donar valors sensiblement inferiors als mesurats al camp, per tant, la seva aplicació en el dimensionament d'un sistema de reg actua en el sentit de sobredimensionar la instal·lació.

#### **5. Agraïments**

Els autors volen agrair a l'Estació Experimental Agrícola Fundació Mas Badia la cessió de la parcel·la i el suport donat en la realització de les experiències de camp.



## Bibliografia

ARBAT, G. (2006), *Desarrollo y validación de un modelo de simulación de la dinámica de agua en el suelo. Aplicación al diseño y manejo en riego localizado*: Universitat de Lleida. [Tesi doctoral]

ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; BARRAGÁN J.; BONANY J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA F. (2005), «Modelación directa e inversa de la dinámica del agua en una plantación de manzanos regada por microaspersión». A: SAMPER, J.; PAZ, A. [ed.]. *VII Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo*, vol. VII, La Corunya, p. 243-248.

BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN ASHER, J.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. (1971), «Infiltration from a trickle source: I Mathematical models», *Soil Science Society of America Proceedings*, núm. 35, p. 675-682.

GOLDEN SOFTWARE (1999), *Surfer versió 7.0*.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. (1990), «Trickle irrigation planning factors». A: *Sprinkle and trickle irrigation*, Nova York, Van Nostrand Reinhold, p. 453-477.

MINASNY, B.; HOPMANS, J. W.; HARTER, T.; ECHING, S. O.; TULI, A.; DENTON, M. (2004), «Neural networks prediction of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions of alluvial soils, as estimated from multi-step outflow experiments», *Soil Science Society of America Journal*, núm. 68, p. 417-429.

RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; SÁINZ, M. (1997), «Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo», *Ingeniería del Agua*, núm. 4 (1), p. 57-70.

RODRIGO-LÓPEZ, J.; HERNÁNDEZ-ABREU, J. M.; PÉREZ-REGALADO, A.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. F. (1992), *Riego localizado*, Madrid, Mundi-Prensa.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, T. (2001), «ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedo-transfer functions», *Journal of Hydrology*, núm. 251, p. 163-176.

SCHWARTZMASS, M.; ZUR, B. (1985), «Emitter spacing and geometry of wetted soil volume», *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, núm. 112 (3), p. 242-253.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. (1999), *HYDRUS-2D, software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and solute transport in variably-saturated media*, Riverside U.S. Salinity Laboratory.

SOIL SURVEY STAFF (2006), *Keys to Soil Taxonomy*, 10 ed., Washington DC Natural Resources Conservation Service, USDA.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980), «A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils», *Soil Science Society of America Journal*, núm. 44 (5), p. 892-898.