

# AJUSTE DEL MODELO DE HORTON MEDIANTE DATOS DE INFILTRACION OBTENIDOS EN EL PIEDEMONTA MENDOCINO

NAVE MARCELA R., A. PEDRANI, A. VICH Y A. MARIANI

Manejo Ecológico de Cuencas. INIGEA, CC 330, Mendoza

## RESUMEN

Se ajustó la expresión de Horton a datos de infiltración obtenidos mediante simulador de lluvias en experiencias a campo. Para ello se trabajó sobre diferentes materiales geológicos, con dos coberturas vegetales y contenidos de humedad en el suelo: cob. veg. >60% y humedad existente, cob. veg. >60% y suelo húmedo y cob. veg. <30% y suelo húmedo.

En base a los ajustes realizados se calculó una ecuación generalizada. Las capacidades de infiltración oscilan entre 4,7 cm/h para material cuaternario y 5,7 cm/h para material terciario.

## INTRODUCCION

La infiltración en áreas naturales es una de las variables que gobierna la disposición del agua de precipitación sobre la superficie del suelo. Afecta el escurrimiento para la tormenta inmediata, y además junto con la evapotranspiración, afecta el contenido del agua del suelo y así la tasa de infiltración en el comienzo de la próxima precipitación. Por esta razón es importante tener en cuenta esta variable para resolver los modelos matemáticos utilizados en la simulación de procesos e interrelaciones de fenómenos

de lluvia-escorrentía. Es una variable poco cuantificada en campo.

En el piedemonte mendocino, existe muy poca información sobre la infiltración y la que se dispone proviene en su mayoría de ensayos con infiltrómetro de doble anillo.

La producción de este tipo de información a partir de un simulador de precipitación, si bien es de mayor costo y dificultad, es más completa. Permite mejorar la calidad de la información, debido a la posibilidad de completar el espectro de datos medidos, como por ejemplo: tiempo de encharcamiento, abstracción inicial, influencia de la cobertura vegetal, influencia de la pendiente, tiempo de infiltración de las depresiones una vez finalizada la aplicación de la lluvia, etc. Información que permite un análisis más completo y real del fenómeno de infiltración del agua en el suelo (Julander *et al.*, 1983).

Según la bibliografía se puede dividir a los modelos de infiltración en 4 grupos: 1) modelos empíricos; 2) modelos basados en la ecuación de Richards; 3) sintetizados a partir de soluciones numéricas a la ecuación de Richards y 4) modelos basados en el potencial de frente húmedo (Vich, 1985).

El presente trabajo, pretende:

1. ajustar la expresión de Horton a los datos de infiltración obtenidos con el simulador de precipitación a campo.

2. encontrar, en base a los ajustes anteriores, una ecuación generalizada para las formaciones geológicas en las que se ha trabajado.

## MATERIAL Y METODO

### *Descripción del simulador de lluvias*

El simulador de lluvia produce una precipitación artificial sobre un área determinada.

Es una estructura desmontable (Pedrani *et al.*, 1983), formada por tres líneas de cañerías, ubicadas a tres metros del suelo. Estas cuentan con 27 aspersores, existiendo la posibilidad de regular intensidades trabajando con menor cantidad de picos.

Para mejorar la distribución de la aplicación, las cañerías rotan sobre sí mismas, con un ángulo de giro de 90°. La duración de este movimiento en cada posición, se determina en el momento, en función de la existencia o no de viento.

El sistema, está montado sobre una parcela de 5 x 10 metros, que se aísla a través de una estructura perimetral metálica de modo de evitar el escape lateral de flujo superficial (Langford *et al.*, \*\*).

El agua proveniente de un camión cisterna, se impulsa con una bomba de un caudal de 35 m<sup>3</sup>/h y un motor de 8 HP. El flujo se dirige hacia un pulmón regulador

que mediante manómetros y válvulas exclusas permite controlar las presiones de trabajo y los caudales en cada línea.

La precipitación aplicada se mide como el promedio de los milímetros de agua recogidos en siete pluviómetros distribuidos al azar en la parcela.

El agua que escurre en la parcela, se colecta mediante un embudo y a través de un canal, se conduce hacia un vertedero tipo HS. Se adopta este tipo de vertedero, debido a que permite medir un amplio rango de descargas, puesto que tiene una apertura amplia para flujos altos, sin causar excesivos efectos de remanso, mientras que en flujos bajos, su apertura es reducida; de este modo, la estructura aforadora posee gran sensibilidad (Brakensiek *et al.*, 1979(a)).

A un lado del canal mencionado, se instala un limnógrafo en una cámara de quietamiento, de modo de registrar las alturas en milímetros del agua vertida por el embudo. Estas alturas de agua, se transforman a volumen de escurrimiento mediante la siguiente expresión:

$$\log Q = A + B \cdot \log (ha) + C \cdot \log (ha)^2$$

donde:

Q: descarga del vertedero.

ha: altura de agua registrada en el limnógrafo.

A, B y C : son constantes

### **Modelo de Horton**

El modelo de Horton, permite simular la curva de capacidad de infiltración del suelo. Es un modelo de tipo empírico, que se basa en conceptos simplificados que permiten expresar la capacidad de infiltración como una función del tiempo, de constantes empíricas y parámetros

del suelo.

La expresión de Horton de tres parámetros es la siguiente:

-K.t

$$f = fc + (fo - fc).e$$

donde:

f: es la capacidad de infiltración en el tiempo t

fo: es la capacidad de infiltración en el tiempo igual a cero

fc: es la capacidad de infiltración constante  
K: parámetro del suelo que controla el decrecimiento de la capacidad de infiltración

Los parámetros fo y K, dependen del contenido de agua inicial del suelo, así como también de la tasa de aplicación. Los parámetros de la ecuación se evalúan usualmente desde datos de infiltración experimentales (Haan *et al.*, 1982).

### **Desarrollo de la experiencia en campo**

Se realizan una serie de ensayos con simulador de precipitación, sobre 3 formaciones geológicas distintas: Fm. Mariño, Cubierta Cuartaria y Fm. Mogotes, ubicadas en el piedemonte mendocino, próxima a la ciudad de Mendoza.

Sólo se han seleccionado sitios de trabajo sobre Fm. Mariño en condición meteorizada.

En cada formación se trabaja en distintas parcelas, a su vez, en cada parcela, se efectúan tres simulaciones, bajo distintas condiciones:

- cobertura vegetal existente en la parcela (> 60 %), y contenido de hume-

dad presente en el suelo (porosidad disponible  $M > 0.29$ )

- cobertura vegetal existente (> 60 %) y suelo húmedo ( $M < 0.29$ )

- cobertura vegetal existente después de someter la parcela al corte de gramíneas y arbustos (< 30 %), y suelo húmedo ( $M < 0.29$ )

Las pendientes de las zonas de trabajo, oscilan entre 4 a 7 %, excepto en 3 pruebas donde la pendiente es de 28 %.

Los tiempos de aplicación, se prolongan unos minutos más después de lograr un equilibrio entre el flujo entrante y el saliente en la parcela (precipitación - escurrimiento).

Por esta razón, las experiencias tubieron duraciones variables desde 20 a 55 minutos.

Las intensidades de precipitación producidas son altas, alrededor de 90 a 100 mm/hora, esto se debe a dos motivos, por un lado trabajar en condiciones de mayor peligrosidad aluvional, y por otro, conseguir una satisfactoria uniformidad de aplicación de la lluvia (86 %) (Brakensiek *et al.*, 1979(b)). Es importante aclarar, que las intensidades de precipitación producidas en las distintas simulaciones, no fueron idénticas. Esto se debe a que los manómetros y válvulas exclusas sólo permiten ajustarlas dentro de un determinado rango, pero no a un valor exacto.

En todos los ensayos la capacidad de infiltración inicial se ha igualado a la intensidad de lluvia, pues depende de ella directamente, lo que indica que el valor real de capacidad de infiltración inicial es mayor o igual que el medido. Debido a la

falta de certeza, se descartan de los análisis los valores iniciales de capacidad de infiltración, es decir el tramo de la curva donde la capacidad de infiltración es igual a la intensidad de aplicación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se efectúan dos tipos de análisis. Por un lado, se ajusta con el modelo de Horton una curva de capacidad de infiltración a cada conjunto de valores medidos en cada ensayo, con el modelo de Horton y se calculan los parámetros del modelo "fo", "fc", y "K" (Rojas, 1977).

De un grupo de 28 ensayos, se obtuvieron 28 grupos de parámetros distintos, el error con que fueron calculados oscila entre 0.1 % y 19.4 %. En base a esto se lleva a cabo un primer análisis de tipo cualitativo con el objeto de identificar diferencias de comportamiento ante las distintas condiciones de trabajo.

Los datos de capacidad de infiltración obtenidos desde el simulador de lluvia, se ordenan según la formación geológica sobre la que se efectúa el ensayo. A su vez, se agrupan según la cobertura vegetal existente: mayor que 60 % y menor que 30 % y según la porosidad disponible, es decir según la capacidad de almacenar agua en el suelo.

Las curvas de las Figuras 1 y 2, representan valores promedios de curvas de capacidad de infiltración para las tres formaciones geológicas de trabajo, ambos son para suelo húmedo; la Figura 1 corresponde a cobertura vegetal mayor del 60 % y la Fig. 2 a cobertura vegetal menor del 30 %.

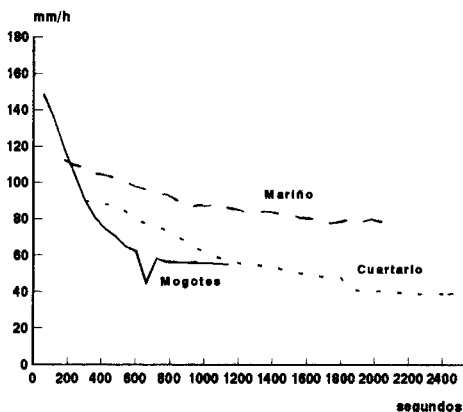


Fig. 1. Curvas de capacidad de infiltración promedio (mm/h) para cada Formación con suelo húmedo ( $M < 0,29$ ) y cobertura vegetal  $> 60\%$

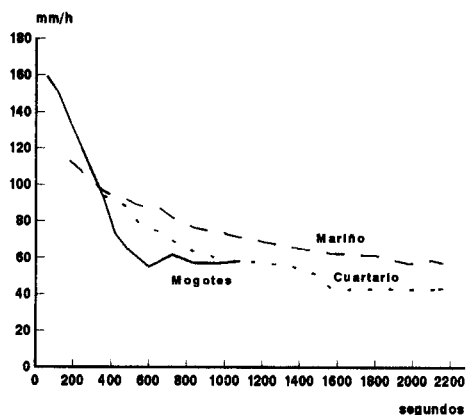


Fig. 2. Curvas de capacidad de infiltración promedio (mm/h) para cada Formación con suelo húmedo ( $M < 0,29$ ) y cobertura vegetal  $< 30\%$

En ambas figuras, se observa que la curva promedio para la Fm. Mogotes tiene una pendiente mucho mayor que en el caso de las curvas para Cubierta Cuartaria y para Fm. Mariño; sin embar-

go, su capacidad de infiltración constante, es decir el tramo de la curva que se torna constante tiene una tendencia intermedia entre los tramos de igual tiempo de las curvas para Fm. Mariño y C. Cuartaria.

En cuanto a las diferencias entre las curvas referidas al porcentaje de vegetación, se observa que el en caso de Fm. Mariño y cobertura vegetal < del 30 % la curva de capacidad de infiltración se desplaza mas abajo que en el caso en que la cobertura vegetal fue mayor del 60 %, pero en las Fm. Mogotes y C. Cuartaria, las diferencias observadas con cobertura mayor del 60 % y menor del 30 % vegetación, no son muy notorias.

Esta similitud en condiciones de cobertura vegetal tan diferentes, se debe a limitaciones del método de trabajo empleado, puesto que para lograr una cobertura menor de 30 % se poda la parcela. Pero, debajo de los arbustos, existe sobre el suelo una capa de mantillo vegetal, en parte descompuesto formando parte del suelo, además del mantillo que queda esparcido por toda la parcela como consecuencia de la poda efectuada para el ensayo. Esto impide que el suelo este

Tabla 1. Grupo de parámetros con menor error cuadrático relativo entre los datos experimentales y los calculados en cada ajuste

Formación	Parámetros		
	fo cm/h	fc cm/h	k
Mogotes	11,3	4,74	11,74
C. Cuartaria	2,3	4,77	5,62
Mariño	10,1	5,73	2,25

realmente desnudo produciendo dos efectos:

- evita el impacto directo de la gota sobre el suelo, que originaría un sellamiento del mismo, disminuyendo la capacidad de infiltración.

- produce el efecto de esponja, reteniendo el agua y por tanto retardando el escurrimiento.

De esto se puede decir, que debido a las altas intensidades de aplicación y a la capa de mantillo depositado en el suelo, se produce un enmascaramiento de las diferencias entre suelos con cobertura vegetal mayor del 60 % y menor del 30 %, que impiden verificar la influencia de la vegetación.

Posteriormente, se efectúa otro tipo de análisis, cuyo objetivo es encontrar un único grupo de parámetros para la expresión de Horton, para cada una de las formaciones geológicas mencionadas.

Para ello, con cada uno de los grupos de parámetros obtenidos en cada ajuste de las curvas de capacidad de infiltración, se calcula el error cuadrático relativo (RSE) entre las curvas medidas y las simuladas por la expresión de Horton.

El RSE representa la forma global de la curva. Si el RSE es igual a cero, la curva predicha coincidirá con la observada (Sharma, 1993).

$$RSE = \frac{\sum (f_i \text{ medida} - f_i \text{ calculada})^2}{\sum (f_i \text{ medida})}$$

Se trabaja con 10 grupos de datos para C. Cuartaria, con 8 grupos para Fm. Mariño

Tabla 2. Error cuadrático relativo entre la curva de capacidad de infiltración calculada y la curva experimental para la Formación Mogotes

	Cobertura > 60%				Cobertura < 30%		
	M > 0,29		M < 0,29		M < 0,29		
Ensayo n°	25	29	27	30	28	31	32
RSE	0,041	0,059	0,032	0,006	0,153	0,06	0,113

Tabla 3. Error cuadrático relativo entre la curva de capacidad de infiltración calculada y la curva experimental para la Formación Cuartaria

	Cobertura > 60%						Cobertura < 30%			
	M > 0,29			M < 0,29			M < 0,29			
Ensayo n°	36	39	43	37	40	44	38	41	42	45
RSE	0,001	0,008	0,096	0,004	0,012	0,019	0,066	0,007	0,006	0,007

Tabla 4. Error cuadrático relativo entre la curva de capacidad de infiltración calculada y la curva experimental para la Formación Mariño

	Cobertura > 60%					Cobertura < 60%			
	M > 0,29			M < 0,29		M < 0,29			
Ensayo n°	46	49	52	47	53	48	51	54	
RSE	0,014	0,022	0,026	0,007	0,067	0,019	0,014	0,142	

y con 7 para Fm. Mogotes.

De igual modo que en el análisis cualitativo, los datos provienen de ensayos efectuados sobre distintas parcelas con idéntico tratamiento de cobertura vegetal.

La Tabla 1 muestra el grupo de parámetros que posee menor error

cuadrático relativo entre los datos experimentales y los calculados con cada grupo de parámetros proveniente de cada ajuste.

En las Tablas 2, 3 y 4, se detalla el error cuadrático relativo entre la curva de capacidad de infiltración calculada con los parámetros  $f_0$ ,  $f_c$  y  $k$ , seleccionados

para cada formación geológica y las curvas experimentales de cada ensayo.

Las Figuras 3, 4 y 5, representan las curvas de capacidad de infiltración medidas y simuladas en el caso que se produjo menor RSE, para las Fm. Mogotes, Cubierta Cuartaria y Fm. Mariño, respectivamente.

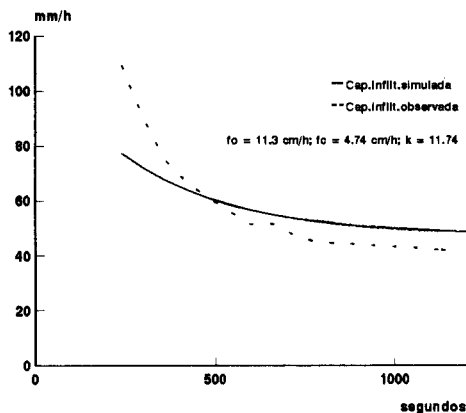


Fig. 3. Velocidad de infiltración observada y simulada para la Fm. Mogotes

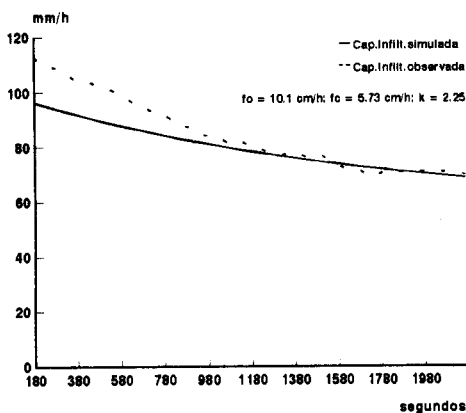


Fig. 4. Velocidad de infiltración observada y simulada para la Fm. Mariño

Las curvas de velocidad de infiltración simuladas, se calculan con los parámetros propuestos en la Tabla 1. Estas representan la forma de la curva una exactitud aceptable, sobre todo después de los diez primeros minutos aproximadamente. En este primer tramo en los ensayos con simulador de lluvia, la curva de infiltración observada es mayor que la calculada. Esto se debe a que se incluye como velocidad de infiltración, además del agua que utiliza el suelo en satisfacer su humedecimiento inicial, el agua que satisface la interceptación de la vegetación y el almacenamiento en las microdepressiones del suelo.

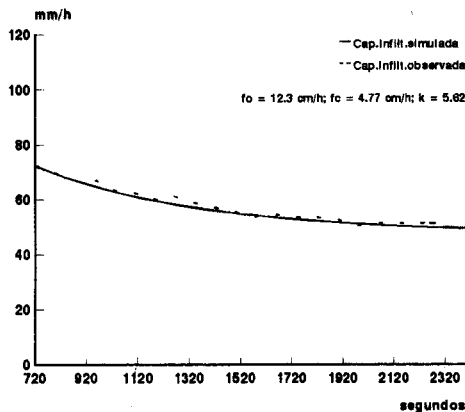


Fig. 5. Velocidad de infiltración observada y simulada para la Cub. Cuartaria

En el caso de la Fm. Mogotes el RSE producido oscila entre 3.2 y 15.3 %. Para Cubierta Cuartaria el menor RSE fue de 0.1 % y el mayor de 9.6 %. En el caso de la Formación Mariño el RSE esta entre 0.7 y 14.2 %.

Esta dispersión en el rango del porcentaje del RSE, se debe a que entran en

juego numerosas variables, como el tipo de vegetación existente en la parcela, la protección que ejercen las distintas especies, la variación de la aplicación de la lluvia en los distintos ensayos, las pendientes de las parcelas no son exactamente iguales, temperatura, etc.

## CONCLUSIONES

Los ajustes efectuados con el modelo de Horton a los datos experimentales han sido satisfactorios.

El tramo final de la curva tiene una exactitud aceptable, pero es conveniente seguir con los ensayos de infiltración para tiempos de aplicación mayores, con el fin de mejorar los valores de infiltración básica.

Las capacidades de infiltración constante con menor error cuadrático relativo para la Fm. Mogotes y Cubierta Cuartaria oscilan alrededor de los 4.7 cm/h, mientras que para la Fm. Mariño es de 5.7 cm/h.

De los grupos de parámetros calculados para las tres formaciones geológicas los de menor RSE han sido los obtenidos para cubierta cuartaria.

Los resultados de los estudios con cobertura vegetal > del 60 % y < del 30 %, evidencian la necesidad de continuar con ellos para determinar y verificar la influencia de distintas coberturas vegetales.

## BIBLIOGRAFIA

BRAKENSIEK, D.L., K.B. OSBORN & W.J. RAWLS, 1979(a). Field Manual For

Research In Agricultural Hidrology. Agriculture Handbook N° 224.

BRAKENSIEK D.L., W.J. RAWLS & W.R. HAMON, 1979(b). Aplicación de un infiltrometro system for describing infiltration into soils. Transactions of the ASAE 22: 320-333

HAAN C.J., H.P. JOHNSON & D.L. BRAKENSIEK, 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers: 139-155

HILLEL D., 1980. Fundamentals of Soil Physics. Department of Plant and Soil Sciences. Universidad de Massachusetts.

JULANDER, R.P. & W. JACKSON, 1983. Advances in Infiltration. Proceeding of the National Conference on Advances in Infiltration. 203-210.

LANGFORD K.J., R.J. MAYER AND A.K. TURNER, Studies of Infiltration and Overland Flow for Natural Surfaces.

PEDRANI A., E. MARTINES C. Y A. VICH, 1983. Simulador de lluvias Parcela de Erosión e Influencia de la Vegetación. Actas de XI Congreso Nacional del Agua, Córdoba. Aguas Superficiales II: 483-488.

ROJAS R.M., 1977. Simuladores de lluvia. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.

SHARMA K.D., 1993. Distributed Numerical Modelling of Runoff and Soil Erosion using Thematic Mapper Data and Gis Central Arid Zone Research Institute, Jz Indie

VICH A.I.J., 1985. Modelo de Simulación del Balance de Aguas y Producción de Sedimentos a Nivel de Parcela. Tesis de maestria en ciencias. 16-36.

ZEGELIN S.J. AND I. WHITE, 1982. Design for a Field Sprinkler infiltrometer. Soil Science Society of America Journal. Vol 46 N°6; 1129-1133.