

CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE INFILTRACIÓN EN EL PIEDEMONT MENDOCINO

CHARACTERIZATION OF THE INFILTRATION PROCESS IN THE MENDOZA PIEDMONT

Marcela Nave, Armando Pedrani, Alberto I.J. Vich y Adriana Mariani

Marcela R. Nave

Ing. Rec. Hídr, UN Litoral, 1989. Actualmente es becaria del CONICET.

Eng. on Hydric Res., Univ. of the Litoral, 1989. At present she is a CONICET fellow.

Armando Pedrani

Ing. Agr., co-responsable del Programa "Manejo Ecológico del Piedemonte".

Agr. Engineer, in charge of the Program "Ecological Management of the Piedmont".

Alberto I.J. Vich

Ing. Rec. Hídricos, Maestría en Ciencias, director del programa Manejo Ecológico del Piedemonte.

Eng. in Hydric Res. Master of Science, CONICET researcher, Director of the Program "Ecological Management of the Piedmont".

Adriana Mariani

Ing. Rec. Hídr, UN Litoral, 1988. Actualmente es becaria del CONICET.

Eng. on Hydric Res., Univ. of the Litoral, 1988. At present she is a CONICET fellow.

(English version by M.E. Soler)

INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones en el piedemonte al W de la ciudad de Mendoza son escasas, de carácter estival y suelen presentarse en forma de chaparrones intensos. La fuerte presión antrópica a la que se encuentra sometida el área y donde los cauces torrenciales descargan en áreas urbanas, suburbanas, agrícolas e industriales, transforman a la región en una zona de alto riesgo aluvional.

Dada la necesidad de definir pautas de manejo en las diferentes cuencas que conforman el área, con el fin de disminuir el riesgo aluvional, se hace indispensable el uso de diferentes modelos hidrológicos. Para ajustar los necesarios cuantificar los distintos parámetros y subprocesos que intervienen en ellos.

La infiltración es el proceso físico por el cual el agua de lluvia penetra en el suelo. La información básica necesaria para el ajuste de los modelos de infiltración se generó a partir de un simulador de lluvias. El objetivo del trabajo fue caracterizar el proceso de infiltración ajustando 4 modelos

de infiltración, comparando sus diferencias con datos reales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos con simulador de lluvias se efectuaron sobre tres tipos de depósitos sedimentarios terciarios (Fm. Mogotes y Fm. Mariño) y cuaternarios. Los suelos originados a partir de estos depósitos son de moderado desarrollo, provenientes de recientes procesos de meteorización. El contenido de fragmentos gruesos en Fm. Mogotes y cuaternario es de $41,15 \pm 12\%$; en cambio en Fm. Mariño es considerablemente menor, $11,6 \pm 2\%$. La matriz en los tres depósitos sedimentarios es de textura arenosa y arena francosa, muy permeable.

La cobertura vegetal presente en los tres depósitos corresponde a un matorral de 1,50 m de altura con predominio de jarilla (*Larrea* sp.), acompañado de un estrato gramíneo de coirones (*Stipa* sp.) y pasto amargo (*Pappophorum* sp.). En cada suelo, se realizaron los ensayos en sitios diferentes, con distintas combinaciones de contenido de humedad inicial, cobertura vegetal y pendiente.

INTRODUCTION

Precipitation in the piedmont, west of the city of Mendoza (Argentina) is scarce, during the summer and usually happens as heavy rains of short duration. The region is a zone of high alluvial risk owing to the strong anthropic pressure undergone by the area and to the torrents that discharge in the urban, suburban, agricultural and industrial areas. Because of the necessity to define management patterns in the different watersheds that conform the area, and with the goal of diminishing the alluvial risk, the use of different hydrological models is essential. In order to adjust them there is the need to quantify the different parameters and subprocesses that take place in them.

Infiltration is the physical process through which rain water penetrates the soil. The necessary basic information for the adjustment of the infiltration models was generated from a rain simulator. The goal of this work was to characterize the infiltration process in the piedmont of Mendoza, adjusting four infiltration models, comparing their differences with present data.

MATERIALS AND METHODS

The trials with the rain simulator were carried out on three types of sedimentary deposits: Tertiary, Mogotes Formation and Mariño Formation, and Quaternary.

Soils originated from this deposit are of moderate development, proceeding from recent weathering processes. The content in coarse fragments in Mogotes Fm. and Quaternary is $41.15 \pm 12\%$, instead in the Mariño Fm. it is considerably less, $11.6 \pm 2\%$. The matrix in the three sedimentary deposits is of sandy and loamy-sand texture and very permeable. The plant cover in the three deposits corresponds to a 1.50 m height bush with *Larrea* sp. prevailing, accompanied by a graminous strata (*Stipa* sp. and *Pappophorum* sp.)

Trials were done with the rain simulator in each sedimentary deposit, in different places, with several combinations of starting moisture content, vegetation content and slope.

Four infiltration models were selected, where two essential parameters intervene to characterize the water flow in the soil: hydraulic conductivity

Se seleccionaron 4 modelos de infiltración en donde intervienen dos parámetros de fundamental importancia para caracterizar el flujo de agua en el suelo: la conductividad hidráulica próxima a la saturación ' K_s ' y la succión en el frente húmedo ' S_f ', con el fin de evaluarlos y buscar diferencias entre los parámetros ajustados mediante los cuatro modelos. Ellos son: la ecuación de Horton (1939), Philip (1957), Smith-Parlange (1978) y Green-Ampt (1911). Los parámetros de ajuste son: ' K_s ' y ' S_f ' en los modelos de Green y Ampt, Philip y Smith-Parlange y ' f_o ', ' f_c ' y ' B ' en el modelo de Horton, siendo la capacidad de infiltración final ' f_c ' equivalente a ' K_s ', ' f_o ' la capacidad de infiltración inicial y ' B ' parámetro del suelo que controla la reacción de decrecimiento de la tasa de infiltración.

El análisis se realizó para cada simulación de lluvia a partir del inicio del escurrimiento. La metodología que se utilizó para estimar los parámetros fue la desarrollada por Diskin y Simon (1977).

En un primer paso, se seleccionaron 4 funciones objetivo y se efectuó el ajuste de los 4 modelos por optimización de cada función objetivo para cada curva de velocidad de infiltración generada con simulador de lluvias. Se obtuvo un conjunto de parámetros óptimos para cada curva y modelo. Posteriormente, para obtener un único grupo de parámetros por depósito sedimentario y por modelo que optimice con todos los ensayos realizados sobre el depósito sedimentario correspondiente, se empleó nuevamente el método de Diskin y Simon tomando como función objetivo el error cuadrático relativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de laboratorio de las muestras de suelo de las parcelas de trabajo se detallan en la **Tabla 1**.

La **Tabla 2** representa el valor medio de los parámetros ajustados para los ensayos realizados sobre un mismo depósito sedimentario y sus correspondientes coeficientes de variación.

El parámetro ' f_o ' de Horton ajustado en cada ensayo tuvo un amplio rango de variación en sedimentos cuaternarios, puesto que depende del contenido de humedad inicial del suelo y de la tasa de aplicación de lluvia, variables en cada simulación.

El parámetro ' f_c ' de Horton, así como también el parámetro ' K_s ' de Green-Ampt, Philip y Smith-Parlange, representan un

close to saturation (K_s) and the suction in the humid front (S_f), in order to evaluate them and to search for differences between parameters adjusted through the models. Models used are: 1) Philip (1957), 2) Smith-Parlange (1978), 3) Green-Ampt (1911) and 4) Horton equation (1939). The adjustment parameters are: K_s and S_f in the models of Green and Ampt, Philip and Smith-Parlange, and f_o , f_c and B in the Horton model, being final infiltration capacity ' f_c ' equivalent to ' K_s ', ' f_o ' the starting infiltration capacity and ' B ' soil parameter that controls the decrease reaction of the infiltration rate.

The analysis was done for each rain simulation starting from the time when runoff began. The methodology used to

estimate the parameters was developed by Diskin and Simon (1977).

A first stage was to select 4 objective functions, and then the adjustment of the four models was done by optimization of each objective function for each curve of infiltration speed generated by a rain simulator. A group of optimal parameters was obtained for each curve and model. Next, it was again used the methodology of Diskin and Simon (1977) taking as objective function the relative quadratic error, to obtain a group of parameters for each sedimentary deposit and for each model that should optimize with all trials done over the corresponding sedimentary deposit.

TABLA 1
TABLE 1
RESULTADOS DE LABORATORIO DE LAS MUESTRAS DE SUELO
LABORATORY RESULTS FOR SOIL SAMPLES

	Depósito sedimentario <i>Sedimentary deposit</i>		
	Fm. Mogotes	Sed. cuaternarios	Fm. Marino
arena (%) <i>sand</i>	75,1 ± 0,7	86,8 ± 8,6	87,3 ± 0,8
limo (%) <i>lime</i>	24,2 ± 0,6	12,7 ± 8,5	12,4 ± 0,8
arcilla (%) <i>clay</i>	0,8 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,3 ± 0,1
clase textural <i>texture</i>	areno-francoso <i>loamy-sand</i>	arenoso <i>sandy</i>	arenoso <i>sandy</i>
Materia Orgánica (%) <i>Organic Matter</i>	1,16 ± 0,1	1,86 ± 0,2	1,03 ± 0,1
Densidad aparente (g/cm ³) <i>Volumetric density</i>	1,4 ± 0,1	1,33 ± 0,1	1,47 ± 0,1
Cont. hum. sat. (cm ³ /cm ³) <i>Sat. hum. cont.</i>	0,4906	0,4410	0,4203
Porosidad reduc. <i>Porosity reduced</i>	0,29 ± 0,05	0,24 ± 0,07	0,25 ± 0,05

TABLA 2
TABLE 2
RANGO DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS AJUSTADOS
VARIATION RANGE OF ADJUSTED PARAMETERS

Modelo <i>Model</i>	Parámetro <i>Parameter</i>	Depósito sedimentario <i>Sedimentary deposit</i>					
		Fm. Mogotes		C. Cuartaria		Fm. Marino	
		media	CV	media	CV	media	CV
Horton	fo (mm/h)	215,4	11,9	186,8	51,2	128,7	14,4
	fc (mm/h)	55,8	29,4	54,1	26,8	57,1	22,3
	B	17,6	26,7	10,1	54,4	8,6	125,6
Green-Ampt	Ks (mm/h)	34,0	25,5	39,8	13,8	44,8	0
	Sf (mm)	73,5	29,1	71,6	30,2	64,6	31,9
Philip	K s(mm/h)	32,1	27,4	32,6	20,2	40,5	11,4
	Sf (mm)	90,3	15,4	92,9	15,1	80,6	19,5
Smith-Parlange	Ks (mm/h)	34,0	25,6	39,9	13,8	44,8	0
	Sf (mm)	73,5	29,1	71,6	29,7	64,5	31,9

valor que debe ser algo menor o aproximadamente igual que la conductividad hidráulica saturada. El ajuste de 'Ks' para los modelos de Green-Ampt, Philip y Smith-Parlange, ha resultado de una magnitud similar, en cambio el parámetro 'fc' de Horton ha sido algo mayor.

En cuanto a los resultados de succión en el frente húmedo, el parámetro 'Sf' ajustado en el modelo de Philip, fue mayor respecto de los 'Sf' ajustados por Green-Ampt o Smith-Parlange.

La **Tabla N° 3** presenta los parámetros óptimos en cada

RESULTS AND DISCUSSION

The laboratory analysis of the soil samples from the work plots are detailed in **Table 1**.

Table 2 represents the mean value of parameters adjusted for the trials carried out over the same sedimentary deposit

and their corresponding variation coefficients.

The 'fo' Horton parameter adjusted in each trial had a wide variation range in Quaternary sediments, as it depends on the starting humidity content of the soil and on the rain application rate, these values varied in each simulation. The 'fc' Horton parameter, as well as the 'Ks' Green-Ampt, Philip and Smith-Parlange, represents a value that has to be a little lower or approximately equal to the saturated hydraulic conductivity. The 'Ks' adjustment for the Green-Ampt, Philip and Smith-Parlange models has resulted of a similar magnitude. Instead the 'fc' Horton parameter has been slightly higher. In reference to the suction results of the humid front, the 'Sf' adjusted parameter in the Philip's model was higher in regards to the 'Sf' adjusted by Green-Ampt or Smith-Parlange.

Table 3 presents the optimal parameters for each model and sedimentary deposit. The range of relative quadratic error produced in each stage is detailed in **Table 4**.

The mean value of the saturated hydraulic conductivity parameter adjusted in the four models was compared with the infiltration rate measured in the longest time lapse for rain application. Some cases are here presented as an example:

- Mogotes Fm., for a 20 minutes time lapse of rain application, the constant infiltration capacity in trial No. 27 was of 42.7 mm/h, in No. 8 it was of 35.9 mm/h, while the saturated hydraulic activity that was adjusted in the four models is of 35.5± 8.01 mm/h.
- Quaternary sediments, the infiltration speed observed in trial No. 38 in 43 minutes of

TABLA 3
TABLE 3
PARÁMETROS ÓPTIMOS
OPTIMAL PARAMETERS

Modelo <i>Model</i>	Parámetro <i>Parameter</i>	Depósito sedimentario <i>Sedimentary deposit</i>		
		Fm. Mogotes	S. Cuartarios	Fm. Marino
		Horton	fo (mm/h)	237,0
	fc (mm/h)	47,1	47,7	57,3
	B	19,01	5,62	2,30
Green-Ampt	Ks(mm/h)	27,1	44,8	44,8
	Sf (mm)	99,0	61,0	84,0
Philip	Ks (mm/h)	29,0	32,0	44,8
	Sf (mm)	99,0	99,0	79,0
Smith-Parlange	Ks (mm/h)	38,8	44,8	44,8
	Sf (mm)	56,0	61,0	79,0

TABLA 4
TABLE 4

Rango de error cuadrático relativo (en %) entre la velocidad de infiltración medida y simulada empleando los parámetros óptimos
Relative quadratic error range (%) between measured and simulated infiltration velocity using optimal parameters

Modelo	Depósito sedimentario		
	Fm. Mogotes	S. cuartarios	Fm. Marino
Horton	0,5 a 5,8	0,02 a 9	0,8 a 13
Green-Ampt	0,5 a 6	0,1 a 8	0,6 a 5
Philip	0,2 a 14	0,4 a 8,9	0,4 a 14
Smith-Parlange	0,2 a 13,2	0,2 a 15	4,2 a 15

TABLA 5
TABLE 5

VOLUMEN INFILTRADO MEDIDO-ESTIMADO
MEASURED-ESTIMATED INFILTRATED VOLUME

Depósito sedimentario	tp	tfl	n	Volumen medido (mm)	Volumen estimado (mm)			
					Green-Ampt	Horton	Philip	Smith-Parlange
Fm. Mogotes	2,5	20	6	21,20 ± 2,9	21,35	18,3	23,2	21,49
S. cuartarios	10,5	23,5	11	15,31 ± 2,8	15,79	14,12	15,77	15,9
Fm. Marino	5,5	22,5	6	20,01 ± 3,6	20,21	19,79	21,06	20,3

situación. El rango del error cuadrático relativo que se produjo en cada caso se detalla en la **Tabla N° 4**.

El valor medio del parámetro conductividad hidráulica saturada ajustado en los cuatro modelos, se comparó con la tasa de infiltración medida en el mayor tiempo de aplicación de lluvia. Se presentan aquí a modo de ejemplo algunos casos:

- Fm. Mogotes, para un tiempo de aplicación de la lluvia de 20 minutos, la capacidad de infiltración constante medida en el ensayo N° 27 fue de 42,7 mm/h, en el N° 28 fue de 35,9 mm/h, mientras que

la conductividad hidráulica saturada que se ajustó en los 4 modelos es de 35,5 ± 8,01 mm/h.

- Sedimento cuartario, la velocidad de infiltración que se observó en el ensayo N° 38 en 43 minutos de simulación fue de 38,1 mm/h, en el ensayo N° 45 en 36 minutos de aplicación de lluvia fue de 47,6 y el parámetro Ks ajustado por los 4 modelos fue de 42,3 ± 6,08 mm/h.
- Fm. Mariño, la capacidad de infiltración medida en el ensayo N° 54 para un tiempo de aplicación de 35 minutos fue de 51,2 mm/h, mientras

simulation was 38.1 mm/h, in trial No. 45 in 36 minutes of rain application it was 47.6 mm/h and the Ks parameter adjusted by the four models was of 42.3 ± 6.09 mm/h.

- Mariño Fm., the infiltration capacity measured in trial No. 54 for lapse time of 35 minutes of rain application was of 51.2 mm/h, while the Ks adjusted parameter with the models was of 47.9 ± 5.41 mm/h.

These values are within the logical magnitudes as it happens that the constant infiltration capacity is a little less or approximately equal to

the saturated hydraulic conductivity

When controlling the Ks adjusted values with those calculated by Rawls et al. (1983) for similar soils in the USA, it was found that they were within the same magnitude order. In regards to the Sf parameters, there was major variability. In Mogotes Fm. Sf was of 84.7 ± 20.3 mm; in the Quaternary it was of 73.7 ± 17.9 mm and in Mariño Fm. it was of 80.7 ± 2.36 mm. These values were in the same magnitude order of those by Rawls for the same type of soil.

On the other hand, the volume infiltrated under the curves generated using the optimal parameters of **Table 3**, was compared with the mean value and standard deviation of the volumes under the measured curves. Since trials have been done with different times of application, and different times of ponding were also observed, the comparison between the infiltration curves over the same sedimentary deposit, was only carried out with the part of the curve between the lower rain period and the higher starting runoff period. **Table 5** presents the results, ponding time 'tp', rain final time 'tfl' and the quantity of analyzed trials 'n'.

When comparing the infiltrated volumes with those estimated, there did not appear significative differences. This shows that the four models adjusted with the used methodology can satisfactorily describe the volume infiltrated in the analyzed part of the curve

CONCLUSIONS

Through a rain simulator it was possible to generate useful data speedily and efficiently, without waiting for natural rains.

Through the four infiltration models and using the method-

que el parámetro Ks ajustado con los modelos fue de $47,9 \pm 5,41$ mm/h.

Estos valores están dentro de magnitudes lógicas, puesto que se cumple que la capacidad de infiltración constante es algo menor o aproximadamente igual a la conductividad hidráulica saturada.

Por otra parte, al comparar los valores ajustados de Ks con los calculados por Rawls et al. (1983) para suelo de textura similar de EE.UU., se encontró que estaban dentro del mismo orden de magnitud.

En cuanto al parámetro Sf, se presentó mayor variabilidad. En Fm. Mogotes Sf fue de $84,7 \pm 20,3$ mm; en cuartario fue de $73,7 \pm 17,9$ mm y en Mariño fue de $80,7 \pm 2,36$ mm. Valores que también resultaron en el mismo orden de magnitud que los de Rawls para el mismo tipo de suelo.

Por otra parte, se comparó el volumen infiltrado bajo las curvas generadas utilizando los parámetros óptimos de la **Tabla N° 3**, con el valor medio y el desvío standard de los volúmenes bajo las curvas medidas. Puesto que los ensayos se han realizado con tiempos de aplicación diferentes y a su vez se observaron distintos tiempos de encharcamiento, la comparación entre las curvas de infiltración sobre un mismo depósito sedimentario se realizó sólo con el tramo de curva entre el menor tiempo de inicio de escurrimiento. La **Tabla N° 5** presenta los resultados, los tiempos de encharcamiento 'tp', el tiempo final de lluvia 'tfl' y la cantidad de ensayos analizados 'n'.

Al comparar los volúmenes infiltrados medidos con los estimados no aparecieron diferencias significativas.

CONCLUSIONES

Mediante un simulador de lluvia se logró generar datos útiles en forma rápida y eficiente, sin estar a la espera de lluvias naturales.

A través de cuatro modelos de infiltración y empleando la metodología desarrollada por Diskin y Simon (1977), se estimó un conjunto de parámetros eficientes para caracterizar la infiltración en los suelos originados sobre tres depósitos sedimentarios de importancia en la región. El modelo de Green- Ampt fue el de mejor comportamiento, en segundo lugar Horton y en tercero y cuarto lugar Philip y Smith-Parlange.

El ajuste se realizó en forma global para cada depósito sedimentario. Al comparar la infiltración experimental con la predicha, se observó que este ajuste global no afectó seriamente los resultados.

El parámetro **Ks** para Fm. Mogotes ajustada con el modelo de Horton ha resultado mayor que las estimadas por los otros tres modelos; en cambio, en cuartario y Fm. Mariño, ha resultado de una magnitud similar. Tomando el valor medio de este parámetro ajustado por los cuatro modelos, el desvío ha sido menor a $8,01$ mm/h. En cuanto a **Sf**, parámetro presente en los modelos de Green-Ampt, Philip y Smith-Parlange, ha tenido mayor variabilidad, siendo el desvío menor a $20,3$ mm.

A pesar de la variabilidad del parámetro Sf, los volúmenes estimados por los cuatro modelos empleados han estado dentro del desvío de los volúmenes medidos, y el error cuadrático relativo asociado con la estimación de los parámetros no mostró diferencias de importancia en la precisión de la infiltración predicha.

REFERENCIAS

REFERENCES

- AHUJA, L.R.; J.W. NANEY and R.D. WILLIAMS. 1985. Estimating Soil Water Characteristics from Simpler Properties or Limited Data. Soil Science Society of America Journal, 49(5): 1100-1105.
- BRAKENSIEK, D.L.; W.J. RAWLS and W.R. HAMMON. 1979. Application of an Infiltrometer System for Describing Infiltration Into Soils. Transactions of the ASAE, 22(2): 320-325.
- BRAKENSIEK, D.L.; H. OSBORN and W.J. RAWLS. 1979. Field Manual for Research in Agricultural Hydrology. Agriculture Handbook N° 224. Science and Education Administration, United States Department of Agriculture.
- DISKIN, M.H. and E. SIMON. 1977. A Procedure for the Selection of Objective Functions for Hydrologic Simulation Models. Journal of Hydrology, 34(1977): 129-149.
- HORTON, R.E. 1933. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. Trans A.G.U.
- MEYER, L.D. and W.C. HARMON. 1979. Multiple-Intensity Rainfall Simulator for Erosion Research on Row Sideslopes. Transactions of the ASAE, 22(1): 100-103.
- RAWLS, W.J.; D.L. BRAKENSIEK, N. MILLER. 1983. Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. Journal of Hydraulic Engineering, 109(1): 62-69.
- RAWLS, W.J.; D.L. BRAKENSIEK and M.R. SAVABI. 1989. Infiltration Parameters for Rangeland Soil. Journal of Range Management, 42(2)
- REYNOLDS, W.D. and D.E. ELRICK. 1990. Ponded Infiltration from a Single Ring: I Analysis of Steady Flow. Soil Sci. Soc. Am. J., 54: 1233-1241.
- ROJAS, R.M. 1977. Simuladores de lluvia. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.
- YU-SI FOK, SANG-OK CHUNG and C.K. CLARK. 1982. Two Dimensional Exponential Infiltrations Equations. ASCE, 108(IR4).

ology developed by Diskin and Simon (1977), a set of efficient parameters was estimated to characterize the infiltration on the soils originated over three important sedimentary deposits of the region. The adjusted parameters have characterized infiltration in the Mendoza piedmont satisfactorily in the four models. The Green Ampt model was the one with the best behavior, Horton in the second place and Philip and Smith-Parlange in the third and fourth place.

The adjustment was globally done for each sedimentary deposit. The low relative quadratic errors between the experimental infiltration and that forecasted, show that this global adjustment does not seriously affect results.

The parameter Ks for the Mogotes Fm. adjusted by the Horton model, has resulted larger than those estimated by the other three models; instead the magnitude resulting in the Quaternary and on Mariño Fm. is similar. Taking the mean value of this parameter adjusted by the four models, the deviation has been less than 8.01 mm/h. In reference to Sf, parameters present in the models Green-Ampt, Philip and Smith-Parlange, it has had major variability, and deviation was less than 20.3 mm.

Instead of the variability of the Sf parameters, volumes estimated by the four models used have remained within the deviation of the measured volumes, and the square relative error associated to the parameters estimation, did not show significant differences in the precision of the forecasted infiltration.