

## CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO: CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN EN EL CENTRO DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

MARCOS SEBASTIÁN KARLIN\*<sup>1-2</sup>; JAVIER BERNASCONI SALAZAR<sup>1</sup>; AMANDA CORA<sup>1-3</sup>; SOFÍA SÁNCHEZ<sup>1</sup>; SEBASTIÁN ARNULPHI<sup>1-2</sup>; RICARDO ACCIETTO<sup>1-2</sup>

Recibido: 13/9/2018

Recibido con revisiones: 14/6/2019

Aceptado: 3/8/2019

### RESUMEN

Los suelos en el centro de Argentina han sufrido cambios considerables en las últimas cinco décadas como consecuencia de la habilitación de tierras para el uso agropecuario, industrial o habitacional, y disturbios antrópicos tales como los incendios forestales periódicos o invasión de especies exóticas. Estos cambios afectan las características edáficas e hidrológicas de estos suelos, modificando los ciclos hidrogeoquímicos de las cuencas hidrográficas. La capacidad de infiltración se modifica debido a la alteración de la porosidad, densidad y/o textura de los suelos a nivel superficial o subsuperficial como consecuencia de disturbios físico-químicos. En el presente trabajo evaluamos la capacidad de infiltración en suelos de los órdenes Molisol y Entisol presentes en el centro de Córdoba (Argentina), bajo el efecto de distintos tipos de uso, historia de disturbio y coberturas vegetales. Las mediciones de capacidad de infiltración se efectuaron mediante el método del anillo simple, obteniendo los valores que permitieron construir las curvas de infiltración. Se analizaron los valores de capacidad de infiltración inicial ( $I_{ini}$ ), infiltración básica ( $IB$ ) y movimiento lateral del agua ( $ML$ ). En Molisoles, la capacidad de infiltración se incrementa a medida que transcurre el tiempo desde la supresión de actividades agrícolas. Áreas desmontadas para ganadería, sin historia agrícola, poseen valores de capacidad de infiltración intermedia entre las de bosque nativo y áreas bajo agricultura reciente, por efecto del pisoteo. En suelos Entisoles azonales, los valores de capacidad de infiltración mejoran en el tiempo luego de la ocurrencia de incendios forestales. En suelos Entisoles intrazonales, el efecto de la ganadería reduce hasta cinco veces la capacidad de infiltración. Los Ustifluventes son particularmente susceptibles al pisoteo por su mayor plasticidad. En áreas invadidas por especies leñosas exóticas invasoras, los residuos vegetales acumulados reducirían los valores iniciales de capacidad de infiltración, acelerándose durante el tiempo de ensayo. Estos resultados pueden ser utilizados como insumos para la elaboración o ajuste de modelos hidrológicos para el centro de la Argentina.

**Palabras clave:** Disturbio, hidrología, infiltración, movimiento lateral de agua.

## CHANGES IN SOIL USE: INFILTRATION CAPACITY IN THE CENTER OF CÓRDOBA (ARGENTINA)

### ABSTRACT

Soils in the center of Argentina have undergone considerable changes in the last five decades because of the qualification of land for agricultural, industrial or residential use, and to anthropic disturbances such as periodic forest fires or invasion of alien species. These changes affect edaphic and hydrological characteristics of these soils, modifying the hydrographic basin's hydrogeochemical cycles. The infiltration capacity is modified due to soil porosity, density and/or texture alteration at the surface or subsurface level as a result of physical-chemical disturbances. In the present work we evaluate the infiltration capacity in soils of the Molisol and Entisol orders present in the center of Córdoba (Argentina), under the effect of different uses, disturbance history and vegetation cover. Infiltration capacity measurements were carried out using the single ring method, obtaining the values that allowed the construction of the infiltration curves. The initial infiltration capacity ( $I_{ini}$ ), basic infiltration ( $IB$ ) and lateral movement of water ( $ML$ ) values were analyzed. In Molisols, the infiltration capacity increased as time elapses since the suppression of agricultural activities. Cleared areas for livestock, without agricultural history,

1 Asociación Civil El Cuenco-Equipo Ambiental

2 Universidad Nacional de Córdoba-Facultad de Ciencias Agropecuarias

3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-EEA Manfredi

\* Autor de contacto: mkarlin@agro.unc.edu.ar

have intermediate rates of infiltration capacity between those of native forests and areas under recent agriculture, due to trampling. In azonal Entisols soils, the infiltration capacity improved over time after the occurrence of forest fires. In intrazonal Entisols soils, the effect of livestock reduced the infiltration capacity up to five times. The Ustifluvents are particularly susceptible to trampling because of their higher plasticity. In areas invaded by alien woody invasive species, the accumulated plant residues would be the cause of the reduced initial values of infiltration capacity, accelerating during the test time. These results can be used as inputs for the elaboration or adjustment of hydrological models for the center of Argentina.

**Key words:** Disturb, hydrology, infiltration, lateral movement of water.

## INTRODUCCIÓN

La presión de uso del suelo en el centro de Argentina ha aumentado en las últimas cinco décadas como consecuencia de la habilitación de tierras para el uso agropecuario, industrial o habitacional. Estos cambios, sumados a disturbios antrópicos tales como los incendios forestales periódicos o la invasión de especies exóticas son algunos de los principales procesos de degradación que afectan las características edáficas e hidrológicas de estos suelos, modificando los ciclos hidrogeoquímicos de las cuencas (Bernasconi *et al.*, 2015).

Las cuencas de las zonas serranas captan el agua de las precipitaciones, regulando su removilización a través de procesos de infiltración, percolación y escorrentía. La escorrentía es la resultante del excedente de lluvia captada en la superficie del suelo que no puede infiltrar (Hillel, 1998). Los caudales de escorrentía dependen de las intensidades de las lluvias, topografía, tipo de suelo y cobertura vegetal. El agua removilizada transcurre hacia zonas bajas, con suelos generalmente más profundos y con mayor aptitud agrícola (Karlin *et al.*, 2018).

Se entiende por capacidad de infiltración el flujo resultante cuando el agua a presión atmosférica se mueve libre verticalmente desde la superficie del suelo (Hillel, 1998) y asimismo, cuando el suministro de agua al suelo es ilimitado (Votrubova *et al.*, 2017). La infiltración del agua en un suelo suele ser inicialmente mayor y luego tiende a reducirse a medida que el suelo alcanza su estado estacionario, alcanzando un valor de infiltración básica que tiende a ser constante (Liu *et al.*, 2011). El término tasa de infiltración está íntimamente relacionado con el de capacidad de infiltración, pero se diferencia en que el primero depende también de la presión a la cual el agua

es suministrada al suelo, la cual puede ser mayor o menor a la atmosférica (Hillel, 1998).

La capacidad de infiltración se modifica debido a la alteración de la porosidad, densidad y/o textura de los suelos a nivel superficial o subsuperficial, ya sea como consecuencia de disturbios físico-químicos producto de la remoción mecánica en suelos de diferentes agroecosistemas (Rollán *et al.*, 2004; Rollán & Bachmeier, 2014), por efecto de la acumulación de materiales hidrofóbicos luego de incendios forestales (Robichaud, 2000; Martin & Moody, 2001; MacDonald & Huffman, 2004), o debido a la compactación por acción del pisoteo por ganado (Trimble & Mendel, 1995; Mwendera & Saleem, 1997; Archer *et al.*, 2015). Las gramíneas tienden a mejorar la porosidad del suelo, así como los árboles y arbustos tienden a aumentar la cantidad de mantillo superficial, mejorando generalmente la capacidad de infiltración de los suelos (Archer *et al.*, 2015) pero también aumentando la rugosidad superficial, responsable de reducir la velocidad de escorrentía (Chandler *et al.*, 2018).

A nivel mundial (Mwendera & Saleem, 1997; Osuji *et al.*, 2010; Archer *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2018) y regional (Aoki & Sereno, 2006) se han registrado valores de infiltración bajo diferentes usos del suelo en agroecosistemas. Sin embargo, existe una importante vacante empírica referida a la dinámica y tiempos de recuperación de la capacidad de infiltración luego de disturbios de origen antrópico (Rogger *et al.*, 2017).

La ocurrencia en los últimos años de graves eventos de inundaciones en las Sierras Chicas de Córdoba y áreas de influencia, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo (Koberwein, 2016), hacen necesario estudiar y definir los parámetros hidrológicos básicos del amplio

abanico de situaciones edáficas de la región a fin de adecuar y actualizar modelos hidrológicos y, en consecuencia, redefinir políticas de ordenamiento territorial.

La hipótesis que se plantea es que los disturbios antrópicos mencionados para el centro de Argentina (incendios, invasión de especies exóticas leñosas, agricultura, ganadería) reducen la capacidad de infiltración de los suelos.

En el presente trabajo evaluamos la capacidad de infiltración en suelos de los órdenes Molisol y Entisol presentes en el centro de Argentina, bajo el efecto de distintos tipos de uso, historia de disturbio y coberturas vegetales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

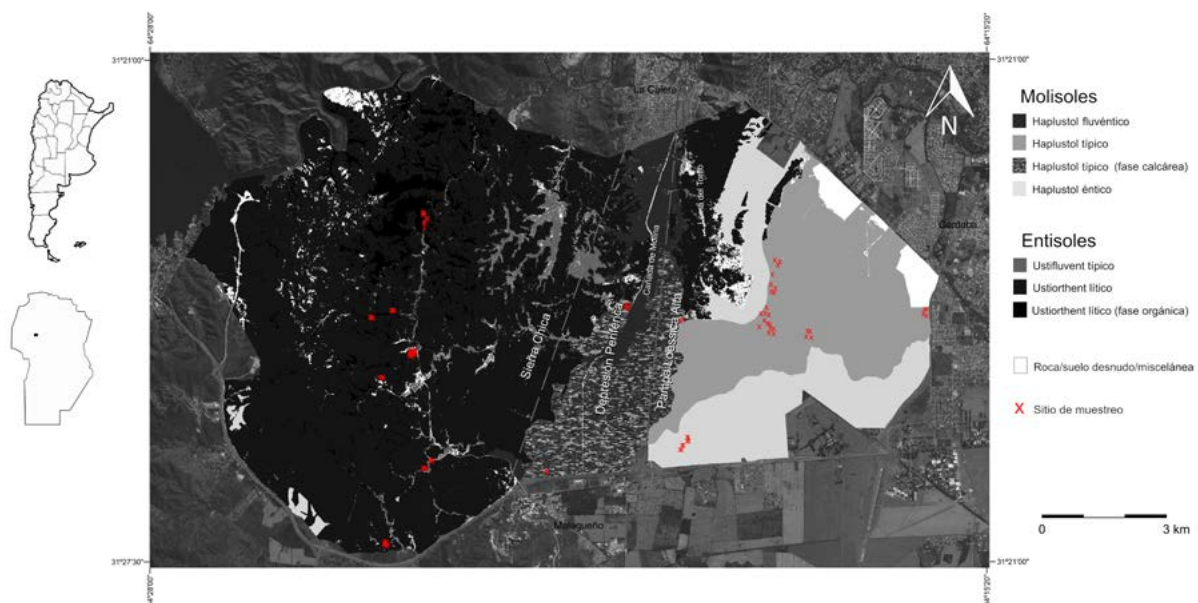
La Reserva Natural de la Defensa La Calera (RNDLC) se encuentra ubicada en el centro de la República Argentina y ocupa una superficie de 13.628 ha. Esta área es colindante hacia el Este con la Ciudad de Córdoba, hacia el Oeste con el lago San Roque y la localidad de Villa San Nicolás, hacia el Sur con la localidad de Yoccina y hacia el Norte con las localidades de La Calera y el Diquecito. Sus límites pueden ser demarcados mediante una traza vial definida por la RN

20 al Sur, la RP 73 al Oeste, la RP E-55 al Norte y la Avenida Circunvalación al Este.

La precipitación media anual es de 750 mm, con distribución marcadamente estival. La temperatura media anual es de 16°C, con una máxima de 24°C y una mínima de 10,1°C. Las máximas absolutas alcanzan los 44°C y las mínimas absolutas -10°C (Dalmasso *et al.*, 1997; datos propios no publicados).

En base al mapa de suelos de la RNDLC elaborado por Karlin *et al.* (2018), se identificaron las unidades taxonómicas que permitieron contar con una base cartográfica para el diseño experimental (**Figura 1**). El área de estudio está definida por dos órdenes de suelo, Molisoles y Entisoles, que se corresponden con dos ecorregiones diferentes, Espinal (Distrito Cordubense) y Chaco (Distrito Serrano) (Lewis & Collantes, 1973; Cabrera, 1976) respectivamente. Cada uno cuenta con vegetación, historia de uso del suelo y disturbios diferentes (Karlin *et al.*, 2014; Bernasconi *et al.*, 2015).

Dentro del sector serrano, los Entisoles se diferenciaron, según la clasificación de Baldwin *et al.* (1938), en suelos intrazonales de zonas riparias y suelos azonales de laderas. En el sector de llanura los Molisoles se dividen en suelos de lomas



**Figura 1:** Mapa del área de estudio con las unidades taxonómicas. Las cruces rojas corresponden a los sitios de muestreo. En base a Karlin *et al.*, 2018.

**Figure 1:** Map of the study area with the taxonomic units. Red crosses represent the sampling sites. Based on Karlin *et al.*, 2018.

(Haplustoles énticos), bajos (Haplustoles típicos) y abanicos aluviales (Haplustoles fluvénticos) (Karlin *et al.*, 2018).

### Diseño del experimento

Para cada unidad taxonómica se seleccionaron sitios de muestreo con diferente cobertura vegetal, historia de uso y disturbio. El número de repeticiones para cada tratamiento dependió de la accesibilidad, representatividad en superficie, y disponibilidad de áreas para evaluación (**Tabla 1**).

Para Molisoles (Haplustoles énticos, típicos y ustifluvénticos), se midió la capacidad de infiltración

en relictos de bosque nativo con dominio de *Aspidosperma quebracho-blanco* Schltld. (BN), áreas desmontadas cubiertas por pastizal natural y sin historia agrícola (PN), áreas con historia de agricultura extensiva con clausura de ocho (AG8) y tres años. Sobre este último tratamiento se midieron sitios afectados (AGQ3) y no afectados por incendio (AG3). En AGQ3 las mediciones se realizaron a una semana del evento (junio de 2017) y antes de la ocurrencia de precipitaciones.

Para Entisoles azonales (Ustiortents líticos), se determinó capacidad de infiltración en sitios con diferente antigüedad en la ocurrencia de incendios, todos ellos caracterizados como fachina-

**Tabla 1:** Tabla síntesis de sitios estudiados, clase textural de los horizontes superficiales y su vegetación dominante.

**Table 1:** Studied sites, textural class of the soil horizon and their dominant vegetation.

Orden de suelo <sup>(1)</sup>	Tratamiento	Abreviatura	Nº de repet.	Clase textural (hz. sup.) <sup>(1)</sup>	Vegetación característica <sup>(2)</sup>
Molisoles	Bosque nativo	BN	10	Fr L	Relictos de bosques de <i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>
	Pastizal sin historia agrícola	PN	4	Fr L	Pastizal natural
	Áreas agrícolas con ocho años de clausura	AG8	4	Fr L	Pastizal natural y adventicio
	Áreas agrícolas con tres años de clausura	AG3	13	Fr L	Pastizal natural y adventicio
	Áreas agrícolas con tres años de clausura afectados por incendios recientes	AGQ3	13	Fr L	Suelo desnudo, ceniza
Entisoles azonales	Fachinales de <i>Vachellia caven</i> y <i>V. aroma</i> sin historia reciente de incendios	FT	15	Fr/Fr Ar	Bosque abierto de <i>Vachellia</i> spp.
	Fachinales de <i>Vachellia</i> quemados hace cuatro años	FQ4	8	Fr/Fr Ar	Bosque abierto de <i>Vachellia</i> spp.
	Fachinales de <i>Vachellia</i> con historia de incendios recientes, medidos antes de la primera lluvia	FQA	8	Fr/Fr Ar	Suelo desnudo, ceniza
	Fachinales de <i>Vachellia</i> con historia de incendios recientes, medidos posteriormente a la primera lluvia	FQP	8	Fr/Fr Ar	Primeros rebrotes de herbáceas, ceniza
Entisoles intrazonales	Comunidades de <i>Sebastiania commersioniana</i> bajo clausura	BC	8	Fr Ar	Bosque cerrado de <i>S. commersioniana</i> , con tapiz herbáceo de <i>Oplismenus hirtellus</i> y abundante mantillo
	Comunidades de <i>S. commersioniana</i> bajo pastoreo	BP	3	Fr Ar	Bosque cerrado de <i>S. commersioniana</i> , sin tapiz herbáceo y con abundante mantillo.
	Áreas con invasión de exóticas y bajo pastoreo	EP	4	Fr Ar	Bosque cerrado de <i>Morus alba</i> , con abundante acumulación de hojarasca en el suelo
	Áreas riparias bajo pastoreo	RP	6	Fr	Tapiz herbáceo de <i>Cynodon dactylon</i>

(1) Descrito en detalle en Karlin *et al.*, 2018.

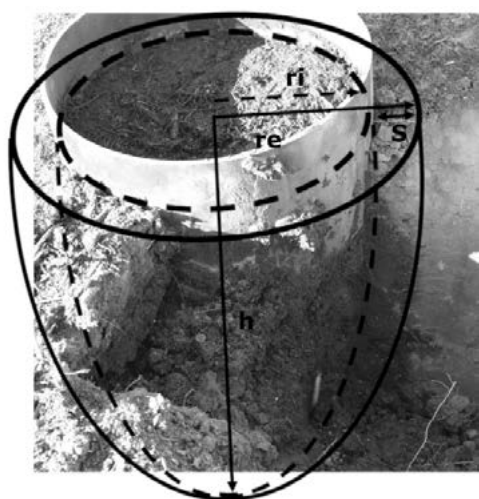
(2) Descrito en detalle en Karlin *et al.*, 2014.

les de *Vachellia caven* (Molina) Seigler & Ebinger y *V. aroma* (Gillies ex Hook. & Arn.) Seigler & Ebinger. Así, se identificaron sitios con más de diez años (FT), cuatro años (FQ4) y menos de un mes de antigüedad de ocurridos los incendios. Los últimos fueron medidos antes (FQA) y después de la ocurrencia de lluvias (FQP). Los incendios forestales ocurridos en FQ4, FQA y FQP fueron todos de baja intensidad (100 a 200°C).

Para Entisoles intrazonales, se evaluaron sitios con comunidades de *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B. Sm. & Downs (Ustiorrents líticos, fase orgánica), denominadas comúnmente como blanquillales, con cuatro años de clausura (BC) y bajo pastoreo continuo (BP). También se realizaron mediciones en sitios con alto grado de invasión de *Morus alba* L. y bajo pastoreo (EP). Finalmente, se midieron áreas de influencia riparia bajo pastoreo, correspondientes a Ustifluventes típicos (RP).

### Medición de la capacidad de infiltración

Las mediciones de capacidad de infiltración se efectuaron entre mayo de 2017 y mayo de 2018, al menos una semana después de la ocurrencia de precipitaciones para reducir su efecto sobre los valores iniciales de infiltración. El método utilizado fue el de anillo simple (Sepúlveda, 1999; Godagnone *et al.*, 2012) por ser experimentalmente simple y por consumir menor cantidad de agua durante el ensayo, aunque esta asume también un movimiento lateral en el suelo que debe ser considerado (Votrubova *et al.*, 2017).



El método anillo simple consiste en la utilización de un cilindro de acero de 0,21 m de diámetro, 0,12 m de alto y 0,0032 m de espesor que es clavado en el suelo hasta una profundidad de 0,06 m (Godagnone *et al.*, 2012). Una vez instalado, se aplicaron dentro del anillo cargas hidráulicas de 15 mm, cronometrando el tiempo que tarda en insumirse completamente el agua. Una vez insumida completamente el agua, se registró el tiempo transcurrido, realizando inmediatamente después una nueva recarga. El procedimiento se repitió hasta que el tiempo de infiltración se hizo constante, alcanzando la infiltración básica (*IB*) del suelo.

Finalizado el procedimiento, se retiró el anillo y se cavó unos centímetros por debajo del nivel inferior del anillo para medir y registrar el movimiento lateral del agua, para luego descontarlo del volumen total infiltrado.

De esta forma se consideraron dos volúmenes: 1) volumen total de humectación del suelo; 2) volumen interno que representa sólo el valor de volumen de movimiento vertical de infiltración. Para esto se asumieron las dimensiones de dos paraboloides ( $\left(\frac{1}{2}\pi r^2\right)h$ ; donde  $r$  es el radio del paraboloides externo ( $r_e$ ) o interno ( $r_i$ ) y  $h$  la altura o profundidad del paraboloides; (**Figura 2**). La diferencia de ambos volúmenes ( $\Delta V = \left(\frac{1}{2}\pi r_e^2\right)h - \left(\frac{1}{2}\pi r_i^2\right)h$ ) representa el volumen de agua que se perdió por movimiento lateral. La rela-

**Figura 2:** Diagrama de la relación entre el volumen total (línea entera) y el volumen interno (línea punteada) de humectación.  $h$ =profundidad del bulbo de mojado;  $r_i$ : radio interior;  $r_e$ : radio exterior.

**Figure 2:** Diagram of the relation between the total volume (continuous line) and the internal volume (dotted line) of humectation.  $h$ = wet bulb depth;  $r_i$ : internal radius;  $r_e$ : external radius.

ción entre este volumen ( $\Delta V$ ) y el volumen del paraboloide interno  $\left(\frac{1}{2}\pi r_i^2\right)h$  representa una fracción que se utilizó para corregir los valores de infiltración. Puesto que ambos paraboloides tienen la misma profundidad ( $h$ ), ambos valores se anulan y no es necesario registrar dicho valor a campo. Esto da como resultado un factor de corrección entre uno y cero ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), siendo cero cuando no existe movimiento lateral de agua.

### Análisis de datos

La lámina de agua aplicada (15 mm) en relación al tiempo de insumo, multiplicado por el factor de corrección, permite obtener los valores de capacidad de infiltración instantánea. Estos valores se expresan en  $\text{mm h}^{-1}$  y se grafican en función al tiempo expresado en minutos.

A los valores de capacidad de infiltración, representados en gráficos de dispersión, se les ajustó una función potencial de acuerdo al modelo propuesto por Kostiakov (1932, en Hillel, 1998) la cual se define como  $i = Bt^{-n}$ , donde  $B$  y  $n$  son constantes. El parámetro  $B$  está vinculado a las condiciones iniciales de humedad del suelo y puede asociarse a los valores iniciales de infiltración ( $I_{ini}$ ), mientras que el parámetro  $n$  está relacionado con la distribución estructural del suelo (Landini *et al.*, 2007).

Los valores de  $IB$  fueron determinados calculando el promedio de aquellos valores de infiltración parcial sucesivos del sector asintótico de las curvas potenciales que no excedían una desviación estándar del 20% respecto a la media de dichos valores sucesivos.

La variable  $I_{ini}$  se correlacionó con el parámetro  $B$  de la curva potencial a través de una regresión lineal. Se realizaron ANAVA para los valores de  $IB$ ,  $I_{ini}$  y  $ML$  a fin de determinar diferencias significativas entre tratamientos (LSD Fisher). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

## RESULTADOS

Los parámetros  $B$  y  $n$  obtenidos de las curvas potenciales no fueron analizados *per se* debido a que en ciertos tratamientos (AGQ3, FQA, FQP

y EP) algunos valores de  $I_{ini}$  resultaron ser menores que la  $IB$  y las curvas no ajustaron satisfactoriamente en estos casos (evidenciado en bajos  $R^2$ ), por lo que no expresan adecuadamente el comportamiento del agua en el suelo. Por este motivo se utilizó la variable  $IB$ , que se puede relacionar indirectamente con las condiciones estructurales del suelo y el efecto textural. Si bien las condiciones estructurales dependen de numerosas variables, valores altos de  $IB$  podrían sugerir buenas condiciones estructurales (e.g., suelos más porosos o agregados) y/o suelos más arenosos respecto a aquellos de  $IB$  bajos (Hillel, 1998; Pachepsky & Park, 2015).

La regresión lineal entre  $I_{ini}$  y el parámetro  $B$  de la función de Kostiakov ajustó significativamente ( $I_{ini}=1,28\pm 0,11B$ ;  $R^2=0,83$ ;  $C_p \text{ Mallows}=507,85$ ;  $P<0,0001$ ). Esto indica que la variable  $I_{ini}$  puede ser utilizada como estimador de  $B$ , aunque deberían discriminarse aquellos casos en los cuales  $I_{ini}$  son bajos, como ocurre en los tratamientos AGQ3, FQA, FQP y EP.

En la **Tabla 2** se muestran los parámetros evaluados por orden de suelo y tratamiento.

### Molisoles

En la **Figura 3** se grafican las curvas de infiltración para Molisoles (Haplustoles típicos, énticos y ustiflúvéticos), diferenciados por tratamiento y con su función potencial ajustada. En esta Figura se observa una notable diferencia entre BN y el resto de los tratamientos. Pueden apreciarse también comportamientos similares entre PN y AG8 por un lado, y entre AG3 y AGQ3 por el otro.

La  $I_{ini}$  es elevada en BN y supera significativamente (LSD Fisher;  $F=11,92$ ;  $P<0,0001$ ), entre dos y siete veces, al resto de los casos. La menor  $I_{ini}$  corresponde AG3 y resulta ser poco más de  $100 \text{ mm h}^{-1}$  menor que la de los sitios análogos afectados por fuego (AG3Q), aunque esta diferencia no es significativa (**Tabla 2**). En AGQ3 se observaron tres casos donde los valores de  $I_{ini}$  están deprimidos respecto a valores sucesivos de capacidad de infiltración.

Los valores de  $IB$  en BN también superan ampliamente y significativamente (LSD Fisher;  $F=13,53$ ;  $P<0,0001$ ) a los suelos donde alguna vez se rea-

**Tabla 2:** Valores promedio y coeficientes de variación de infiltración inicial ( $I_{ini}$ ), infiltración básica ( $IB$ ) y movimiento lateral del agua ( $ML$ ), discriminados por orden de suelo y tratamiento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas.

**Table 2:** Mean values and variation coefficients of the initial infiltration ( $I_{ini}$ ), basic infiltration ( $IB$ ) and lateral movement of water ( $ML$ ), discriminated by soil order and treatment. Different letters indicate significant statistical differences.

Orden desuelo	Tratamiento (número de sitios)	$I_{ini}$ (mm h <sup>-1</sup> )***	$IB$ (mm h <sup>-1</sup> )***	$ML$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Molisoles	BN (10)	1.281,28 (56,22%) b	347,17 (73,75%) b	<b>0,19 (149,46%)</b>
	PN (4)	281,90 (26,04%) a	79,64 (51,25%) a	<b>0,15 (98,09%)</b>
	AG8 (4)	668,24 (30,48%) a	113,84 (30,59%) a	<b>0,42 (68,02%)</b>
	AG3 (13)	189,79 (75,83%) a	33,45 (75,06%) a	<b>0,28 (85,36%)</b>
	AGQ3 (13)	298,30 (123,28%) a	43,85 (131,33%) a	<b>0,41 (41,30%)</b>
		$I_{ini}$ (mm h <sup>-1</sup> )**	$IB$ (mm h <sup>-1</sup> )*	$ML$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )*
Entisoles azonales	FT (15)	966,2 (80,3%) a	292,9 (62,4%) a	<b>0,22 (61,6%) ab</b>
	FQ4 (8)	830,1 (53,0%) a	190,4 (40,3%) ab	<b>0,16(149,8%) a</b>
	FQA (8)	219,4 (94,7%) b	151,5 (54,6%) b	<b>0,34 (26,7%) b</b>
	FQP (8)	121,3 (59,7%) b	114,1 (62,1%) b	<b>0,33 (39,8%) b</b>
		$I_{ini}$ (mm h <sup>-1</sup> )*	$IB$ (mm h <sup>-1</sup> )***	$ML$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
Entisoles intrazonales	BC (8)	937,9 (59,0%) a	676,3 (40,3%) b	<b>0,06 (152,0%)</b>
	BP (3)	778,2 (113,7%) ab	125,1 (70,7%) a	<b>0,21 (94,7%)</b>
	EP (4)	128,7 (24,3%) b	141,2 (48,7%) a	<b>0,27 (52,7%)</b>
	RP (6)	202,0 (129,8%) b	50,4 (95,1%) a	<b>0,16 (126,4%)</b>

Diferencias estadísticamente significativas: \*\*\* P<0,001; \*\* P<0,01; \* P<0,05

lizó agricultura (AG3, AG3Q y AG8). Los valores de  $IB$  para BN son de entre tres y diez veces más elevados que aquellos con historia agrícola. Es menor la diferencia cuando se compara con áreas de mayor tiempo de clausura (AG8), cuya  $IB$  representa el 32,8 % respecto a los valores promedio de BN, mientras que la mayor diferencia se observa cuando se compara con sitios con menor tiempo de clausura (AG3), cuyos valores de  $IB$  representan el 9,6 % respecto a los valores promedio de BN.

Los suelos afectados por incendios de pastizal (AGQ3) muestran una media de  $IB$  ligeramente superior a la de los suelos no afectados, aunque no significativa estadísticamente. No se determinaron para este trabajo valores de infiltración

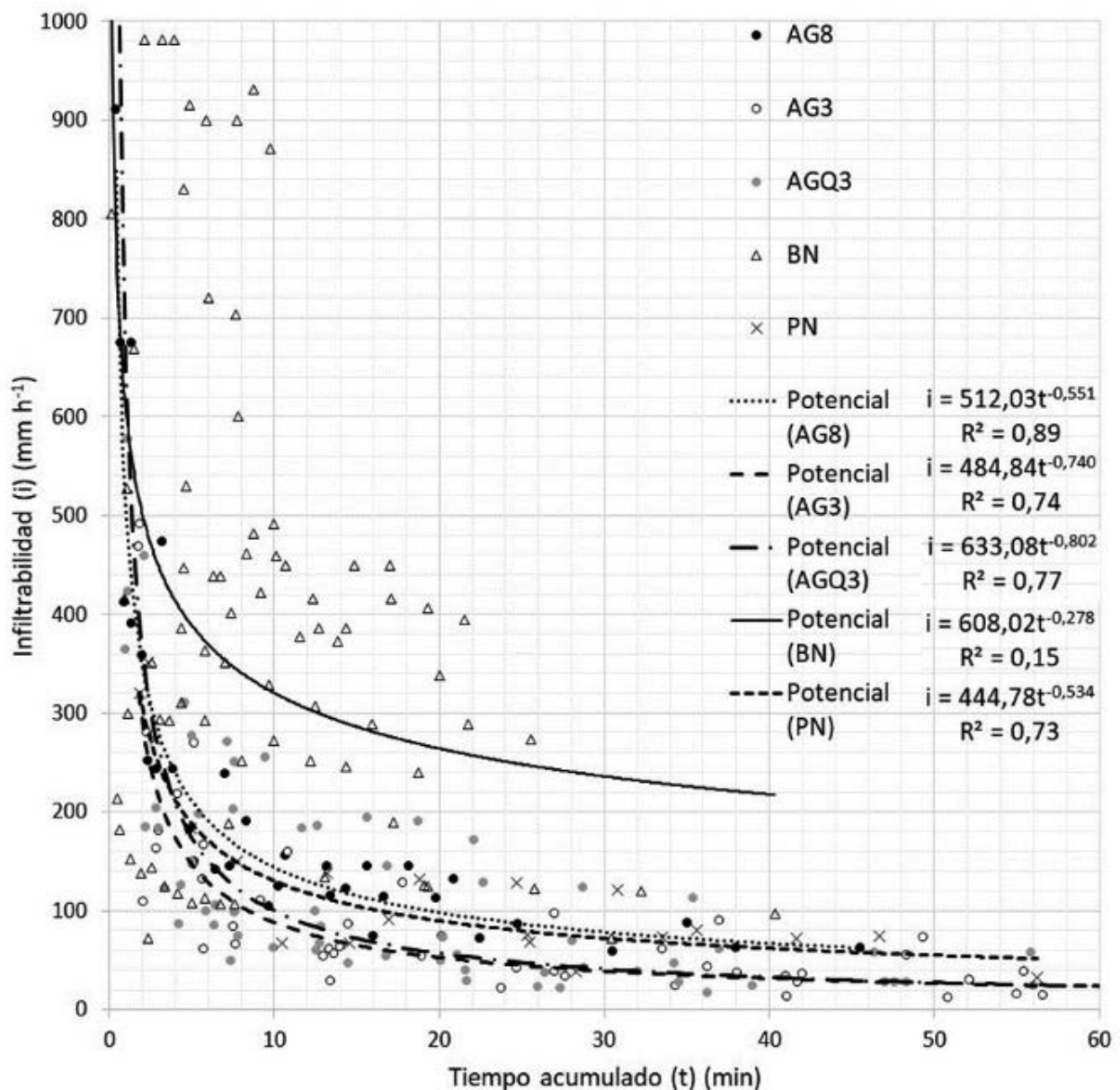
luego de las lluvias para verificar si existe algún efecto de compactación por gota de agua.

Áreas de pastizales sin historia agrícola (PN) muestran valores intermedios de  $IB$  entre AG3 y AG8, y tienen una capacidad de infiltración promedio que representa el 23 % de la de BN.

Para este orden de suelos las diferencias de movimiento lateral de agua entre tratamientos no resultaron ser significativas (LSD Fisher,  $P > 0,05$ ).

### Entisoles (azonales)

La **Figura 4** muestra las curvas de infiltración para suelos azonales, con y sin efecto de incendios forestales. Los valores de  $R^2$  de FQA y FQP resultaron ser bajos debido a valores positivos



**Figura 3:** Curvas de infiltración para Molisoles. Áreas agrícolas con ocho años de clausura (AG8); áreas agrícolas con tres años de clausura (AG3); áreas agrícolas con tres años de clausura afectados por incendios recientes (AGQ3); relictos de bosque nativo (BN); pastizal sin historia agrícola (PN).

**Figure 3:** Infiltration curves for Molisols. Agricultural areas with eight years of closure (AG8); agricultural areas with three years of closure (AG3); agricultural areas with three years of closure and affected by recent fires (AGQ3); native woodland relicts (BN); grassland without agricultural history (PN).

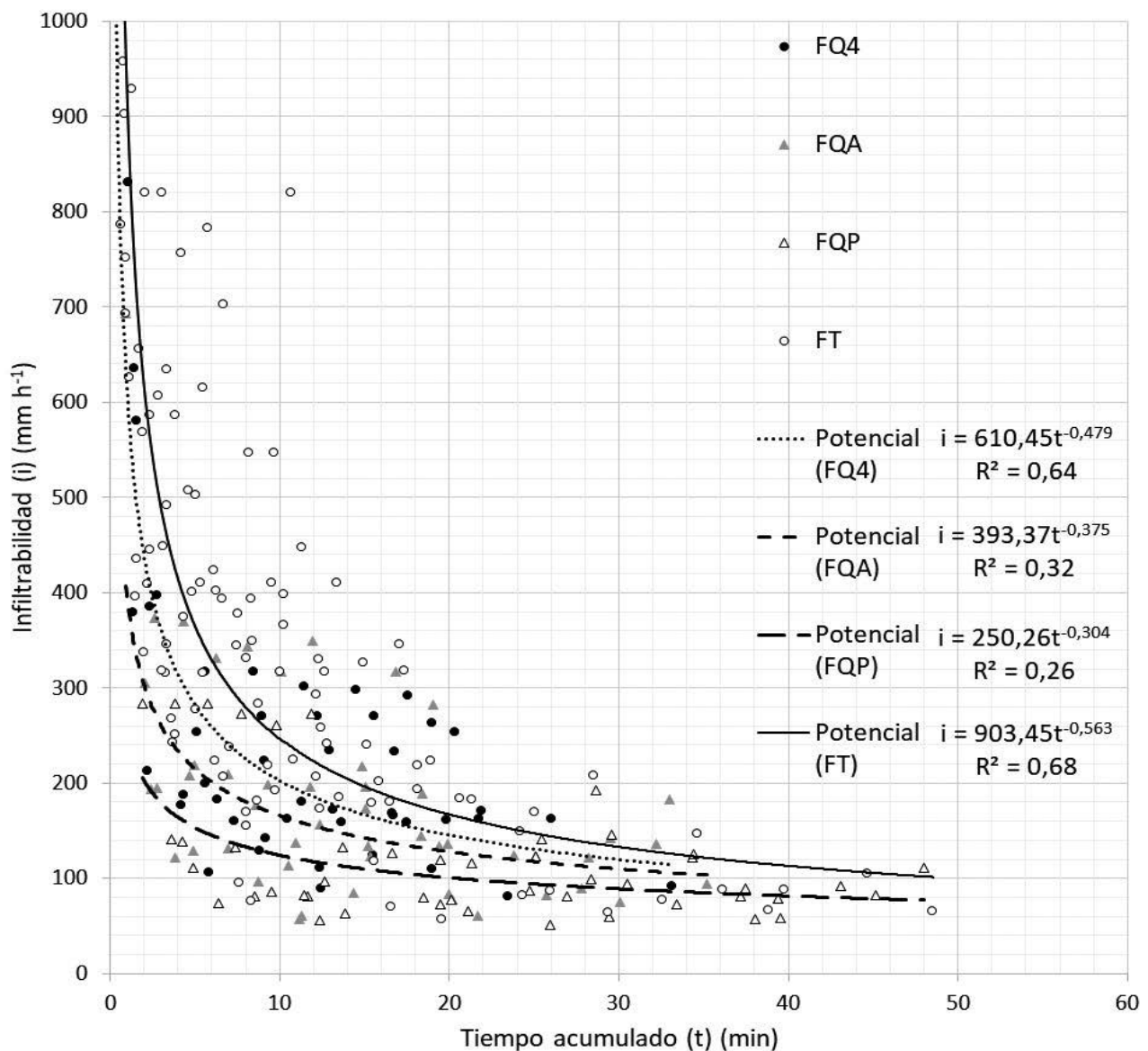
del coeficiente  $n$  de Kostiakov, obtenidos en algunos ensayos.

La **Tabla 2** y la **Figura 4** muestran mayores valores de  $I_{ini}$  e  $IB$  a mayor tiempo transcurrido desde el incendio:  $FQA$  y  $FQP < FQ4 < FT$ . Para  $I_{ini}$  existen diferencias estadísticamente significativas entre los casos de incendio recientes y aquellos de mayor antigüedad (LSD Fisher;  $F=6,24$ ;  $P=0,0016$ ). Asimismo,

se observó que se produce una disminución en la capacidad de infiltración inicial post lluvia (FQP) respecto al ante lluvia (FQA), aunque no significativa.

La  $IB$  de FT es mayor que las de FQA y FQP, siendo estas diferencias estadísticamente significativas, aunque no se observan entre FT y FQ4 o entre FQA o FQP y FQ4 (LSD Fisher;  $F=4,07$ ;  $P=0,0140$ ).





**Figura 4:** Curvas de infiltración para Entisoles (azonales). Fachinales de *Vachellia caven* y *V. aroma* sin historia reciente de incendios (FT); fachinales de *Vachellia* quemados hace cuatro años (FQ4); fachinales de *Vachellia* con historia de incendios recientes, medidos antes de la primera lluvia (FQA) y posterior a la primera lluvia (FQP).

**Figure 4:** Infiltration curves for Entisols (azonal). *Vachellia caven* and *V. aroma* woodlands without recent fire history (FT); *Vachellia* woodlands burned four years ago (FQ4); *Vachellia* woodlands with recent fires, measured before the first rainfall (FQA) and after the first rainfall (FQP).

Los valores de  $ML$  resultaron ser mayores y marginalmente significativos en los suelos recientemente quemados respecto a FQ4 pero no respecto a FT (LSD Fisher;  $F=2,97$ ;  $P=0,0452$ ).

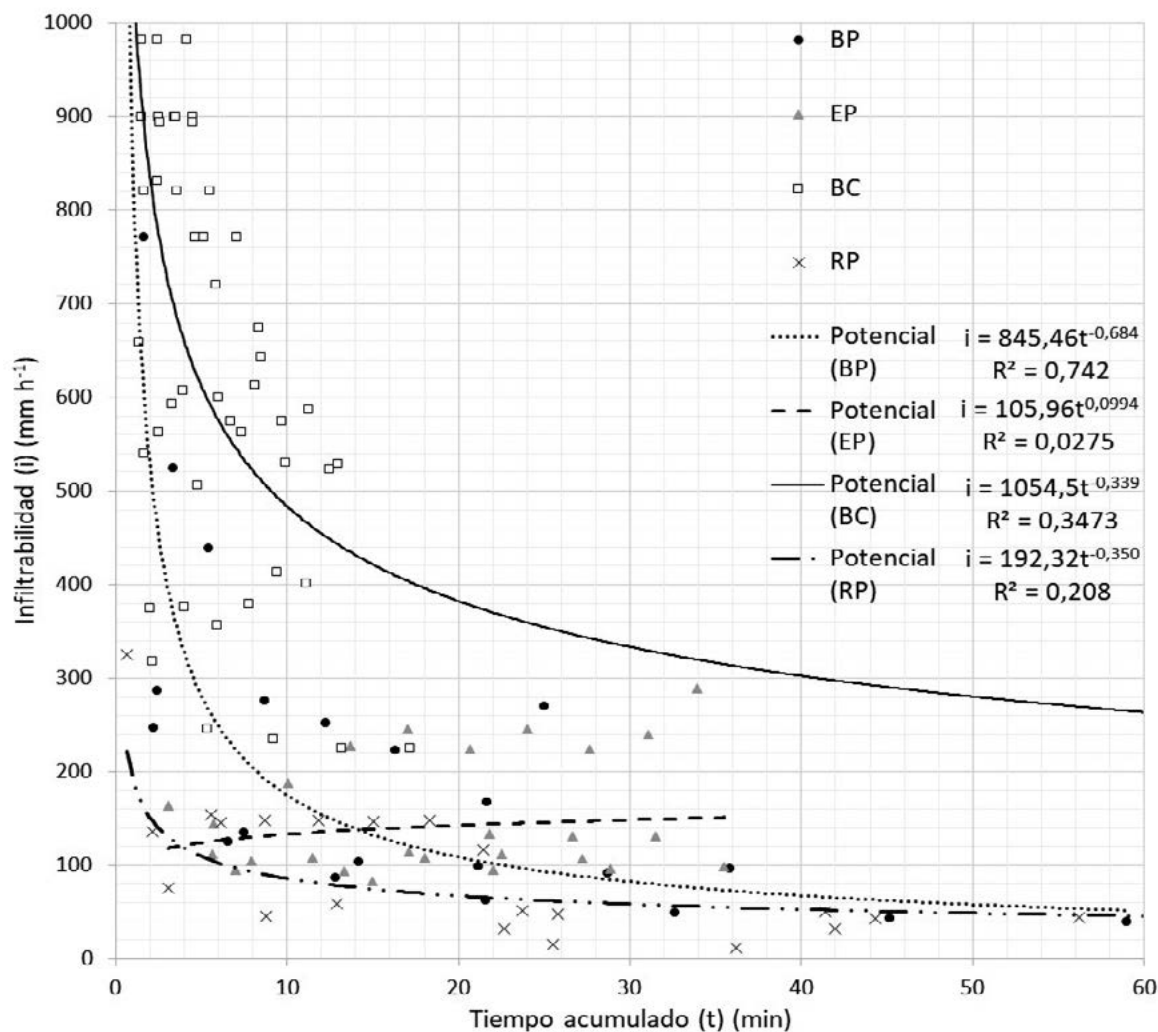
### Entisoles (intrazonales)

La **Figura 5** muestra las curvas de infiltración para suelos intrazonales. Se aprecia una notable diferenciación entre BC y el resto de los trata-

mientos. El tratamiento EP presenta un comportamiento diferente, con una curva de capacidad de infiltración creciente en el tiempo.

La variable  $I_{ini}$  fue significativamente diferente para BC respecto a EP y RP, pero no se diferenció de BP (LSD Fisher;  $F=3,91$ ;  $P=0,0272$ ).

Se aprecian valores significativamente superiores de  $IB$  para bosques bajo clausura respecto a áreas bajo pastoreo continuo (LSD Fisher;



**Figura 5:** Curvas de infiltración para Entisoles (intrazonales). Comunidades de *Sebastiania commersioniana* bajo clausura (BC); comunidades de *S. commersioniana* bajo pastoreo (BP); áreas con invasión de exóticas y bajo pastoreo (EP); áreas riparias bajo pastoreo (RP).

**Figure 5:** Infiltration curves for Entisols (intrazonal). *Sebastiania commersioniana* communities under closure (BC); *S. commersioniana* communities under grazing (BP); areas with alien species invasion and under grazing (EP); riparian areas under grazing (RP).

$F=17,14$ ;  $P<0,0001$ ). Áreas no clausuradas, sin (BP) y con invasión de exóticas (EP) presentan  $IB$  deprimidas respecto a las clausuras. Son especialmente bajas las  $IB$  en suelos de origen fluvial (Ustifluvents).

El movimiento lateral del agua no fue significativamente diferente entre tratamientos (LSD Fisher;  $F=1,91$ ;  $P=0,1667$ ).

## DISCUSIÓN

Los suelos con historia reciente de agricultura (AG3 y AGQ3) están fuertemente disminuidos en su capacidad de infiltración (tanto en relación

con  $I_{ini}$  como  $IB$ ) respecto a BN, lo que implica una mayor probabilidad de ocurrencia de escorrentía durante eventos de alta intensidad. Estos suelos topográficamente bajos, son franco-limosos (Tabla 1; Karlin *et al.*, 2018) y existen algunos sectores con pendientes superiores al 5 %, lo que los hace especialmente susceptibles a erosión, particularmente si han sido afectados por incendios y su cobertura herbácea ha sido eliminada.

Puesto que en el presente trabajo no se midieron suelos bajo actividad agrícola actual, se utilizan como referencia los valores publicados por Aoki & Sereno (2006) para Haplustoles típicos

de la Depresión Periférica bajo agricultura, obtenidos mediante simulador de lluvias, quienes informan valores promedio de  $I_{ini}$  de entre 30 y 90 mm h<sup>-1</sup> e  $IB$  entre 12 y 15 mm h<sup>-1</sup>. En comparación con los promedios obtenidos para clausuras de tres y ocho años (**Tabla 2**), se aprecia para los mismos suelos y mismas condiciones climáticas una recuperación de los valores de capacidad de infiltración ( $I_{ini}$  e  $IB$ ), siendo aproximadamente el doble para AG3 y siete veces superior en AG8. Esto podría deberse a una mejora en la estructuración del suelo por colonización de gramíneas y acción de la macrofauna del suelo, reduciendo la compactación del suelo y aumentando la conectividad de poros (Haghnazari *et al.*, 2015), aunque deberían hacerse estudios específicos para corroborar tal suposición.

Aoki & Sereno (2006) también informan valores de infiltración para bosque nativo sobre Haplustol muy inferiores respecto a los obtenidos en este estudio, con promedios de  $I_{ini}$  entre ~40 y 220 mm h<sup>-1</sup> e  $IB$  entre ~40 y 100 mm h<sup>-1</sup>, dependiendo de la humedad antecedente e intensidad de lluvia del simulador aplicado, en contraste a valores promedio de  $I_{ini}$  de ~1280 mm h<sup>-1</sup> e  $IB$  ~350 mm h<sup>-1</sup> encontrados en este estudio.

Los menores valores de capacidad de infiltración en PN respecto a sitios de bosque nativo (BN) pueden deberse al efecto de pisoteo por ganado vacuno, compactando el suelo sub-superficialmente (entre 5 y 20 cm de profundidad) y reduciendo la proporción de macroporos (Trimble & Mendel, 1995), aunque estas variables deben ser estudiadas en mayor detalle.

Respecto a los Entisoles azonales, los valores crecientes en  $IB$ , FQA y FQP < FQ4 < FT, indican una recuperación asociada al transcurso del tiempo de áreas afectadas por incendios cuando los mismos son de baja intensidad.

Los incendios reducen inmediata y considerablemente la capacidad de infiltración del suelo a poco menos que la mitad respecto a los sitios testigos (FT). Luego de la ocurrencia de lluvias, la capacidad de infiltración decae aún más, a poco más de la mitad respecto de FT, aunque la gran variabilidad espacial hace que entre FQA y FQP las diferencias no sean significativas. Las

causas probables de esta reducción respecto a FT son la combustión de la materia orgánica de los primeros centímetros de profundidad, deteriorando los agregados; el efecto de sellado por impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie desnuda en FQP; el efecto de repelencia por acumulación de material orgánico combustionado incompletamente en superficie (Martin & Moody, 2001), que no sólo reduce la  $IB$  sino que también disminuye fuertemente la  $I_{ini}$ . Son notables, en relación a esto último, los casos donde  $I_{ini}$  es menor a la  $IB$ , fenómeno que podría explicarse como un proceso de humectación lenta de los materiales hidrofóbicos que recubren las partículas del suelo y que a medida que se humectan permiten acelerar la infiltración (Vogelmann *et al.*, 2017). Una mayor hidrofobicidad provocaría una capacidad de infiltración menos uniforme en el perfil que podría compensarse mediante un incremento en el movimiento lateral a nivel de ensayo.

Los Ustifluents sufren un impacto por pisoteo más importante que los Ustortents aledaños debido a su mayor proporción de limos + arcillas (Karlin *et al.*, 2018), a su permanente saturación con agua y su mayor plasticidad (Trimble & Mendel, 1995).

Los Ustortentes líticos intrazonales bajo clausura quintuplican en sólo cuatro años la capacidad de infiltración respecto a los mismos suelos bajo efecto del pisoteo por ganado. Se ha visto en dichas clausuras una acumulación importante de mantillo, una revegetación con gramíneas y una mayor actividad de la fauna edáfica que promueve la macroporosidad, favoreciendo la capacidad de infiltración y reduciendo el movimiento lateral del agua, coincidiendo con lo encontrado por otros autores en otros ambientes semiáridos (Vandendorj *et al.*, 2016).

Las comunidades de *S. commersoniana* con y sin pastoreo difieren en su  $IB$  pero no se diferencian en  $I_{ini}$ . Esto sugiere cambios en la estructura del suelo como consecuencia de la compactación subsuperficial (5-20 cm) de los suelos bajo efecto del pastoreo (BP) (Trimble & Mendel, 1995), mientras que  $I_{ini}$  similares sugieren que la presencia del mantillo en ambos casos podría mantener condiciones de humectabilidad similares en ambos tratamientos, aunque la ausencia de pasto

en BP quizá debería reducir la porosidad. Esto debería ser mejor estudiado con otras variables.

Otro efecto a tener en cuenta son los valores crecientes de capacidad de infiltración a lo largo del tiempo de ensayo en áreas con invasión de exóticas, lo que sugiere un fenómeno similar al de los sitios afectados por incendio. Posiblemente la acumulación de material vegetal, especialmente hojas de *Morus alba* L., especie dominante en estos sitios, podría generar algún efecto retardante en el ingreso del agua en los primeros momentos de la ocurrencia de lluvias, en contradicción a lo expresado por Archer *et al.* (2015) en la introducción de este trabajo. Esto debe ser estudiado en mayor profundidad.

En términos generales y respecto al movimiento lateral del agua, si bien sólo se observan diferencias significativas en los Ustiorrents de suelos azonales, puede apreciarse que los sitios con bosque nativo, sin historia de disturbio o bajo clausura, poseen los valores promedios más bajos. Una mayor macroporosidad y conectividad de macroporos podría explicar dicho efecto (Archer *et al.*, 2015), fenómenos que enmascaran el efecto del potencial mátrico generado por la mesoporosidad, aunque esto no ha sido medido en este trabajo. Se recomiendan estudios complementarios en este sentido.

También debe destacarse la amplia variabilidad entre micrositos para las tres variables analizadas ( $I_{ini}$ ,  $IB$  y  $ML$ ). Numerosos autores destacan que la capacidad de infiltración del suelo es sumamente variable inclusive en pequeñas distancias (Benavides *et al.*, 2018; Votrubova *et al.*, 2017) y depende fundamentalmente de la microtopografía (Dunne *et al.*, 1991).

## CONCLUSIONES

En este estudio se han encontrado diferencias notables entre usos e historias de disturbio dentro de dos órdenes de suelo dominantes en el centro de Argentina.

Las actividades agrícolas, los incendios forestales, la actividad ganadera y la invasión de especies leñosas exóticas reducen considerablemente la capacidad de infiltración de los suelos en el centro de la Argentina, reduciendo la capacidad

de amortiguación en eventos de precipitación de alta intensidad.

Las curvas de infiltración y sus valores de capacidad de infiltración resultan útiles para estimaciones de otros indicadores hidrológicos para el centro de Argentina. Estos valores, junto a mapas de suelo, vegetación, uso y degradación ambiental, pueden ser utilizados como insumos para la elaboración o ajuste de modelos hidrológicos para el centro de la Argentina.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Fundación AVINA por el financiamiento efectuado al proyecto "El manejo como herramienta para la recuperación de cuencas".

## BIBLIOGRAFÍA

- Aoki, AM & R Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia* 23(1): 23-31.
- Archer, NA; W Otten; S Schmidt; AG Bengough; N Shah & M Bonell. 2015. Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate. *Ecohydrol* 9(4): 585-600.
- Baldwin, M; CE Kellogg & J Thorp. 1938. Soil classification. Bobbs-Merrill: Indianapolis, US.
- Benavides, IF; ME Solarte; V Pabón; A Ordoñez; E Beltrán; S Rosero & C Torres. 2018. The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a Páramo of southwestern Colombia. *J Soil Water Conserv* 73(4): 400-410.
- Bernasconi, J; M Karlin; R Accietto; C Schneider; S Rufini & S Arnulphi. 2015. Modelos de estados y transiciones: bases para el manejo de la vegetación en la Reserva Natural de la Defensa La Calera, Córdoba, Argentina. En: E Martínez Carretero & A Dalmaso (eds.). Restauración ecológica en la Diagonal Árida de la Argentina. Pp. 3-20. CONICET: Mendoza, Argentina.
- Cabrera, A. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. ACME: Buenos Aires, Argentina.
- Chandler, KR, CJ Stevens; A Binley & AM Keith. 2018. Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation. *Geoderma* 310: 120-127.
- Dalmaso, A; R Candia & J Llera. 1997. La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. *Multequina* 6: 85-91.

- Di Rienzo, J; F Casanoves; L González; M Tablada; C Robledo & M Balzarini. 2017. InfoStat. Software estadístico. Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina.
- Dunne, T.; W Zhang & BF Aubry. 1991. Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.* 27(9): 2271-2285.
- Godagnone, R; C Iurtia; R Holzmann & M Cuenca. 2012. Pérdidas de agua por flujo lateral en un infiltrómetro de anillo simple. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Haghnazari, F; H Shahgholi & M Feizi. 2015. Factors affecting the infiltration of agricultural soils. *Int. J. Agron. Agric. Res.* 6(5): 21-35.
- Karlin, MS.; F Ontivero; SA. Arnulphi & JR. Bernasconi Salazar. 2018. Caracterización edafológica de la Reserva Natural de la Defensa La Calera, Córdoba (Argentina). *Multequina* 27: 5-22.
- Karlin, MS; C Schneider; S Rufini; J Bernasconi; R Accietto; U Karlin & Y Ferreyra. 2014. Caracterización florística de la Reserva Natural Militar Estancia La Calera. *Nature and Conservation* 7(1): 6-18.
- Koberwein, A. 2016. Desarrollismo y contradicciones territoriales en el contexto de una crisis hídrica y ambiental en las Sierras Chicas de Córdoba, Argentina. *Cultura-Hombre-Sociedad* 26(2): 45-70.
- Lewis, JP. & MB Collantes. 1973. El Espinal Periestépico. *Ciencia e Investigación* 29: 360-377.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Elsevier: San Diego, US.
- Liu, H; TW Lei; J Zhao; CP Yuan; YT Fan & LQ Qu. 2011. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. *J Hydrol* 396(1-2): 24-32.
- MacDonald, LH & EL Huffman. 2004. Post-fire soil water repellency. *Soil Sci Soc Am J* 68(5): 1729-1734.
- Martin, DA & JA Moody. 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrol Process* 15(15): 2893-2903.
- Mwendera, EJ & MM Saleem. 1997. Infiltration rates, surface runoff, and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands. *Soil Use Manage* 13(1): 29-35.
- Osuji, GE; MA Okon; MC Chukwuma & II Nwarie. 2010. Infiltration characteristics of soils under selected land use practices in Owerri, Southeastern Nigeria. *WRJAS* 6(3): 322-326.
- Pachepsky, Y & Y Park. 2015. Saturated hydraulic conductivity of US soils grouped according to textural class and bulk density. *Soil Sci Soc Am J* 79(4): 1094-1100.
- Robichaud, PR. 2000. Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *J Hydrol* 231: 220-229.
- Rogger, M; M Agnoletti; A Alaoui; JC Bathurst; G Bodner; M Borga; V Chaplot; F Gallart; G Glatzel; J Hall; J Holden; L Holko; R Horn; A Kiss; S Kohnová; G Leitinger; B Lennartz; J Parajka; R Perdigo; S Peth; L Plavcova; JN Quinton; M Robinson; JL Salinas; A Santoro; J Szolgay; S Tron; JJ van den Akker; A Viglione & G Bloschl. 2017. Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Res* 53(7): 5209-5219.
- Rollán, AAC & OA Bachmeier. 2014. Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. *Agriscientia* 31(1): 1-10.
- Rollán, AAC; MS Karlin & OA. Bachmeier. 2004. Siembra directa y densificación subsuperficial en Molisoles del centro norte de Córdoba. *Actas XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo y II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos, Paraná, Entre Ríos, Argentina*.
- Sepúlveda, RB. 1999. El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. *Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea*. *Baética* 21: 9-33.
- Sun, D; H Yang; D Guan; M Yang; J Wu; F Yuan; C Jin; A Wang & Y Zhang. 2018. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. *Sci Total Environ* 626: 1394-1401.
- Trimble, SW & AC Mendel. 1995. The cow as a geomorphic agent - a critical review. *Geomorph* 13: 233-253.
- Vogelmann, ES; JM Reichert; J Prevedello; GO Awe & A Cerdà. 2017. Soil moisture influences sorptivity and water repellency of topsoil aggregates in native grasslands. *Geoderma* 305: 374-381.
- Votrubova, J; M Dohnal; T Vogel; M Tesar; V Jelinkova & M Cislérova. 2017. Pondered infiltration in a grid of permanent single-ring infiltrimeters: Spatial versus temporal variability. *J Hydrol Hydromech* 65(3): 244-253.