

Hidrología de los suelos de las cuencas media y baja del Río Conchos, Chihuahua, México

Oscar A. Viramontes-Olivas¹, Victor M. Reyes-Gómez^{2*}, Luís F. Escoboza-García¹, Jesús A. Román-Calleros¹, Adolfo Pérez-Márquez¹, Carmelo Pinedo-Álvarez³, Perla B. Sánchez-Fernández² y Nancy Miranda Ojeda².

¹ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León, Baja California, CP: 21705, México

² Instituto de Ecología, A.C., Centro de Investigación Sobre Sequía, Km 33.31, carretera Chihuahua-Ojinaga, Cd. Aldama, Chihuahua, CP: 32900, México.

³ Departamento de Recursos Naturales. Facultad de Zootecnia. Universidad Autónoma de Chihuahua, Periférico Francisco R. Almada Km.1, Chihuahua, CP: 31000, México.

Recibido 23 Noviembre 2007, Revisado 8 Mayo 2008, Aceptado 23 Mayo 2008

Soil hydrology at the Conchos River middle and low watersheds, Chihuahua, Mexico

Abstract

The relation between rainfall – runoff – infiltration – soil - vegetation has been used to understand quantitatively the hydrologic role of superficial soil in hydrosystems. In this study, the hydrodynamic aptitude and hydraulic conductivity (K_s) of representative soils were determined, in three sites of the Conchos River basin: Río Chico (middle watershed); The Morrión and El Pueblito, in the lower. Two *on site* techniques were used (Rainfall simulation and the Beerkan method), evaluating the initial humectation of soil in presence of vegetation and without it. The infiltration coefficient on the three sites (Initial dry status of soil) was similar by simulated rainfall (59%), on the other side by Beerkan, the highest infiltration sheet (> 0.1 m) was on Río Chico and 0.01 to 0.1 for the lower part. With rainfall simulation, the K_s on dry soil was similar in all the areas, different from Beerkan, where El Pueblito, had the highest infiltration rate ($K_s < 1.5E-05$ m s⁻¹); followed by El Morrión, ($K_s = 5.0E-05$ m s⁻¹), reflecting medium infiltration and runoff aptitudes; different from Río Chico, where ($K_s > 4.0E-04$ ms⁻¹), allowing to visualize on a punctual scale an hydrological function of the system with a descending gradient, explained in the soil – vegetation relationship (middle watershed) where infiltration and runoff can be similar; not as well on the lower part, where the infiltration is minimal with a higher runoff.

Keywords: Soil hydrology, hydrological function, Conchos River, infiltration, runoff, rainfall.

Resumen

Para contribuir en la conservación ecológica de la cuenca del río Conchos, es primordial conocer el funcionamiento hidrológico a través del estudio de las relaciones lluvia-escorrentía-infiltración-suelo-vegetación. En este trabajo, se determinaron las aptitudes hidrodinámicas y la conductividad hidráulica (K_s) de suelos representativos en tres sitios de la cuenca del río Conchos: Río Chico (cuenca media); El Morrión y El Pueblito, en la baja. Se emplearon dos técnicas in situ (simulación de lluvia y el método de Beerkan), evaluando la humectación inicial del suelo en presencia de vegetación y sin ella. El coeficiente de infiltración en los tres sitios (estado seco inicial del suelo) fue similar por lluvia simulada (59 %), en cambio por Beerkan, la lámina mayor de infiltración fue en Río Chico > 0.1 m, y, para la parte baja de 0.01 a 0.1 m. Con simulación de lluvia, la K_s en suelo seco fue similar en todas las áreas a diferencia de Beerkan, donde El Pueblito, tuvo la menor tasa de infiltración ($K_s < 1.5E-05$ m s⁻¹); seguido del Morrión ($K_s = 5.0E-05$ m s⁻¹) reflejando aptitudes medias de infiltración y escurrimiento; a diferencia de Río Chico, donde ($K_s > 4.0E-04$ ms⁻¹), permitiendo visualizar a escala puntual un funcionamiento hidrológico del sistema con un gradiente descendente, explicado en la relación suelo-vegetación (cuenca media) donde la infiltración y el escurrimiento pueden ser similares; no así en la parte baja, donde la infiltración es mínima con un mayor escurrimiento.

Palabras clave: Hidrología de suelos, funciones hidrológicas, río Conchos, lluvia, infiltración, escurrimiento.

* Autor para correspondencia

E-mail: victor.reyes@inecol.edu.mx; Tels: +52(614) 459 60 18; +52(614) 459 60 22, ext. 106.

Introducción

La sustentabilidad de los ecosistemas áridos y semiáridos depende de la disponibilidad de agua, debido a que muchos procesos que intervienen en el flujo de energía en esos ecosistemas, se llevan a cabo en asociación con el agua. Las entradas y salidas de agua en las cuencas deben mantenerse en equilibrio para asegurar una dinámica permanente de los ciclos biogeoquímicos que permiten la vida en tales ambientes. El agua, al entrar a las cuencas en forma de lluvia, escurrimiento, infiltración o evapotranspiración funciona como medio de transporte de nutrientes que intervienen en la cadena alimenticia que conforman los ecosistemas (Canales e Islas, 2005; Álvarez-Cobelas y Angeler, 2007; Herrera Carbajal et al., 2007). Un ejemplo de ello, es la cuenca del río Conchos (68,387 km²) que representa la principal fuente de agua para las diferentes actividades agropecuarias, urbanas e industriales en el estado de Chihuahua, su principal río, cruza gran parte de la entidad, desde la Sierra Tarahumara hasta el río Bravo en el municipio de Ojinaga (CNA, 2001). Actualmente, enfrenta una problemática compleja debido a diversas acciones antropogénicas como la deforestación (cuenca alta); el sobre-pastoreo (cuenca media); sobreexplotación de acuíferos (cuenca baja); contaminación y cambios de uso del suelo en toda la rivera del Conchos; en este sentido, es importante conocer la función hidrodinámica del suelo presente en ésta, con el fin de contribuir en el manejo y mejoramiento de la misma (Miranda-Ojeda, 2006).

Varios autores mencionan que la superficie del suelo, determina la relación lluvia-escurrimiento-infiltración-suelo-vegetación (Reyes-Gómez, 2005; Cassenave y Valentín, 1988); se apoyan en métodos clásicos como el aforo de cuencas, parcelas de escurrimiento (*Es*) y erosión, para probar la hipótesis del efecto de dichos estados sobre la interfase especificada. Otros procedimientos prácticos y menos costosos, como la lluvia simulada y la infiltración (*In*) controlada, han sido utilizados para determinar las propiedades hidráulicas del suelo *in situ*, conocidos como *In* con carga constante de agua. Martínez-Mena et al. (2001) y Alcalá de Jesús et al. (1998) han utilizado

la simulación de lluvia para caracterizar la hidrodinámica del suelo superficial y evaluar el efecto de las precipitaciones y láminas de riego sin tener que esperar la lluvia natural, con la ventaja de aplicarlas *in situ* en condiciones de campo como se presenta en la naturaleza. De Condapa (2000) constató, que otro método como el de Beerkan, permite medir la velocidad de infiltración *in situ* a través del tiempo, ayudando a determinar el valor de la conductividad hidráulica (*Ks*) del suelo, propiedad ampliamente utilizada como indicadora de la capacidad de transmisión del agua en medios porosos del subsuelo (Findeling, 2001).

En este estudio, se planteó constatar la hipótesis de que puesto que la interrelación entre lluvia-estado de la superficie del suelo-infiltración-escurrimiento refleja la función hidrológica de un suelo, la conductividad hidráulica (permeabilidad) del suelo debe visualizar entonces los servicios hidrológico-ambientales de los primeros centímetros del suelo. Los objetivos del presente estudio, fueron: determinar la capacidad de infiltración y escurrimiento del suelo en la cuenca media y baja del río Conchos, mediante simulación de lluvia y conocer el valor de la conductividad hidráulica del suelo para conocer el papel del suelo y la vegetación en los procesos de infiltración y escurrimiento en zonas áridas y semiáridas del norte de México.

Material y métodos

Área de estudio

La cuenca del río Conchos, ubicada en el estado de Chihuahua (Norte de México), se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24 Río Bravo-Conchos (CNA, 2001) con 68,387 km² (Carreón et al., 2001; Fig. 1). El río Conchos es tributario del río Bravo y su cuenca ocupa un 14 % del área total, presenta un desnivel altitudinal que oscila de 2,348 msnm en su cabecera a 841 msnm al unirse al río Bravo. Su longitud es de alrededor de 850 km y presenta una amplia diversidad de dominios climáticos: templado en la parte alta, semiárido en la media y árido en la baja (Aboites-Aguilar, 2002). Desde el punto de vista fisiográfico la cuenca alta pertenece a la zona montañosa; la media al altiplano o valles centrales; y la cuenca baja, a la región árida

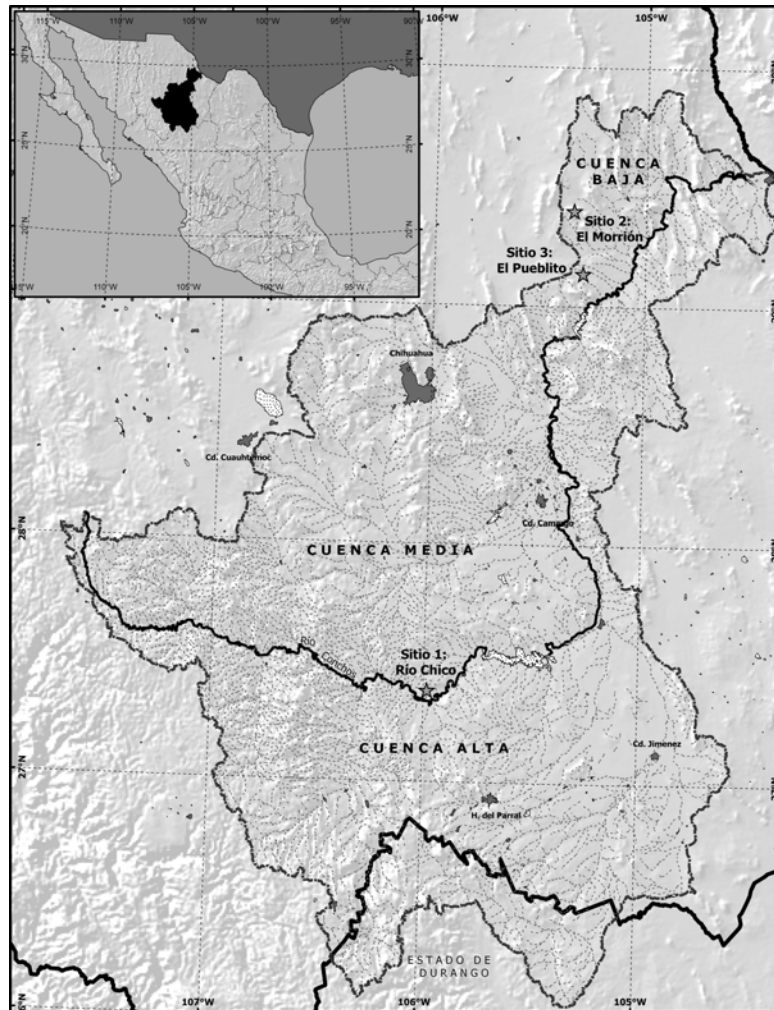


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio en la cuenca media y baja del río Conchos, Chihuahua.

(INEGI, 1988). La vegetación dominante en la parte media es pastizal amacollado abierto, con presencia de un estrato arbóreo compuesto principalmente de huisaches (*Acacia farnesiana*), los pastos más abundantes son el zacate borreguero (*Tridens pulchellus*), el navajita (*Bouteloua gracilis*), el banderita (*Bouteloua curtipendula*) y el tempranero (*Setaria macrostachya*). En la parte baja, la vegetación dominante es de tipo matorral xerófilo y espinoso, donde sobresalen el huisache (*Acacia spp.*) y la gobernadora (*Larrea tridentata*), existen zonas recubiertas por arbustos de Mariola

(*Parteniun incanum*), sangre de drago (*Jatropha dioica*), magueyes y lechuguilla (*Agave lechuguilla*), ocotillo (*Fouquieria splendens*) y algunas franjas de sotol y cactáceas como el nopal rastrero (*Opuntia rastrera*).

El estudio se llevó a cabo en 3 sitios experimentales (Fig. 1): Río Chico, en la cuenca media, con áreas de pastizal utilizadas para ganadería extensiva y dominado por lomas de conglomerados del Terciario y suelos de tipo Regosol, Phaeozem y Cambisol (FAO, 1988); El Morrión y El Pueblito, ambos en la parte baja con

matorrales xerófilo y espinoso, el primero sobre una zona de piedemonte con afloramientos de calizas del Cretácico y el segundo sobre lomeríos de conglomerados y suelos Cuaternarios (INEGI, 1988)

Características físicas y químicas de los suelos

En cada sitio de estudio, se tomaron muestras de 5 kg de suelo para estimar contenidos de arena, limo y arcilla por el método de Boyoucos para clasificar texturalmente la cubierta edafológica. Se obtuvo la curva granulométrica de ocho fracciones (método de la pipeta) para el cálculo de los parámetros de forma requeridos en la estimación de K_s . A cada muestra de suelo, se le determinó la humedad de capacidad de campo, la humedad del punto de marchitez permanente; contenidos de K, Na, Mg, nitratos, pH, Conductividad eléctrica y materia orgánica y carbonatos.

Las densidades aparente y real, se determinaron en laboratorio por el método de volumen de desplazamiento y del picnómetro respectivamente. A partir de los valores de densidades, se empleó la siguiente relación para el cálculo del porcentaje de poros (porosidad total):

$$P = 100 (1 - D_a/D_r) \quad (1)$$

Donde P, es el porcentaje de poros en el suelo, de un horizonte considerado; (D_a/D_r), la densidad aparente y real en mg de suelo en 1 m^3 , respectivamente y $(1 - D_a/D_r)$, es el volumen de poros en 1 m^3 de terreno.

Estado de la superficie

La superficie del suelo y los elementos que la constituyen se describieron según criterios de Cassenave y Valentín (1989) que contemplan cobertura vegetal basal y aérea, materia orgánica muerta, tipos de costras presentes en el suelo y fragmentos de roca, grava y arena. Los elementos que recubren la superficie del suelo, se cuantificaron con el programa "TRIO" (Nuñez-López, 1995) que estima porcentajes de vegetación, mantillo, suelo encostrado, grava, arena, roca, sobre imágenes de fotos de toma vertical en cada parcela.

Variables hidrológicas de los suelos

Coefficientes de escurrimiento e infiltración: Con un simulador de lluvia, tipo aspersor (Casenave y Valentin, 1989) versión cabeza electrónica (Deltalab ref: EID 340), en los tres sitios de estudio, se aplicaron lluvias simuladas en una superficie cuadrangular (parcela experimental) de 1 m^2 en su interior. Sobre una matriz de seis parcelas, se aplicaron dos lluvias con intensidad constante de 60 mm h^{-1} (6 x 2 repeticiones), hasta obtener un mínimo de 10 lecturas, bajo régimen permanente de escurrimiento o al menos 35 min de duración del evento. Con estas lluvias, se evaluó el efecto del estado inicial de humectación del suelo (seco y saturación aparente); la segunda lluvia, se aplicó 30 min después sobre el mismo suelo, dando oportunidad que el agua de gravedad y encharcamiento se infiltre más allá de 15 cm de suelo y se obtenga la condición de saturación aparente de los primeros 10 cm de suelo. El dispositivo, permite medir lámina de lluvia aplicada; volumen de escurrimiento producido y por diferencia, se calcula lámina de infiltración; con dichos componentes, se estima la aptitud del suelo para producir escurrimiento e infiltración (Reyes-Gómez, 2005).

Conductividad hidráulica (K_s) por simulación

de lluvia: El valor de la K_s con este método, se estimó a partir de hidrográmas de escurrimiento generados durante la aplicación de cada lluvia. Cualitativamente, los hidrográmas permiten visualizar un régimen permanente de escurrimiento, donde el agua infiltrada no varía en función del tiempo, es decir, el suelo alcanza su equilibrio hidrodinámico (Asseline y Valentin, 1978). En esta fase de régimen permanente, se obtiene la media de intensidad de infiltración y se acepta el supuesto de que el suelo está completamente saturado; por tanto, el valor de la tasa de infiltración bajo ese régimen, representa el valor de K_s en condiciones de lluvia (Delhoume, 1997).

Conductividad hidráulica (K_s) a través de la infiltración por el método de Beerkan:

Con un cilindro insertado en el suelo, se determinaron curvas de infiltración en función del tiempo para obtener el valor de K_s , realizándose 15 repeticiones

en cada sitio. Este método aplicado en campo, considera el planteamiento matemático de relacionar la In determinada por Beerkan para estimar el valor de Ks , según el modelo de Brooks y Corey (1964). Se eligió este método, dada la simplicidad de aplicación en campo, debido a que el proceso de infiltración se presenta en condiciones naturales; se utiliza para obtener de forma inversa, los parámetros de adimensionalización invariante de la infiltración (Haverkamp et al., 1994; De Condapa, 2000; Reyes-Gómez et al., 2007).

Principios físicos del método de Beerkan: A partir de las curvas explicadas en el párrafo anterior, se realizó un ajuste inverso para obtener los parámetros de adimensionalización (α_t y α_{IN}) de la infiltración mediante la ley analítica del proceso de infiltración (Reyes-Gómez et al., 2007):

$$\alpha_{IN} IN = \alpha_t t + \ln(1 + \alpha_{IN} IN) \quad (2)$$

Donde α_t y α_{IN} son parámetros de forma en las

curvas de infiltración, correspondientes a tiempo y lámina de infiltración ajustados a los valores adquiridos en campo, (s^{-1} , m^{-1} , respectivamente); IN la infiltración acumulada durante el experimento (mm), t el tiempo transcurrido del experimento (s). Este ajuste se realizó con la opción Solver en Excel, obteniéndose los valores de forma de la curva de infiltración acumulada adimensional e invariante, utilizándose el método del mínimo error cuadrático. Una segunda fase del método Beerkan, consistió en determinar el valor de η que representa el parámetro de forma de la curva de Ks del modelo de Brooks y Corey (1964) adquirido del producto de mn de los parámetros de la curva granulométrica de partículas de suelo por analogía con la curva de retención de humedad de Van Genuchten (1980). Con los valores de η , α_{IN} y α_t , se determina el valor de la Ks con una seguridad de cubrir los mínimos requerimientos físicos y matemáticos para una amplia gama de tipos de suelos. La relación resultante de la combinación del modelo de infiltración y el de Brooks y Corey (1964) esta dada por:

Tabla 1. Promedios ($n = 3$) de las características físicas y químicas de los suelos estudiados. CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente.

	Río Chico	El Morrión	El Pueblito
Químicas:			
Conductividad ($mhos\ cm^{-1}$)	0.51	0.98	0.51
pH	6.09	7.70	7.67
MO (%)	0.98	1.48	0.54
K ($mg\ l^{-1}$)	245.80	212.50	133.33
Mg ($mg\ l^{-1}$)	183.30	108.33	100.00
Na ($mg\ l^{-1}$)	154.17	295.83	275.00
Nitratos ($kg\ ha^{-1}$)	310.63	361.25	380.00
Ca ($mg\ l^{-1}$)	1095.83	7850.00	5308.33
Físicas:			
Densidad aparente ($mg\ l^{-1}$)	1.00	0.91	1.14
Densidad real ($mg\ l^{-1}$)	2.21	2.14	2.30
Humedad a CC (%)	7.56	9.83	6.91
Humedad a PMP (%)	4.50	5.85	4.13
Porosidad Total (%)	54.61	57.50	50.51
% Arena	73.81	65.81	70.48
% Limo	7.48	12.82	10.82
% Arcilla	18.70	21.37	18.70

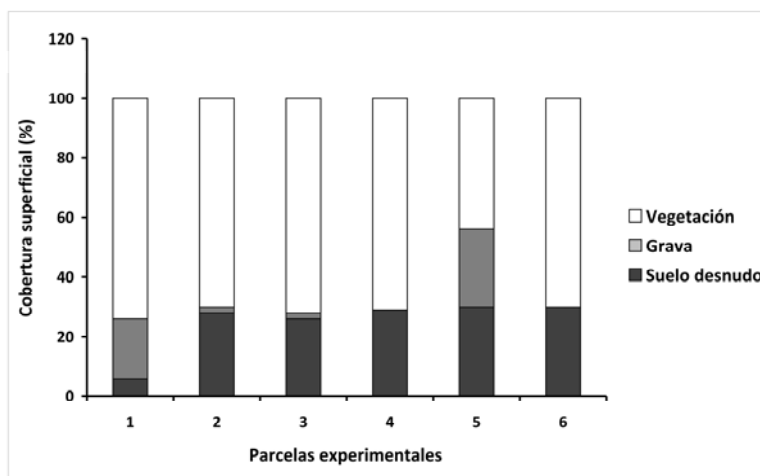


Figura 2. Estados de superficie de los suelos muestreados en la cuenca media y baja del río Conchos.

$$K_s = \frac{\alpha_t}{\alpha_{IN}} \left[1 - \left(\frac{\theta_o}{\theta_s} \right)^\eta \right]^{-1} \quad (3)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica ($m s^{-1}$), θ_o y θ_s , son respectivamente las humedades inicial y a saturación ($m m^{-3}$), la primera, estimada en campo y la segunda, mediante determinación de porosidad total (Haverkamp et al., 1990).

Análisis estadísticos

Se calcularon medidas de tendencia central para determinar el coeficiente promedio de infiltración y escurrimiento; desviación estándar y coeficiente de variación, para analizar variabilidad de valores medios. Para propiedades hidráulicas, se calcularon valores α_t y α_{IN} en el proceso de infiltración *in situ*, con ajustes de regresión logarítmica (Reyes-Gómez, 2002). Por último, se reagruparon sitios con similar comportamiento hidrológico para probar la hipótesis del efecto de la interfase lluvia-estados de superficie-vegetación-escurrimiento-infiltración, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) en el programa SAS® (User's Guide, 1985) con el siguiente grupo de variables: coeficientes de escurrimiento e infiltración en suelo seco y húmedo; conductividad hidráulica a saturación, estimada por simulación de lluvia,

Beerkan y en laboratorio; porcentajes de estados de superficie como vegetación, mantillo, costras, gravas, pedregosidad; parámetros de superficie (pendiente y contenido de arcilla, limo y arena, rugosidad y tortuosidad) y humedad de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Resultados y discusión

Características físicas y químicas de los suelos

La Tabla 1 muestra los valores promedio de las principales características analíticas del suelo en los sitios de estudio. El Morrión y El Pueblito, presentaron valores de pH superiores a 7 y altos contenidos de carbonatos y nitratos, lo que les proporciona un grado mayor de salinidad, con relación al sitio Río Chico, donde el pH es ligeramente ácido. Los porcentajes mayores de materia orgánica (MO) en el suelo, fueron: El Morrión y Río Chico (1.48 % y 0.98%, respectivamente); el valor mínimo fue en El Pueblito con 0.54 %. Estas diferencias de calidad orgánica, se dan principalmente a que en Río Chico y El Morrión, se observa actividad ganadera permanente, lo que permite aporte de MO por excremento, en contraste, la MO presente en El Pueblito, pareciera estar ligada exclusivamente a los procesos naturales de la descomposición de la materia proveniente del reciclado natural de la

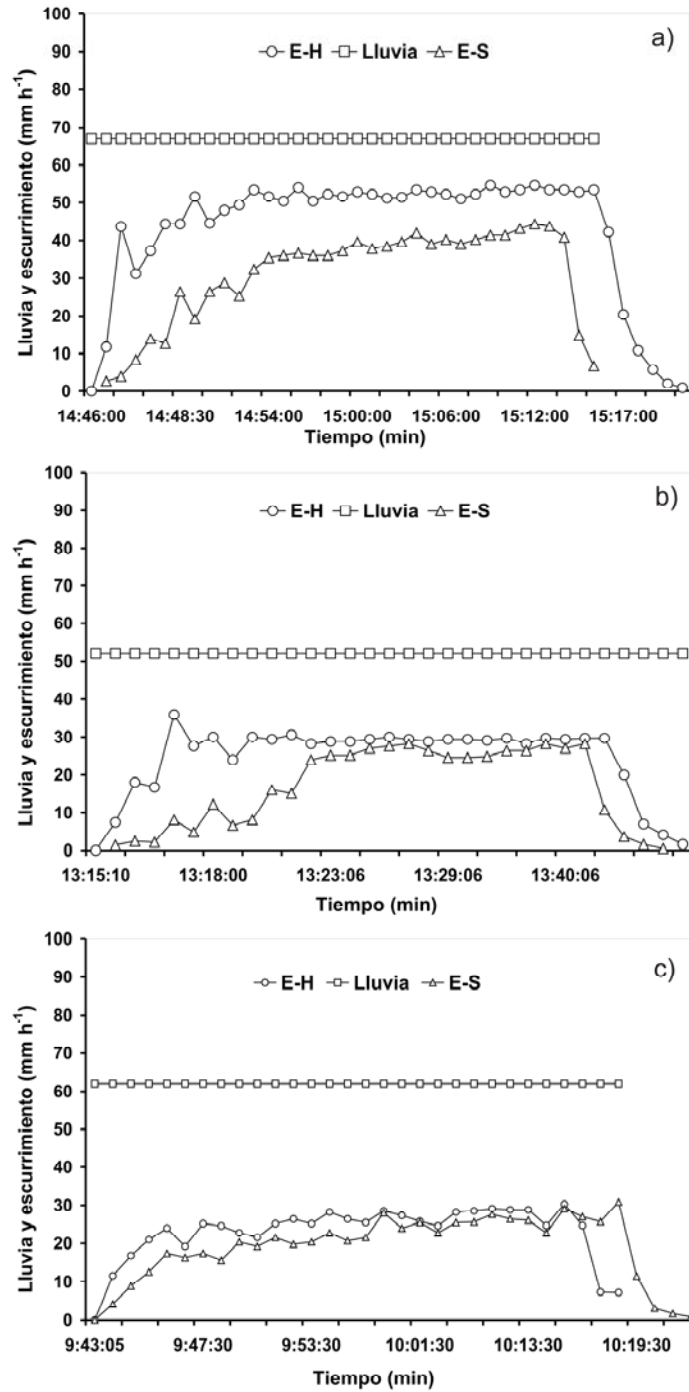


Figura 3. Ejemplos de hidrogramas de escurrimiento obtenidos en los ensayos de simulación de lluvia (E-S = Escurrimiento en suelo seco; E-H = Escurrimiento en suelo húmedo) realizados en: (a) Río Chico, (b) El Morrión y (c) El Pueblito.

vegetación y fauna, presentes en la zona.

Las características físicas del suelo, permitieron apreciar pocas diferencias en la densidad aparente (D_a) y real (D_s) (Tabla 1); en cambio, la humedad de capacidad de campo (H_{cc}) presentó mayor valor de aceptación de agua en El Morrión y menor en El Pueblito ($H_{cc} = 10$ y 7 , respectivamente); de igual manera, la humedad de punto de marchitez permanente (H_{pmp}) fue mayor en El Morrión (6%), mientras que en los sitios 1 y 3 osciló entre 4.1 y 4.5% , respectivamente. Los bajos valores reflejados en H_{cc} y H_{pmp} , permiten apreciar los reducidos contenidos de humedad disponible en el suelo para ser utilizada sin adaptaciones fisiológicas, característica de las plantas xerófilas, especies vasculares que tienen una posibilidad corta de vida, en la que la oferta evapotranspirativa está cubierta por presencia de humedad disponible, entre los meses de julio y octubre (Cornet, 1988; Montaña et al., 1995).

Estados de la superficie de los suelos

En la Fig. 2 se muestran los resultados del estado de la superficie de los suelos estudiados. En Río Chico, predomina el pastizal con cobertura de 74% ; EL Morrión y El Pueblito, presentaron 78% y 96% de grava y suelo encostrado respectivamente, donde el mantillo y la vegetación son poco representativos. Las diferencias que existen de mayor vegetación en la cuenca media y una cobertura superior de elementos gruesos en la parte baja, coinciden con los resultados obtenidos por otros autores, donde la presencia de suelo encostrado y sin vegetación, predominan en partes bajas y zonas de playa en el ecosistema del desierto Chihuahuense (Desconnets, 1992; Reyes-Gómez et al., 1996; Delhoume, 1997).

Hidrología de los suelos

Los hidrográmas clásicos de E_s obtenidos por simulación de lluvia, se ilustran en la Fig. 3, concuerdan con otras investigaciones donde se muestra la presencia de una fase de régimen permanente (parte plana de la curva) que indica el equilibrio hidrodinámico del suelo y la etapa donde se adquiere el valor de K_s por este método (Tarin-Torres, 1992; Alcalá de Jesús et al., 1998). La intensidad de escurrimiento, siempre fue mayor

para el estado húmedo del suelo (Curvas E-H, Fig. 3).

La infiltración en suelo inicialmente seco, fue similar en los tres sitios (aproximadamente 60%), mientras que en estado húmedo, disminuyó 20% en la parte media (Río Chico); 15% en El Morrión y 10% en El Pueblito (parte baja) (Fig. 4). La fracción de lluvia infiltrada, fue menor en parcelas húmedas con respecto a aquellas con suelo seco; algo lógico, si se considera que el suelo está saturado. (Hilliel, 1980) indica, que el espacio de porosidad a remplazar con agua es menor, propiciando que cuando una nueva lluvia se presenta en esa condiciones de saturación, la infiltración se minimiza, generándose mayor escurrimiento (Fig. 4) coincidiendo con los trabajos hechos por Alcalá de Jesús et al. (1998) y Desconnets (1992). Con éstos resultados de simulación de lluvia, se observó que la cuenca media del río Conchos, presento una aptitud ligeramente superior a la parte baja, para producir escurrimientos cuando el suelo está húmedo, esto debido al efecto de pendiente de sitio ($>5\%$), a diferencia de la inclinación del terreno en la parte baja (pendientes menores a 3%). Se encontró que los suelos de la cuenca media y baja, tienen un papel hidrológico ambiental definido: dejar infiltrar entre 35 y 45% de agua al subsuelo (recarga) y, como zonas productoras de escurrimiento que generalmente se almacena en represas que conforman las 11 celdas hidrológicas del hidrosistema de la cuenca del río Conchos (Nelly, 2001). Esto contrasta con los resultados encontrados en la parte alta, donde se constató que la función primordial del suelo es la de recarga (infiltraciones de más de 60%) y escurrimientos menores de 40% (Reyes-Gómez et al., 2007).

En la Fig. 5 se ilustran las curvas de evolución de la infiltración obtenida *in situ* por el método de Beerkan en los tres sitios. Las líneas continuas, representan el ajuste que sirvió para evaluar los parámetros que ligan la ecuación clásica de infiltración con el método de Brooks y Corey (1964) para estimar K_s . La infiltración máxima final acumulada, fue mayor en Río Chico ($>$ de 0.1 m en 3000 seg); en El Morrión y El Pueblito, fue alrededor de 0.1 m. Observando las curvas de I_n en los tres sitios, se distinguen dos fases importantes:

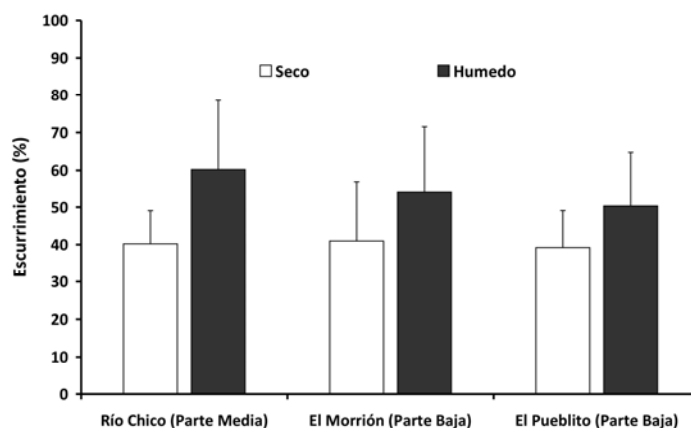


Figura 4. Coeficientes de escurrimiento (\pm desviación estándar) en suelo seco y húmedo en las tres zonas de estudio de la cuenca del Río Conchos.

la primera, es una *In* básica fuerte, que significó una absorción de agua que puede representar la fase de sortividad (agua que se infiltra sin efecto gravitacional); la segunda, que ilustra una fase de *In* que puede corresponder a la *Ks* a saturación. Considerando las tres o cuatro líneas sólidas de las curvas de *In* que representan los promedios de 5 o 6 cilindros que reflejaron una evolución similar en la *In*; se puede apreciar, que existen extremos (máximos y mínimos) y una curva media que representan valores promedio en cada sitio. Las curvas sólidas, muestran que sitios de pastizal como Río Chico, tienen valores acumulados máximos de *In* en fase final que superan a 0.15 m (Fig. 5b); le sigue El Morrión, con 0.1 m (Fig. 5b), observándose un valor cercano a 0.1m en El Pueblito (Fig. 5c). Este comportamiento, se observa con mayor claridad en las curvas del extremo mínimo, donde los valores en orden descendente son 0.1 m para Río Chico, 0.016 m para El Morrión y 0.012 para El Pueblito. Los resultados, permitieron distinguir la importancia de la vegetación para propiciar mayor *In* de agua, utilizada abundantemente por plantas que sustentan a los suelos en la cuenca media; contrariamente, lo encontrado permite ver la aptitud edáfica en la parte baja para generar escurrimientos que son interceptados pendiente abajo por las depresiones del relieve en las planicies que finalmente, son aprovechados por los mosaicos de vegetación tan

particular en la cuenca baja del río Conchos como las zonas de manchas y arcos de vegetación atigrada (Reyes-Gómez, 2005). Este comportamiento hidrológico del suelo superficial de la cuenca, coincide con la mayoría de los estudios realizados en otras zonas áridas y semiáridas del mundo y de México (Awadhwal y Thierstein, 1985; Belnap *et al.* 2001), donde la infiltración se puede reducir cuando el suelo está encostrado o es cambiado su uso y abandonado al efecto de la cinética de las gotas de lluvia (erosión, compactación y reorganización estructural del primer horizonte). Este proceso hídrico-edafológico, produce la génesis de superficies encostradas con propiedades hidrodinámicas especiales que impiden, hasta cierto grado, el paso del agua hacia horizontes más profundos y por ende una mayor producción de escurrimiento (Casenave y Valentin, 1989).

Los valores promedios de *Ks* obtenidos por el método de lluvia simulada se presentan en la Fig. 6 donde se aprecian pocas diferencias entre los sitios. Los valores de *Ks* en condiciones de lluvia, reflejan bajas aptitudes para dejar pasar agua dentro del suelo, probablemente, porque con este método, el agua que se logra almacenar en la superficie no se acumula, sino que escurre en sentido de la pendiente, produciéndose una menor tasa de infiltración. Una prueba de ANOVA para el total de valores de *Ks* y tres tipos de superficie de suelo

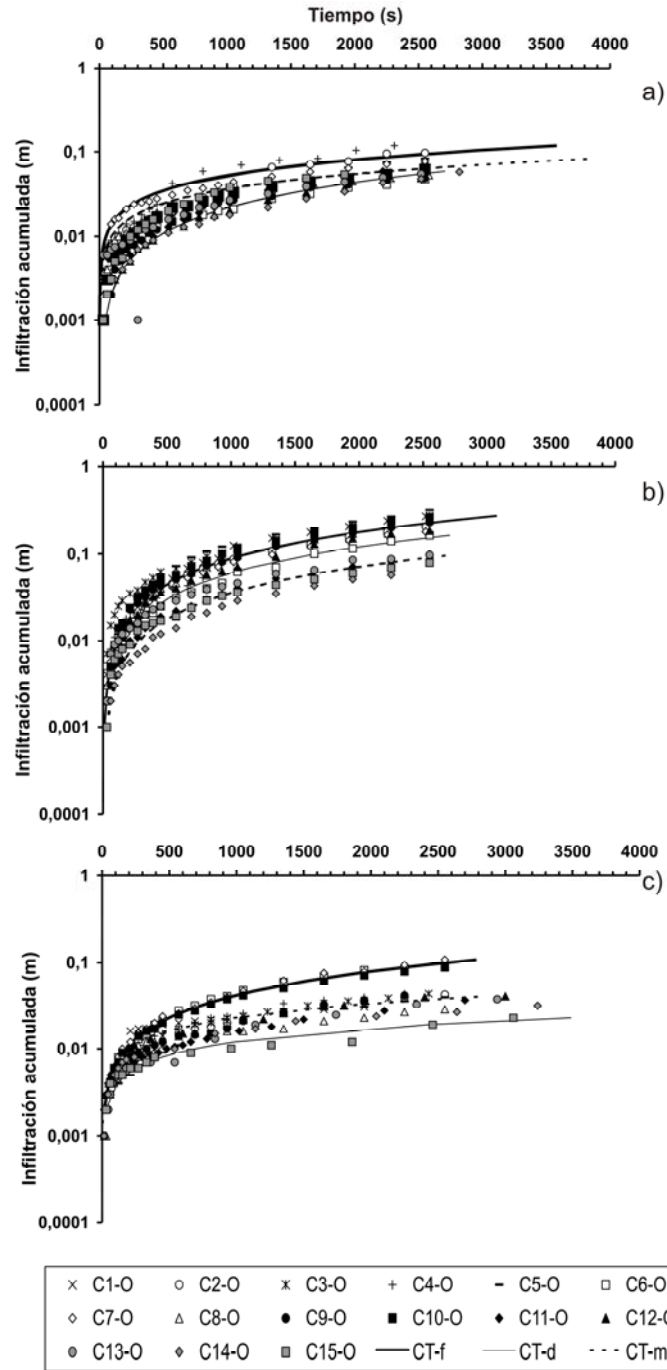


Figura 5. Curvas de infiltración obtenidas por el método Beerkan en los suelos de la cuenca media y baja del Río Conchos. a: Sitio El Morrión, b: Sitio Río Chico, c: Sitio El Pueblito. (C1 – C15, número de cilindro o repetición; CT-d = curva de ajuste para valores débiles, CT-f= curva de ajuste para valores fuertes; Ct-m, curva de ajuste para valores medios).

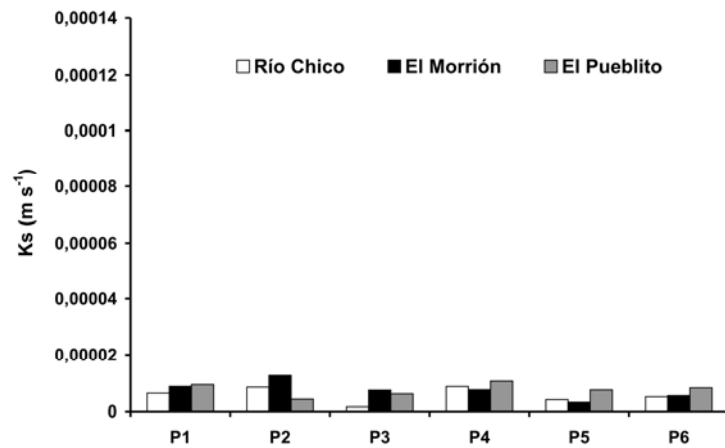


Figura 6. Conductividades hidráulicas (Ks) para los tres sitios de estudio de la cuenca del Río Conchos obtenidas con ensayos de lluvia simulada.

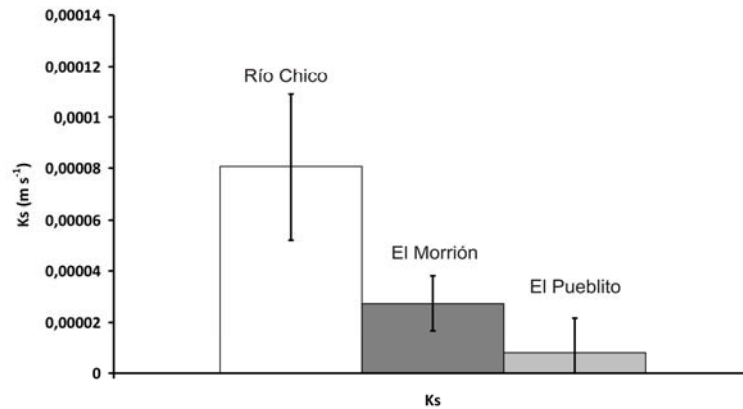


Figura 7. Conductividad hidráulica (Ks) obtenido con el método de Beerkan para los tres sitios estudio de la cuenca del Río Conchos.

(encontrado, gravoso y suelo suelto), permitió concluir que no existen diferencias significativas del valor de Ks por este método, es decir se acepta la H_0 , ya que se obtuvo un valor de $F = 0.947 < F_{0.05(2,15)} = 3.68$.

Por el método de Beerkan, la mayor facilidad que reflejó el suelo para dejar pasar el agua en forma de I_n , se observó en Río Chico (Fig. 7) con valores de

K_s mínimos (entre $2.5E-05$ y $4.5E-05 \text{ m s}^{-1}$) que corresponden en algunos casos a los máximos encontrados en El Morrión y El Pueblito, apreciándose en el primero, en los 11 puntos de medición, un valor de K_s entre $6.5E-05 \text{ m s}^{-1}$ y $8.2E-04 \text{ m s}^{-1}$ (es decir 4 o 5 veces superior que en los otros dos sitios). Los lugares con mayor resistencia a la infiltración, fueron aquellos con

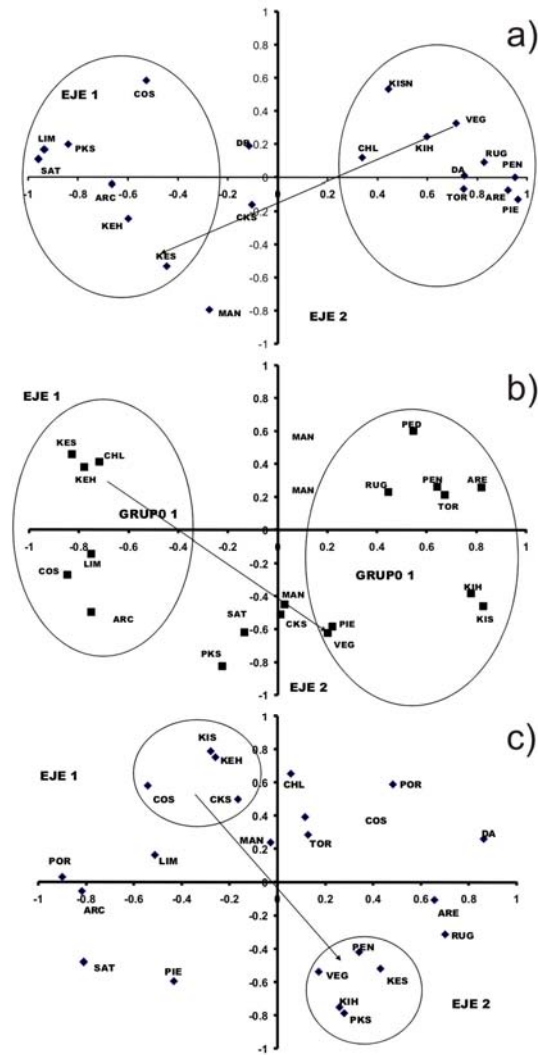


Figura 8. Análisis de componentes principales 1 y 3 en la cuenca media del río Conchos. (a) con resultados de la parte media de la cuenca, (b) con resultados de la parte baja de la cuenca, (c) con el total de resultados de las partes media y baja de la cuenca (LIM, limo; SAT, % de saturación; PKS, promedio de Ks; COS, costra; ARC, arcilla; KES y KEH, coeficiente de Es en suelo seco y húmedo respectivamente; MAN, mantillo; DR y DA, densidad real y aparente, respectivamente; CHL, Conductividad Hidráulica en laboratorio, Ks; VEG, vegetación; RUG, rugosidad, PEN, pendiente; ARE, arenoso; TOR, tortuosidad; KIS y KIH, coeficientes de infiltración en seco y en húmedo, respectivamente; PED, Porcentaje de piedras en superficie de suelo; PIE, porcentaje de gravas y piedras superiores a 2 mm (tamizado); CKS, coeficiente de variación de Ks por el método Beerkan; PKS, promedio de Ks por Beerkan).

matorral xerófilo de lomeríos y planicies de la parte baja de la cuenca del río Conchos; los valores de K_s , en 12 de los puntos de muestreo, se mantuvieron alrededor de $1.0E-05 \text{ m s}^{-1}$; esta resistencia disminuye en los sitios de pie de monte de las sierras aledañas a las planicies tal como lo muestran los valores de K_s en el sitio del Morrión (Fig. 7) cuya velocidad de infiltración en suelos saturados, presentó (para 14 puntos de muestreo) rangos entre $2.0E-05$ y $5.0E-05 \text{ m s}^{-1}$.

Con estos resultados, se pone en evidencia el papel de la vegetación en Río Chico que produjo una mayor K_s ; contrariamente en El Morrión y El Pueblito, donde existe una cubierta de costras que impiden la In , debido a la propiedad de hidrofobia que le confieren estas al suelo subyacente (Reyes-Gómez, 2005). Si se consideran los dos métodos empleados, la lluvia simulada permite que la lámina de agua que se acumule en la superficie del suelo, escurra libremente en sentido de la pendiente; dicho volumen, puede ser representativo del "excedente" que se infiltra por el método de Beerkan, donde la lámina acumulada en el área del suelo puede infiltrarse totalmente, coincidiendo con los datos obtenidos por De Condapa (2000).

Con estas observaciones, se concluye que la simulación de lluvia es apropiada para conocer cuanta agua se infiltra durante un evento de lluvia como ocurre en la naturaleza, pero para estimar la tasa real de In en condiciones de inundación, lo más apropiado es utilizar Beerkan que permite visualizar valores máximos de infiltración. Estos resultados sugieren, una subestimación de la In por simulación de lluvia, que puede confundirse, porque es justamente lo que puede estar ocurriendo durante un evento pluvial; contrariamente, por el método Beerkan, puede pensarse que la infiltración se sobre estima. Sin embargo, esos valores permitieron apreciar las láminas máximas que el suelo pudo aceptar en condiciones de saturación en los horizontes superficiales, por lo que éstos dos métodos se complementan: por un lado, se observan las aptitudes de In en condiciones naturales y, por el otro, las láminas máximas que se pueden infiltrar en condiciones extraordinarias (lluvias torrenciales e inundaciones de terreno) o en el caso de riego por gravedad en zonas de cultivo.

La visualización de variabilidad de suelos en

términos de comportamiento hidrodinámico, se obtuvo con la aplicación de un Análisis de Componentes Principales (ACP), que permitió reducir la dimensionalidad de los datos obtenidos en la cuenca media y baja del río Conchos. La varianza acumulada de los tres componentes principales (CP), involucrando los sitios de la parte media alcanzó rangos entre 72 y 89 % (Tabla 2), pudiendo con ello observar una agrupación de observaciones que permitieron explicar el efecto planteado en la hipótesis de trabajo. Para el caso del ACP de la cuenca media, los $CP1$ (eje X) y $CP3$ (eje Y) de la Fig. 8 (a) muestran mayor correlación en función de los parámetros de estado de superficie, seguidas de las variables explicativas de las aptitudes de In y Es en los sitios experimentales. El ACP permitió reconocer suelos que facilitan la infiltración (Grupo I); que se asocian a la presencia de vegetación, arena, tortuosidad, rugosidad y, suelos donde la K_s se correlaciona con costra en la superficie, significando que a mayor suelo encostrado, se reduce la K_s ; el sentido de la flecha en la figura, indica esos efectos de tipo de superficie sobre la tasa de infiltración máxima o K_s . Un segundo ACP, se hizo en la parte baja (El Morrión y El Pueblito), donde una varianza acumulada de 71.8 % con los dos primeros componentes principales (Fig. 8 b), se vuelve a presentar el patrón de agrupación por sus características físicas, seguidas de las variables explicativas de las aptitudes de In y Es , lo que indica que a mayor cantidad de suelo arenoso y flora, la In y la K_s son mayores, a diferencia de suelos encostrados y con escasa vegetación donde esa posibilidad se reduce.

La relación que involucra los resultados en la parte media y baja del río Conchos, con una varianza acumulada de 72 % en los primeros tres CP, se constata nuevamente el efecto del tipo de superficie sobre las propiedades hidráulicas del suelo. Se obtuvo una correlación positiva entre la vegetación y el Es , sea, entre más cobertura mayor infiltración (Río Chico); y por el contrario, en suelos encostrados, el valor de K_s será menor y la In se reduce (Fig. 8 c).

Conclusiones

Bajo las condiciones particulares del estudio, la simulación de lluvia y la Infiltración controlada de

Beerkan, son dos herramientas que ayudan a caracterizar el comportamiento hidrodinámico del suelo. Los resultados sobre *In* y *Es* ponen en evidencia el papel que juega la superficie del suelo donde el mantillo y la vegetación favorecen la *In*; contrariamente, cuando está cubierto por costras o compactado (paso de maquinaria agrícola y sobrepastoreo), se presenta mayor *Es* superficial. Los suelos con mayor capacidad de infiltración, fueron aquellos con vegetación (Río Chico), donde abunda el pastizal abierto y zonas con depósito de hojarasca de pastizal y otras plantas que favorecen el proceso de infiltración. Cuando la pendiente es pronunciada, se da un aumento de *Es*, debido a que el agua acumulada en la superficie, puede desplazarse aguas abajo, evitando su retención. El *Es* más significativo, fue en zonas bajas como El Morrión y El Pueblito donde el suelo está encostrado y desprovisto de vegetación abundante, imposibilitando la retención de agua y la infiltración. Los resultados estadísticos permitieron probar por un lado, que la interfase lluvia-estados de superficie-infiltración-escorrimento, pone en evidencia la función hidrológica del suelo en la cuenca del río Conchos y por el otro, que la *Ks* del suelo, refleja cuantitativamente los servicios hidrológico-ambientales que se ofrecen, al permitir o no recarga de agua a los acuíferos en la zona de pastizal y matorral xerófilo en la cuenca media y baja del río Conchos. Con estos resultados, se puede suponer que cuando un suelo de bosque o cubierto por vegetación natural es convertido en suelo agrícola o de pastoreo, cambia sus aptitudes de infiltración, esto se refleja en el aumento o disminución de la permeabilidad (labor de suelo, compactación por paso de maquinaria agrícola pesada, pisoteo del ganado y pérdida de materia orgánica). Consecuentemente, cuando el suelo es abandonado y la permeabilidad se minimiza, se produce una disminución en la disponibilidad de humedad en el suelo y la recarga de acuíferos que indiscutiblemente, a largo plazo pone en riesgo la sustentabilidad del hidrosistema.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y al Instituto de

Ecología, A.C. (INECOL) por su apoyo financiero. Daniel Núñez López realizó el mapa de ubicación del estudio.

Bibliografía

- Aboites-Aguilar, L., 2002. Hacia una historia del río Conchos. CIESAS, Cd. Juárez, Chihuahua.
- Alcalá de Jesús, M., Oropeza-Mota, J.L., Tovar-Salinas, J.L., 1998. Producción de sedimentos en diferentes usos del suelo, en la cuenca del río Los Sauces, Michoacán. *Agrociencias*, 32(3): 225-231.
- Álvarez- Cobelas, M. y Angeler D.G., 2007. Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1): 31-43.
- Asseline, J. y Valentin C., 1978. Construction et mise au point d'infiltrómetro a aspersion, *Cah. Orstom, ser. Hydrologie*, 15(4) : 321-350.
- Awadhwal, N.K. y Thierstein, G. E., 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. *Soil Tillage Research*, (5): 289-302.
- Belnap, J., Bedel, B. y Lange, O.L., 2001. Biological Soil Crust: Characteristics and Distribution. P. 3-30, in: *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Belnap J., O.L. Lange (eds). SPRINGLER, ISBN 3-540-41075-9, New York, U.S.A.
- Brooks, R.H. y Corey, T., 1964 Hydraulic properties of pores media. *Hydrology Papers*. Fort Collins: Colorado State University.
- Canales, G.A. e Islas L.A., 2005. Disponibilidad sostenible de agua subterránea a partir del control de las descargas de un acuífero. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1:41-48.
- Carreón, H.E., Pinedo, C. y Lafón, A., 2001. Aplicación de la tecnología geoespacial en el estudio de cuencas: Caso río Conchos. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas. Guanajuato, Gto, México, 10-15 pp.
- Casenave, A. y Valentin, C., 1989. Les États de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Editions de ORSTOM, Collection Didactiques. Paris, Francia.
- CNA., 2001. Comisión de cuenca del río Conchos. Diagnóstico Versión 1.0 Gerencia Estatal Chihuahua. Chihuahua, México.
- Cornet, A., 1988. Principales Caractéristiques Climatiques. p.p. 45-76, in Montaña, C. (ed.) Estudio Integrado de los Recursos Vegetación, Suelo y Agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí. INECOL, Xalapa, Veracruz, México.
- De Condapa, D., 2000. Illustration de la méthode Beerkan en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol. DEA, Grenoble INPG.
- Delhoume, J.P., 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'un topo séquence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. Thèses et documents microfiches. IRD-Paris, 295-298 pp.
- Desconnets, J.C., 1992. Analyse des comportements hydriques de trois parcelles expérimentales implantées en zone basse

- d'un bassin endoréique. Zone aride du nord Mexique. Thèse DEA, Université Poitiers, France, p. 95.
- FAO, 1988. FAO/UNESCO Soil Map of the World. Revised Legend. World Resources Report 60. FAO, Rome.
- Findeling, A., 2001. "Étude de la modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azote de une culture de maïs pluvial au Mexique". Thèse Docteur Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural d'Eaux et Forêts.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, J., Smitz J., y Fuentes, C., 1990. Infiltration from the disc infiltrometer: 3. A productive equation based on physical parameters. *Soil Science*, 149: 292-300.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem K.R.J., y Parlange, J.Y., 1994. Tree-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically bases infiltration equation. *Water Resources Research*, 30: 2931-2935.
- Herrera-Carbajal, S., Villalba-Atondo, A.I. y Molinar Tabares, M.E., 2007. Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1): 21-30.
- Hillel, D., 1980. *Fundamental of Soil Physics*. San Diego: Academic Press, Inc.
- INEGI, 1988. Sistema estatal de información: Situación del sector primario en el estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Gobierno del Estado de Chihuahua.
- INEGI, 1988. Cartas geológicas, 1: 1 000 000. Atlas Nacional del Medio Físico. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática, Aguascalientes, Ags., México.
- Nelly, M.E. 2001. El río Conchos: un informe preliminar. Texas Center for Policy Studies. Austin Texas.
- Martínez-Ochoa, G., 2007. Efecto de la intensidad de lluvia sobre la producción de escurrimiento y erosión en la Microcuenca El General, Mapimí, Durango. Tesis de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Martínez-Mena, M., Abadía, R., Castillo V., y Albaladejo, J., 2001. Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante una tormenta. *Rev. C&G.*, 15:1-2.
- Miranda-Ojeda, N.E., 2006. Determinación de las actitudes de escurrimiento e infiltración de suelos superficiales de la cuenca alta y media del río Conchos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chih. México.
- Montaña, C., Cavgnaro, B. y Briones, O., 1995. Soil water use by co-existing shrubs and grasses in the southern Chihuahuan Desert, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 31:1-13.
- Núñez-López, D., 1995. Uso de imágenes digitales de video como herramienta de teledetecciones en apoyo a la evaluación de los recursos naturales. Tesis de licenciatura. Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED).
- Reyes-Gómez, V.M., O. Grünberger, J.L. Janeau. 1996. Hidrodinámica en el suelo de un pastizal en una zona árida del norte de México. *Terra. Soc. Mex. de la Ciencia del Suelo*. 14(2): 129-136.
- Reyes- Gómez, V.M., 2002. Quantification et modélisation des flux hydriques, thermiques, et azotes dans les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale dans la région des cerrados brésiliens. Tesis de doctorado. Docteur del 'Université Montpellier 2. Paris Francia.
- Reyes-Gómez, V.M., 2005. Hidrodinámica superficial de los suelos de playa, pp 79-91 en: *Las playas del desierto chihuahuense (parte mexicana), influencia de las sales en medio ambiente árido y semiárido*. Grünberger O., Reyes-Gómez V.M., J.L. Janeau (editores), IRD-INECOL.
- Reyes-Gómez, V.M., Viramontes, D., Miranda-Ojeda, N., Sánchez-Rodríguez, P.B. y Viramontes, O., 2007. Papel hidrológico-ambiental de las propiedades hidráulicas del suelo superficial de la cuenca del río Conchos. *Ingeniería hidráulica en México*. XXII (4): 33-46
- SAS, User's Guide, 1985. Manual y paquete para estadísticas. Cary, North Carolina. USA.
- Tarín-Torres, G., 1992. Caracterización hidrodinámica en una formación vegetal denominada "mogote" con simulación de lluvia. Reserva de la biosfera de Mapimí. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Coahuila, México.
- Van Genuchten, M.TH., 1980. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 892-898.
- Viramontes, D. y Descroix, L., 2003. Changes in the surface water hydrologic characteristics of an endoreic basin of northern Mexico from 1970 to 1998. *Hydrol. Process.*, 17: 1291-1306.