

IMPACTO HIDROLÓGICO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO DE UN PASTIZAL NATIVO A PRADERAS DE ZACATE BUFFEL (*Pennisetum ciliare* L.)

HYDROLOGICAL IMPACT OF LAND-USE CHANGE FROM RANGELAND TO BUFFELGRASS (*Pennisetum ciliare* L.) PASTURE

Velásquez Valle, Miguel Agustín^{1*}; Sánchez Cohen, Ignacio¹; Gutiérrez Luna, Ramón²; Muñoz Villalobos, Jesús Arcadio¹; Macías Rodríguez, Hilario¹.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. km 4.5 Margen derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Correo-e: velasquez.agustin@inifap.gob.mx Tel: 8717251756. (*Autor para correspondencia).

²Campo Experimental de Zacatecas. Apdo. Postal # 19. C.P. 99600. Calera de Víctor Rosales, Zac.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es documentar el impacto del establecimiento de praderas de zacate buffel (*Pennisetum ciliare* L.) en terrenos de pastizal, sobre la tasa de infiltración del suelo. El estudio se estableció en el área de San Luis del Cordero, Dgo. Para determinar el impacto se realizaron pruebas de infiltración con un simulador de lluvia en praderas de zacate buffel y en terrenos de pastizal nativo. Las simulaciones se realizaron en condiciones secas y húmedas (24 horas después de las simulaciones en seco) para tres repeticiones en cada uso del suelo y condición de humedad. La base de datos hidrológica, lámina precipitada (mm) y volumen escurrido (l) fueron medidos cada 5 minutos durante la prueba, la cual tuvo una duración de 50 minutos. Los resultados indican que para las dos condiciones de uso del suelo la tasa de infiltración final se puede clasificar como moderada (entre 2.0 a 6.6 cm·h⁻¹). Para las tasas de infiltración, la evaluación del cambio en el uso del suelo de un pastizal nativo al establecimiento de una pradera de zacate buffel en la región de estudio no representó diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) entre usos de suelo. Para el sitio experimental, en la condición de la pradera con zacate buffel y la de pastizal nativo, en promedio la tasa de infiltración final fue de 5.04 y 3.88 cm·h⁻¹, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: Hidrología, zonas áridas, infiltración.

ABSTRACT

The aim of this study is to document the impact of establishing buffelgrass (*Pennisetum ciliare* L.) pasture in rangeland on the soil infiltration rate. The study was conducted in the San Luis del Cordero area of the state of Durango, Mexico. To determine the impact, infiltration tests were conducted with a rainfall simulator in buffelgrass pastures and native rangelands. The simulations were performed in dry and wet conditions (the latter 24 hours after the dry simulations) for three replicates in each land use and moisture condition. The hydrological database consisted of precipitation depth (mm) and runoff volume (l), which were measured every 5 minutes during the test, which lasted 50 minutes. The results indicate that for the two land-use conditions, the final infiltration rate can be classified as moderate (between 2.0 to 6.6 cm·h⁻¹). For the infiltration rates, assessment of the land-use change from native rangeland to buffelgrass pasture in the study region did not represent statistically significant differences ($P \leq 0.05$) between land uses. For the experimental site, in the buffelgrass pasture and native rangeland conditions, the average final infiltration rate was 5.04 and 3.88 cm·h⁻¹, respectively.

KEYWORDS: Hydrology, arid lands, infiltration.



Recibido: 14 de octubre, 2013
Aceptado: 21 de mayo, 2014
<http://www.chapingo.mx/revistas>
doi:10.5154/r.rchsza.2013.10.004

INTRODUCCIÓN

Las regiones áridas en México se encuentran distribuidas principalmente en la parte norte del país y representan más del 45 % de su superficie (SARH, 1978; Jaramillo, 1994; Huntsinger y Starrs, 2006; INE, 2007). Bajo estas condiciones ambientales la ganadería extensiva es la principal actividad económica, la cual se realiza en una superficie que abarca entre 85 a 95 millones de hectáreas del territorio nacional (INE, 1994; SAGAR, 1996; Villegas *et al.*, 2001). Desafortunadamente, la escasa precipitación y las altas tasas de evapotranspiración limitan el crecimiento de las especies vegetales cultivadas y nativas. Por otro lado, la baja capacidad de almacenamiento de humedad de los suelos y los altos coeficientes de escurrimiento (> 0.7) reducen la disponibilidad de agua en la zona radicular del suelo para el desarrollo de las plantas.

Para el estado de Durango, la situación ambiental no es diferente; en la región o parte media de la cuenca del río Nazas las condiciones de aridez son extremas con una precipitación promedio anual de 325 mm (Medina *et al.*, 2005). Esta condición ambiental limita la producción de forraje en los pastizales por lo que la producción agrícola y los esquilmos de los cultivos suplementan las necesidades alimenticias del ganado en esta región.

Para lograr el éxito con el establecimiento y la producción de los cultivos en estas condiciones, es necesario implementar estrategias para evadir los efectos negativos de las recurrentes sequías (Reilly *et al.*, 2003). Entre estas estrategias que se utilizan se pueden mencionar entre otras: las prácticas mecánicas para conservar suelo y agua como el establecimiento de terrazas (Lesschen *et al.*, 2008; Dame-ne *et al.*, 2012), la reconversión de cultivos o el establecimiento de parcelas con especies más eficientes en el uso del agua (Turner, 2004) y el uso de prácticas para hacer más eficientes los recursos hídricos disponibles como el aprovechamiento de aguas de escorrentía (Lehmann *et al.*, 1998). En ambientes áridos, el propósito de cualquiera de estas estrategias, sería evitar una reducción en la disponibilidad de humedad de al menos 30 % de las aportaciones del agua en el suelo; de lo contrario se presentarían las condiciones que pueden inhibir el establecimiento y crecimiento de los cultivos o especies forrajeras (Tromble, 1988).

El proceso de infiltración

Dentro del ciclo hidrológico, el proceso más complejo en tiempo y espacio es la infiltración del agua en el suelo. Este proceso se define como el paso del agua a través de la superficie del suelo. Esta complejidad es atribuida a la variación en las condiciones iniciales y de frontera del sistema de las leyes que gobiernan el proceso en tiempo y espacio. (Mein y Larson, 1973; Hillel, 1980; Singh, 1988).

Al inicio de una tormenta, teóricamente el suelo tiene un espacio poroso que puede ser ocupado por el agua que se

INTRODUCTION

Arid regions in Mexico are mainly located in the northern part of the country and account for more than 45 % of its area (SARH, 1978; Jaramillo, 1994; Huntsinger and Starrs, 2006; INE, 2007). Under these environmental conditions cattle ranching is the main economic activity, which is carried out in an area covering 85 to 95 million hectares of the country (INE, 1994; SAGAR, 1996; Villegas *et al.*, 2001). Unfortunately, low rainfall and high evapotranspiration rates limit the growth of cultivated and native plant species. On the other hand, the low moisture storage capacity of the soils and high runoff coefficients (> 0.7) reduce the availability of water in the soil root zone required for plant development.

For the state of Durango, the environmental situation is no different; in the middle region or part of the Nazas River watershed, arid conditions are extreme with average annual rainfall of 325 mm (Medina *et al.*, 2005). This environmental condition limits forage production in the rangelands so that agricultural production and crop wastes are used to supplement the nutritional needs of livestock in this region.

To achieve success with crop establishment and production under these conditions, strategies must be implemented to avoid the negative effects of recurrent droughts (Reilly *et al.*, 2003). These strategies include, among others, mechanical practices for conserving soil and water such as terracing (Lesschen *et al.*, 2008; Damene *et al.*, 2012.), crop conversion or establishing plots with species with greater water-use efficiency (Turner, 2004) and the use of practices to make more efficient use of available water resources such as runoff (Lehmann *et al.*, 1998). In arid environments, the purpose of any of these strategies would be to maintain a moisture availability level of at least 30 % of the water contributions in the soil; otherwise, conditions that may inhibit the establishment and growth of crops or forage species would occur (Tromble, 1988).

The infiltration process

Within the hydrological cycle, the most complex process in time and space is the infiltration of water into the soil. This process is defined as the passage of water through the soil surface. This complexity is attributed to the variation in the initial and boundary conditions of the system of laws governing the process in time and space (Mein and Larson, 1973; Hillel, 1980; Singh, 1988).

At the beginning of a storm, theoretically the soil has a pore space that can be occupied by the water that infiltrates it. The magnitude of the pore space depends on the existing moisture content and some physical properties of the soil. The *infiltration rate or capacity* is the amount of water absorbed by the soil per unit of time; that is, it is simply the flow that the soil profile can absorb through its surface when kept in contact with water at atmospheric pressure, and un-

infiltra. La magnitud del espacio poroso depende del contenido de humedad existente y algunas propiedades físicas del suelo. La *tasa o capacidad de infiltración* es la cantidad de agua que el suelo absorbe por unidad de tiempo; es decir, es simplemente el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a presión atmosférica y bajo esta condición el proceso de infiltración es controlado por las fuerzas de capilaridad en la matriz del suelo.

Cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración de un suelo, el agua de la lluvia se infiltra y entonces se tiene lo que se conoce como *velocidad de infiltración*. Si la intensidad de la precipitación nunca excede la capacidad de infiltración final, no habrá escurrimiento y la velocidad de infiltración será igual a la intensidad de precipitación.

entonces:

$$\text{Sí } i < f_p \quad \text{entonces} \quad f = i \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} f &= \text{infiltración (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \\ f_p &= \text{capacidad de infiltración (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \\ i &= \text{intensidad de la lluvia (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \end{aligned}$$

Con el paso del tiempo y al incrementarse la intensidad de la lluvia, el aire que ocupa el espacio poroso del suelo es desplazado por el agua que se infiltra y la superficie alcanza la saturación. En ese instante el exceso de agua se empieza a acumular en las depresiones del terreno y al llenarse éstas, se comienza a producir flujo sobre la superficie. A este momento se le llama tiempo de encharcamiento (t_p).

Posteriormente, si la intensidad de la lluvia aumenta el proceso de infiltración es gobernado por las fuerzas de gravedad y las fuerzas de capilaridad pierden importancia ya que el contenido de humedad en el suelo aumenta y debido a esto la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo. Además, bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia en tanto que ésta sea mayor que la capacidad de transmisión del suelo, de manera que:

$$\text{Sí } i > f_p \quad \text{y} \quad t > t_p \quad \text{entonces:} \quad f = f_p \quad (2)$$

donde f_p decrece con el tiempo.

Con el tiempo la intensidad de la lluvia disminuye hasta ser menor que la capacidad de infiltración, la lámina de agua existente sobre la superficie del suelo disminuye hasta desaparecer y el agua contenida en los charcos también se infiltra.

En áreas de pastizal las variables que están relacionadas con el proceso de infiltración han sido identificadas y de mane-

der this condition the infiltration process is controlled by the capillary forces in the soil matrix.

When the rainfall intensity is less than the infiltration capacity of a soil, rainwater infiltrates and then you have what is known as the *infiltration rate*. If the rainfall intensity never exceeds the final infiltration capacity, there will be no runoff and the infiltration rate will be equal to the rainfall intensity.

then:

$$\text{If } i < f_p \quad \text{then} \quad f = i \quad (1)$$

where:

$$\begin{aligned} f &= \text{infiltration (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \\ f_p &= \text{infiltration capacity (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \\ i &= \text{rainfall intensity (mm}\cdot\text{h}^{-1}) \end{aligned}$$

With the passage of time and increasing rainfall intensity, the air that occupies the pore space of the soil is displaced by the water that infiltrates it and the surface reaches saturation point. At that moment the excess water begins to accumulate in depressions in the ground and fill them, and it begins to produce flow on the surface. This moment is called the ponding time (t_p).

Subsequently, if the rainfall intensity increases, the infiltration process is governed by the forces of gravity and the capillary forces become less important because the moisture content in the soil increases and because of this the infiltration capacity decreases over time. Furthermore, under these conditions, infiltration becomes independent of the variation in the time of the rainfall intensity insofar as this is greater than the transmission capacity of the soil, so that:

$$\text{If } i > f_p \quad \text{and} \quad t > t_p \quad \text{then:} \quad f = f_p \quad (2)$$

where f_p decreases with time.

Eventually the rainfall intensity decreases until it becomes less than the infiltration capacity, the existing sheet of water on the soil surface decreases until it disappears and the water in the puddles also infiltrates.

The variables related to the infiltration process in rangelands have been identified and, in general, include aspects related to soil type, vegetation cover, bulk density, organic matter content, porosity, surface stoniness, presence of crusts, degree of soil dispersion on the surface due to sodium, slope of the ground, soil texture and pattern of soil capillary forces (Branson *et al.*, 1981). For example, Quiñones-Vera *et al.* (2009) found that the presence of crusts on the soil surface of rangeland dominated by the species *Bouteloua gracilis* influenced the infiltration rate since under these conditions a lower infiltration rate occurred than in soils without crusts.

ra muy general se puede mencionar que están relacionadas con aspectos del tipo de suelo, cobertura vegetal, densidad aparente, contenido de materia orgánica, porosidad, pedregosidad superficial, presencia de costras, grado de dispersión del suelo en la superficie por sodio, pendiente del suelo, textura y por el patrón de fuerzas capilares del suelo (Branson *et al.*, 1981). Por ejemplo, Quiñones-Vera *et al.*, (2009) encontraron que la presencia de costras en la superficie del suelo de pastizal dominado por la especie *Bouteloua gracilis* influyeron en la tasa de infiltración ya que bajo estas condiciones se presentó la menor tasa de infiltración que en suelos sin costras. También, Merzougui y Gifford (1987) reportaron que el porcentaje de cobertura de la vegetación más el mantillo pueden explicar hasta el 36 % de la varianza asociada con las tasas de infiltración.

Por otro lado, los sistemas de manejo del suelo como las prácticas mecánicas, sistemas de pastoreo y exclusión al pastoreo que afectan las condiciones de la capa superficial del suelo también determinan la magnitud de la lámina infiltrada (Simanton *et al.*, 1978; Tromble, 1980; Gamougoun *et al.*, 1984)

Con respecto al zacate buffel se han reportado varios aspectos relacionados con su impacto sobre procesos hidrológicos del suelo, donde se ha logrado establecer esta especie. Al evaluar el efecto de la altura de corte (0, 20 y 40 cm) sobre el suelo de diferentes especies de pastos, se ha señalado que en las praderas con zacate buffel se obtuvo la mayor influencia sobre el mejoramiento de las propiedades hidrológicas del suelo (infiltración y escurrimiento superficial) que en los que se establecieron las otras especies evaluadas. Estos resultados fueron atribuidos a las diferencias entre especies, principalmente en las características y hábito de crecimiento (Mganga *et al.*, 2010).

Impacto hidrológico al manipular la vegetación de los pastizales

El cambio de uso de suelo o de la vegetación en un ecosistema generalmente asume otro cambio en las relaciones funcionales que determinan el comportamiento hidrológico del suelo. En el caso de los pastizales, se ha evaluado el cambio de diferentes escenarios de manejo desde un punto de vista hidrológico. Por ejemplo, para incrementar la producción de agua en cuencas semiáridas, se ha reportado que la manipulación de la vegetación mediante la eliminación del estrato arbóreo no tiene efectos significativos en el balance hídrico, al reducir el número de plantas de mezquite o encino (Carlson *et al.*, 1990; Epifanio *et al.*, 1991). Sin embargo, la forma de eliminar el estrato arbóreo sí tiene mucho que ver en la respuesta del sitio en términos hidrológicos y en la conservación de los recursos. Scanlan *et al.* (1992) mencionan que si la superficie del suelo permanece sin alteraciones después de eliminar el estrato arbóreo, las tasas de infiltración y la producción de sedimentos podrían mantenerse estables por un largo tiempo; de lo contrario puede incrementar el riesgo de fomentar un tipo de erosión en arroyuelos o cárcavas.

Also, Merzougui and Gifford (1987) reported that percent cover (vegetation plus litter) can explain up to 36 % of the variance associated with infiltration rates.

On the other hand, soil management systems such as mechanical practices, grazing systems and grazing exclusion that affect topsoil conditions also determine the magnitude of the infiltrated depth (Simanton *et al.*, 1978; Tromble, 1980; Gamougoun *et al.*, 1984).

Regarding buffelgrass, various aspects related to its impact on soil hydrological processes, in areas where this species has been successfully established, have been reported. In assessing the effect of cutting height (0, 20 and 40 cm) above the ground of different grass species, it has been noted that the greatest influence on the improvement of hydrological soil properties (infiltration and surface runoff) was obtained with pastures with buffelgrass rather than in those in which the other evaluated species were established. These results were attributed to species differences, mainly in growth characteristics and habit (Mganga *et al.*, 2010).

Hydrological impact by manipulating rangeland vegetation

Land-use or vegetation change in an ecosystem usually assumes another change in the functional relationships that determine the hydrological behavior of the soil. In the case of rangelands, changing from one management scenario to another has been evaluated from a hydrological standpoint. For example, to increase water production in semi-arid watersheds, it has been reported that the manipulation of vegetation by removing the tree layer has no significant effects on water balance, when reducing the number of mesquite or oak plants (Carlson *et al.*, 1990; Epifanio *et al.*, 1991). However, the way of removing the tree layer does have a lot to do with the response of the site in hydrological terms and in conservation of resources. Scanlan *et al.* (1992) state that if the soil surface remains unchanged after removing the tree layer, infiltration rates and sediment production could remain stable for a long time; otherwise, it may increase the risk of causing erosion in the form of small streams or gullies.

The rationale for quantifying the hydrological behavior of the soil in the scenarios presented in this study is the need to quantify the infiltration rates in order to generate information to support decision-making aimed at improving productivity and conserving natural resources in the agricultural production systems in the region. This has generated knowledge of the hydrological behavior in other places and, with it, efforts have made to generalize and apply this knowledge to a wide range of ecosystems, where conditions are totally different from those in which that information was generated (Pierson *et al.*, 2002).

The aim of this study is to document the impact of establishing buffelgrass (*Pennisetum ciliare* L.) pastures in range-

La justificación para cuantificar el comportamiento hidrológico del suelo en los escenarios planteados en este estudio es porque es necesario cuantificar las tasas de infiltración a fin de generar información de apoyo en la toma de decisiones para mejorar la productividad y conservación de los recursos naturales en los sistemas de producción agropecuaria en la región. Lo anterior ha generado conocimiento del comportamiento hidrológico para otros lugares y con ello se ha tratado de generalizar y aplicar éste a un amplio rango de ecosistemas, cuyas condiciones son totalmente distintas a aquellas en las cuales fue generada dicha información (Pier-son *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo es documentar el impacto del establecimiento de praderas de zacate buffel (*Pennisetum ciliare* L.) en terrenos de pastizal, sobre el comportamiento hidrológico del suelo, medido en términos de la tasa de infiltración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el municipio de San Luis del Cordero, en el estado de Durango, México. El municipio cuenta con una superficie de 543.9 km², está comprendido entre los paralelos 25° 11' y 25° 30' de latitud norte y entre los meridianos 104° 40' y 104° 29' de longitud oeste y una altura promedio sobre el nivel del mar de 1,490 metros. El municipio se encuentra ubicado en la zona árida del estado, en la parte sur del Bolsón de Mapimí, el cual, es considerado como un semi-desierto. La región cuenta con un clima muy seco BSkw y BWhw (García-Gutiérrez *et al.*, 2006), las temperaturas máximas registradas son de 42 °C y las mínimas de -4 °C (FIRCO, 2004). La precipitación media anual es de 360 mm, siendo el periodo de lluvias de junio a agosto. El promedio de heladas por año es de 25.7 días. El origen del suelo es aluvial con una profundidad media de 25 a 50 cm, de color castaño claro a oscuro, textura blanda arenosa con grava, una estructura tipo block-angular, con una consistencia moderadamente dura con un drenaje intermedio y un pH de 7.5 a 8.0, libre de sales. El tipo al que corresponde es el llamado Litosol y su formación geológica consta de varias capas calizas. La mayor parte del suelo se usa para la ganadería, como agostadero (Figura 1), siguiendo en importancia el uso agrícola. La vegetación típica del sitio de estudio está compuesta principalmente por: mezquite (*Prosopis* sp.), huisache (*Acacia* sp.), lechuguilla (*Agave lecheguilla*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), sotol (*Dasyliirion* spp), nopal (*Opuntia* spp.), orégano (*Origanum vulgare*), gobernadora (*Larrea tridentata*), candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*), maguey (*Agave americana*) y gran variedad de otras cactáceas (Herrera y Pámanes, 2006). En el estado de Durango, los valles representan la región con mayor producción de biomasa de pastizales nativos con un 28.8 % de su superficie, en los cuales destacan los pastos como el navajita (*Bouteloua curtipendula*) y banderita (*Bouteloua gracilis*) (COTECOCA, 1979).

lands on the hydrological behavior of the soil, measured in terms of the infiltration rate.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The present study was conducted in the municipality of San Luis del Cordero, located in the state of Durango, Mexico. The municipality covers an area of 543.9 km², situated between 25° 11' and 25° 30' north latitude and 104° 40' and 104° 29' west longitude, at an average height of 1,490 meters above sea level. The municipality is located in the arid zone of the state, in the southern part of the Bolsón de Mapimí, which is considered a semi-desert. The region has a very dry BSkw and BWhw climate (García-Gutiérrez *et al.*, 2006); the maximum and minimum recorded temperatures are 42 °C and -4 °C, respectively (FIRCO, 2004). Average annual precipitation is 360 mm, with the rainy period being from June to August. Frost occurs on average 25.7 days per year. The origin of the soil is alluvial with an average depth of 25 to 50 cm; it is light to dark brown, with a soft sandy texture with gravel, a block-angular structure, and a moderately hard consistency with intermediate drainage and a pH of 7.5 to 8.0, free of salts. It is thus a Litosol soil type and its geological formation consists of several limestone layers. Most of the land is used as rangeland for livestock farming (Figure 1), followed in importance by agricultural use. The typical vegetation of the study site is mainly composed of: mesquite (*Prosopis* sp.), huisache (*Acacia* sp.), lechuguilla (*Agave lecheguilla*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), desert spoon (*Dasyliirion* spp.), nopal (*Opuntia* spp.), oregano (*Origanum vulgare*), creosote bush (*Larrea tridentata*), candelilla (*Euphorbia antisyphilitica*), maguey (*Agave americana*) and a wide variety of other cacti (Herrera and Pámanes, 2006). In the state of Durango, the valleys are the region with the highest biomass production from native rangelands with 28.8 % of its surface, in which grasses such as blue grama (*Bouteloua curtipendula*) and grama (*Bouteloua gracilis*) stand out (COTECOCA, 1979).

Rainfall simulation

To determine the hydrological impact, infiltration tests were performed with a modified Miller rainfall simulator (1987) (Figure 2). The simulator works with a portable 5500-watt power plant, which generates 110 VAC power. The simulator includes an electronic module (110 VAC) which controls the synchronized opening and closing of the three valves that make up the simulator. The time of opening and closing of each valve for this study was equal to 4 seconds. The water entering the hydraulic system of the simulator is supplied by a 0.5-HP (110 VAC) hydraulic pump. The rain leaves the hydraulic system of the simulator by a circular spray nozzle. The water pressure for each valve is controlled by pressure gauges in each nozzle. The simulator has a rainfall intensity range of 60-180 mm·h⁻¹. The runoff plots were constructed



FIGURA 1. Área de pastizal nativo con erosión acelerada o en cárcavas en la región del municipio de San Luis del Cordero, Dgo. México.

FIGURE 1. Area of native rangeland with accelerated erosion or gullies in the region of the municipality of San Luis del Cordero, Dgo. Mexico.

Simulación de lluvia

Para determinar el impacto hidrológico se realizaron pruebas de infiltración con un simulador de lluvia tipo Miller (1987) modificado (Figura 2). El Simulador trabaja con una planta de energía portátil de 5500 Watts, la cual genera una energía de 110 VAC. El simulador incluye un módulo electrónico (110 VAC) que regula de manera sincronizada el cierre y apertura de las tres válvulas que consta el simulador. El tiempo de cierre y apertura de cada válvula para este estudio fue igual a 4 segundos. El agua que entra al sistema hidráulico del simulador es abastecida por una bomba hidráulica de 0.5 HP (110 VAC). La lluvia sale del sistema hidráulico del simulador por una boquilla de aspersión circular. La presión del agua para cada válvula es controlada por manómetros en cada boquilla. El simulador tiene un rango de intensidad de precipitación de 60 hasta 180 mm·h⁻¹. Las parcelas de escurrimiento se construyeron aislando una superficie de 1 por 3 metros con lámina galvanizada lisa, en la parte baja de cada parcela se colocó una estructura metálica para concentrar los escurrimientos superficiales que salen de cada una de ellas. Las simulaciones de lluvia se realizaron en condiciones secas (actual) y húmedas (24 horas después de las pruebas en seco) para cada una de las parcelas de escurrimiento. La base de datos hidrológica lámina (mm) y volumen (l) fueron medidos a intervalos de cada 5 minutos durante la prueba, la cual tuvo una duración de 50 minutos.

El sitio experimental fue el terreno conocido como La Providencia en el municipio de San Luis del Cordero, Dgo. Las pruebas de infiltración se corrieron sobre dos diferentes usos de suelo: a) un área de cultivo abandonada (25° 25' 18" LN y

by isolating an area of 1 by 3 meters with a smooth galvanized sheet; at the bottom of each plot, a metal structure was placed to concentrate the surface runoff coming out of each of them. The rainfall simulations were performed under dry (current) and wet conditions (24 hours after the dry tests) for each of the runoff plots. Rainfall depth (mm) and volume (l) were measured at 5-minute intervals during the test, which lasted 50 minutes.

The experiment was conducted on land known as La Providencia in the municipality of San Luis del Cordero, Durango. The infiltration tests were run on two different land uses: a) an rangeland site (25° 25' 18" NL and 104° 14' 57" WL) rehabilitated as a buffelgrass (*Pennisetum ciliare* L.) pasture with 11 years of establishment. The buffelgrass pasture (BP), apart from receiving rain, also receives water contributions once or several times a year made in the form of irrigation whose origin is runoff from Naycha stream; the number of irrigations applied to the plot depends on the number of storms that cause floods in the aforementioned stream. At the time of the rainfall simulation tests, the buffelgrass pasture was in a phenological state of resprouting, after having been cut and b) an area of native rangeland in the region (25° 25' 18" NL and 104° 15' 29" WL), in which the dominant species in the tree layer are mesquite (*Prosopis* spp) and huizache (*Acacia* spp), whereas those in the basal layer are grass species of the genera *Bouteloua*, *Lycurus* and *Aristida*. In the case of the natural rangeland (NR), the water regime is totally seasonal; therefore, on the date of carrying out the infiltration tests, the plants in the lower layer were dry due to their physiological stage and the lack of soil moisture (less than 10 %, based on dry weight).



FIGURA 2. Simulador de lluvia modificado, tipo Miller (1987) utilizado en parcelas experimentales.
 FIGURE 2. Modified Miller rainfall simulator (1987) used in experimental plots.

104° 14' 57" LO) y rehabilitada como una pradera de zacate buffel (*Pennisetum ciliare* L.) con 11 años de establecida. La pradera de zacate buffel (PZB) aparte de recibir la lámina precipitada o lluvia, una o varias veces al año se hacen aportaciones de agua a la pradera en forma de riego cuyo origen es la escorrentía proveniente del arroyo Naycha, el número de riegos aplicados a la parcela dependen del número de tormentas que originen avenidas en el arroyo mencionado. Al momento de las pruebas de simulación de lluvia la pradera de zacate buffel se encontraba en un estado fenológico de rebrotación, después de haber realizado un corte y b) un área de pastizal nativo de la región (25° 25' 18" LN y 104° 15' 29" LO), en el cual las especies dominantes en el estrato arbóreo son el mezquite (*Prosopis* spp) y el huizache (*Acacia* spp) y en el estrato basal se encontraron las especies de pasto de los Géneros *Bouteloua*, *Lycurus* y *Aristida*. El caso del pastizal nativo (PN) el régimen hídrico es totalmente de temporal; por ello, en la fecha de realización de las pruebas de infiltración las plantas en el estrato inferior se encontraban secas por su etapa fisiología y por la falta de humedad en el suelo (menor al 10 %, con base en peso seco).

De manera general el aspecto de la condición superficial de los sitios considerados en este estudio se observan en la Figura 3 y la cobertura en los usos de suelo al momento de la realización de las pruebas de infiltración se presenta en el Cuadro 1.

El análisis estadístico de la información hidrológica obtenida se realizó considerando cuatro tratamientos: dos usos de suelo (pradera de zacate buffel y pastizal nativo) y dos condiciones de cobertura del suelo: buena y mala (Cuadro 1). El análisis de varianza (ANOVA) se obtuvo con un diseño Factorial 2 x 2 con tres repeticiones con el programa GLS del Paquete SAS (SAS Institute, 1994).

In a general way, the surface condition of the sites considered in this study can be seen in Figure 3 and the cover in the land uses when carrying out the infiltration tests is shown in Table 1.

Statistical analysis of the hydrological data obtained was carried out considering four treatments, two land uses (buffelgrass pasture and native rangeland) and two land cover conditions: good and bad (Table 1). Analysis of variance (ANOVA) was obtained with a 2 x 2 factorial design with three replicates using the GLS program in the SAS software package (SAS Institute, 1994).

RESULTS AND DISCUSSION

Hydrological impact

The results obtained from the rainfall simulation tests to determine the final infiltration rate (at 50 minutes into the test) in each land use are presented in Table 2. It can be seen that higher average final infiltration rate values occurred in pastures with buffelgrass (5.04 cm·h⁻¹), while in native rangeland the calculated final infiltration rate was 3.88 cm·h⁻¹. No statistically significant differences ($P \leq 0.05$) in the values of this variable for the different land uses were found.

It is important to note that the similarity found in the final infiltration rate values in the two land uses can be regarded as an indicator that the type of soil in which the infiltration tests were performed is the same (Litosol) or at least similar in terms of some of their physical properties that determine the infiltration process such as texture, bulk density, pore type, etc. (Branson *et al.* 1981).

However, at the beginning of the infiltration test, numerical (not statistical) differences can be observed in the mean in-

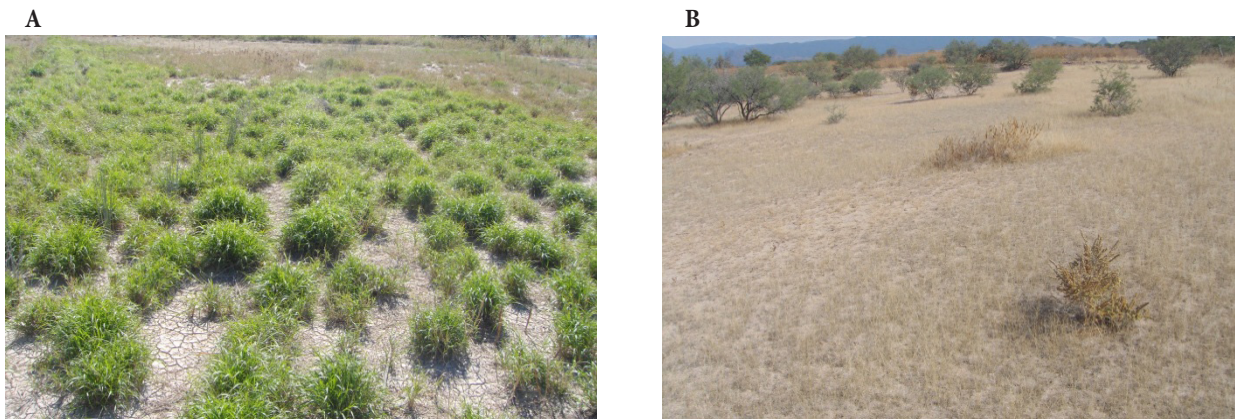


FIGURA 3. Sitios experimentales a) Pradera de zacate buffel y b) Pastizal nativo utilizados para la evaluación hidrológica.
 FIGURE 3. Experimental sites a) Buffelgrass pasture and b) Native rangeland used for hydrological evaluation.

CUADRO 1. Promedio de la cobertura superficial del suelo (%) dentro de las parcelas de escurrimiento en las praderas de zacate buffel y de pastizal nativo.

TABLE 1. Average ground cover (%) within the runoff plots in buffelgrass pastures and native rangeland.

Uso del suelo / Land use	Condición Superficial / Surface Condition	Cobertura del suelo (%) / Ground cover (%)		
		Zacate / Grass	Mantillo orgánico / Organic mulch	Otro* / Other*
Pradera de zacate buffel / Buffelgrass pasture	Buena / Good	34.4	41.7	23.9
	Mala / Bad	31.6	33.3	35.1
Pastizal nativo / Native rangeland	Buena / Good	0.0	48.0	52.0
	Mala / Bad	0.0	18.3	81.7

*..Maleza, grava, roca

*..Weeds, gravel, rock

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Impacto hidrológico

Los resultados obtenidos de las pruebas de simulación de lluvia para determinar la tasa de infiltración final (a los 50 minutos de iniciada la prueba) en cada uso del suelo se presentan en el Cuadro 2. Se observa que los valores más altos en promedio de la tasa de infiltración final se presentaron en las praderas con zacate buffel ($5.04 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$); mientras que en el pastizal nativo la tasa de infiltración final calculada fue $3.88 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) de los valores de esta variable para los diferentes usos de suelo.

Es importante señalar que la similitud encontrada de los valores de la tasa de infiltración terminal o final en ambos usos del suelo, puede considerarse como un indicador de que el

filtration rate values between the good and bad conditions, mainly in the buffelgrass pasture (Figure 4a). These differences are most evident in the first 15 minutes of the infiltration test. The difference noted is mainly due to the conditions of the surface layer rather than the physical-chemical characteristics of the soil matrix. These differences at the start of the process are important in arid environments because they determine the amount of water passing through the soil surface at the beginning of the storm, on which its use by plants and the generation of surface runoff depend.

In the buffelgrass plots, this behavior at the beginning of the infiltration test is attributed to the higher land cover values resulting from the vegetation (grass) and the organic mulch (leaves, feces, etc.) deposited on the soil surface. These elements act as a physical barrier to the free flow or movement of water over the soil surface (Branson *et al.* 1981). The results obtained in this study coincide with those reported by

CUADRO 2. Tasa de infiltración final para los usos, condición y cobertura del suelo en San Luis del Cordero, Dgo.

TABLE 2. Final infiltration rates for land uses, condition and cover in San Luis del Cordero, Dgo.

Uso del suelo / Land use	Condición / Condition	Cobertura del suelo (%) [*] / Land cover (%) [*]	Tasa de infiltración final (cm·h ⁻¹) / Final infiltration rates (cm·h ⁻¹)
Pradera de zacate / Buffelgrass pasture	Buena / Good	89.4	5.43 ^º a
	Mala / Bad	62.8	4.65 a
Pastizal nativo / Native rangeland	Buena / Good	83.8	4.20 a
	Mala / Bad	12.2	3.56 a

^{*} Cobertura del suelo por zacate + mantillo orgánico.

^º Promedio de tres repeticiones.

^{*} Land cover by grass + organic mulch.

^º Average of three replicates.

tipo de suelo en el cual se realizaron las pruebas de infiltración es el mismo (Litosol) o al menos similar en cuanto a algunas de sus propiedades físicas que determinan el proceso de infiltración como la textura, densidad aparente, tipo de poros, etc. (Branson *et al.*, 1981).

Sin embargo, al inicio de la prueba de infiltración se pueden observar diferencias numéricas (no estadísticas) en los valores promedio de la tasa de infiltración entre las condiciones buena y mala, principalmente en la pradera de zacate buffel (Figura 4a). Estas diferencias son más evidentes en los primeros 15 minutos de la prueba de infiltración. La diferencia señalada es debida a las condiciones de la capa superficial que a las características físico-químicas de la matriz del suelo. Estas diferencias al inicio del proceso son importantes en ambientes áridos, porque determinan la cantidad de agua que pasa a través de la superficie del suelo al inicio de la tormenta y de ello depende su aprovechamiento por las plantas y la generación del escurrimiento superficial.

En las parcelas de zacate buffel, este comportamiento al inicio de la prueba de infiltración se atribuye a los valores más

Mganga *et al.* (2010), who stated that the bunchgrass-type growth habit of buffelgrass and the height of the foliage at the time of conducting the infiltration tests favored the infiltration process, unlike the situation found in the native rangeland site in which the sparse population of grasses and their stunted growth had no effect at the beginning of the test on the flow of water through the soil surface.

As for the infiltration rates in native rangeland areas, it can be noted that in both the good and bad condition the calculated values of this variable are very similar throughout the test time. This is because there are few elements on the soil surface such as cover, biomass, surface roughness, etc. that can differentiate infiltration rates (Figure 4b).

The hydrological behavior of the soil in this region suggests that under natural rainfall with an intensity of more than 60 mm·h⁻¹, the subsurface horizons can be infiltrated in the first few minutes of the precipitation event. After that, if the intensity of the rainfall is greater than that which enables it to infiltrate, then surface runoff is generated (Equation 2). In addition to this, by rainfall infiltrating the soil, there

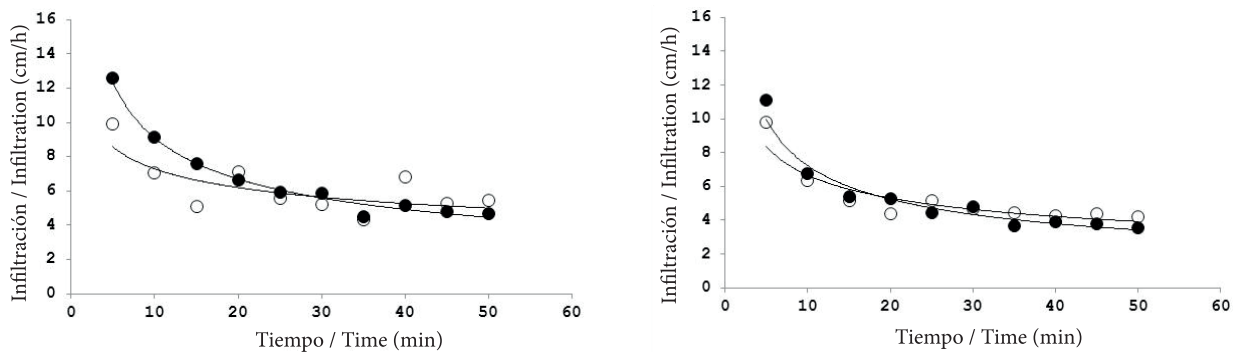


FIGURA 4. Curvas de infiltración promedio para suelos con praderas de zacate buffel (a) y pastizal nativo (b) en condición buena (°) y mala (•) en San Luis del Cordero, Dgo.

FIGURE 4. Average infiltration curves for soils with buffelgrass pastures (a) and native rangeland (b) in good condition (°) and bad (•) in San Luis del Cordero, Dgo.

altos de la cobertura del suelo por la vegetación (pasto) y por el mantillo orgánico (hojarasca, heces, etc.) depositado sobre la superficie del suelo. Estos elementos actúan como un obstáculo físico para el libre flujo o desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo (Branson *et al.*, 1981). Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los reportados por Mganga *et al.* (2010) al señalar que el hábito de crecimiento tipo amacollado del zacate buffel y la altura del follaje al momento de realizar las pruebas de infiltración favorecieron el proceso de infiltración a diferencia de lo encontrado en el sitio de pastizal nativo en el cual la escasa población de zacates y su raquíto crecimiento no influyeron al inicio de la prueba en el paso del agua a través de la superficie del suelo.

En el caso de las tasas de infiltración en áreas de pastizal nativo, se puede señalar que tanto en la condición de cobertura buena como en la mala los valores calculados de esta variable son muy similares durante todo el tiempo de la prueba. Lo anterior es debido a que son pocos los elementos sobre la superficie del suelo como la cobertura, la biomasa, la rugosidad superficial, etc. que puedan diferenciar las tasas de infiltración (Figura 4b).

El comportamiento hidrológico del suelo para esta región, sugiere que bajo lluvia natural con una intensidad de más de $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ puede ser infiltrada a horizontes sub-superficiales en los primeros minutos del evento de precipitación. Después, si la intensidad de la precipitación es mayor a la que se puede infiltrar entonces se genera el escurrimiento superficial (Ecuación 2). Aunado a lo anterior, al infiltrarse la lámina precipitada se reducen las posibilidades de erosión del suelo por el desprendimiento por la energía de la lluvia y transporte de partículas de suelo por el escurrimiento superficial (Carroll y Tucker, 2000).

En este contexto, es conveniente diseñar sistemas de pastoreo para esta región controlando la carga animal, basándose en la producción de biomasa de zacate buffel y cobertura vegetal del suelo con el propósito de incrementar la tasa de infiltración y evitar las pérdidas de suelo, principalmente cuando se presentan tormentas de alta intensidad y corta duración. La aplicación práctica de estos resultados está encaminada a presentar un valor de la velocidad y de la tasa de infiltración final como un indicador útil en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales, procurando así una productividad regional sostenible con la conservación de los recursos naturales.

En términos generales, para las dos condiciones de uso del suelo la velocidad de infiltración se puede clasificar como moderada de acuerdo a la clasificación presentada por Montenegro y Malagón (1990) ya que los valores obtenidos de esta variable fluctúan entre 2.0 a $6.6 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Es necesario realizar más investigaciones para determinar con qué tipo de prácticas de manejo se puede alcanzar la siguiente categoría de la tasa de infiltración (moderadamente rápida).

is less possibility for soil erosion due to dislodgment of soil particles by rainfall impact and their transport by surface runoff (Carroll and Tucker, 2000).

In this context, it is desirable to design grazing systems for this region that control the stocking rate, based on the biomass production of buffelgrass and the vegetation cover, in order to increase the infiltration rate and prevent soil loss, especially for when storms of high intensity and short duration occur. The practical application of these results is to provide the final infiltration rate, which is a useful indicator in natural resource management decision-making, thereby ensuring sustainable regional productivity with natural resource conservation.

Overall, for the two land-use conditions, the infiltration rate can be classified as moderate according to the classification presented by Montenegro and Malagón (1990), since the values obtained for this variable range from 2.0 to $6.6 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. Further research is needed to determine what type of management practices can achieve the next infiltration rate category (moderately fast).

CONCLUSIONS

From a hydrological standpoint, the evaluation for changing the land use from native rangeland to buffelgrass in the arid region of the state of Durango did not show statistically significant differences ($P \leq 0.05$). However, the condition of the vegetation on the soil surface (cover by grass species and cover by organic mulch) can alter the process of water infiltration into the soil. For the experimental site under the buffelgrass pasture and native rangeland conditions, the average final infiltration rate was 5.04 and $3.88 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. Although the infiltration rate is considered moderate, it is desirable to design practices for improving soil quality to increase the flow of water through the soil surface and reduce the ability of the runoff to dislodge and transport soil particles.

ACKNOWLEDGMENTS

The information presented in this document is part of the results of the project entitled "Evaluation and selection of buffelgrass materials for establishment of seasonal pastures," Key 1460, funded by the Fundación Produce Durango, A.C.

CONCLUSIONES

Desde un punto de vista hidrológico, la evaluación para cambiar el uso del suelo de un pastizal nativo al establecimiento de una pradera de zacate buffel en la región árida del estado de Durango, no representó diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). Sin embargo, la condición de la vegetación en la superficie del suelo (cobertura de las especies de zacates y la cobertura por mantillo orgánico) puede alterar el proceso de infiltración de agua en el suelo. Para el sitio experimental en las condiciones de pradera con zacate buffel y la de pastizal nativo, en promedio la tasa de infiltración final fue de 5.04 y 3.88 cm·h⁻¹, respectivamente. Aunque la tasa de infiltración es considerada como moderada, es conveniente diseñar prácticas de mejoramiento de la calidad del suelo para incrementar el paso del agua a través de la superficie del suelo y reducir la capacidad de los escurrimientos para desprender y transportar las partículas de suelo.

AGRADECIMIENTOS

La información presentada en este documento es parte de los resultados del proyecto "Evaluación y selección de materiales de zacate buffel para el establecimiento de praderas de temporal" Clave: 1460; financiado por la Fundación PRODUCE DURANGO, A.C.

LITERATURA CITADA

- Branson, F. A.; Gifford, G. F.; Renard, K. G.; Hadley, R. F. (1981). Rangeland Hydrology. Society for Range Management. Second Ed. KENDALL / HUNT PUB. CO. USA.
- Carroll, CH.; Tucker, A. (2000). Effect of pasture cover on soil erosion and water quality on central Queensland coal mine rehabilitation. *Tropical Grasslands*. 34: 254-262.
- Carlson, D. H.; Thurow, T. L.; Knight, R. W.; Heitschmidt, R. K. (1990). Effect of honey mesquite on the water balance of Texas Rolling Plains rangeland. *J. RangeManage*. 43: 491-496.
- COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero) (1979). Memorias de Coeficiente de Agostadero para Durango. Ed. Calipso S. A. México D. F. 67-117 pp.
- Damene, S.; Tamene, L., P.; Vlek, L. G. (2012). Performance of Farmland Terraces in Maintaining Soil Fertility: A Case of Lake Maybar Watershed in Wello, Northern Highlands of Ethiopia. *Journal of Life Sciences*. 6: 1251-1261.
- Epifanio, CH. R.; Singer, M. J.; Huang, X. (1991). Hydrologic impacts of oak harvesting and evaluation of the Modified Universal Soil Loss Equation. 221 – 224 p. USDA ForestService. Gen. Tech. Rep. PSW-126.
- Gamougoun, N. D.; Smith, R. P.; Wood, K.; Pieper, R. D. (1984). Soil, vegetation, and hydrological responses to grazing management at Fort Stanton, New Mexico. *J. RangeManage*. 37: 538-541.
- García-Gutiérrez, C.; Cháirez-Hernández, I.; Rivera-García, E.; Gurrola-Reyes, J. N.; González-Maldonado, M. B. (2006). Chapulines (Orthoptera: *Acridoidea*) de pastizales de la Región de los Llanos, Durango, México. *Folia Entomol. Méx.* 45 (3): 273-282.
- Herrera, A., Y.; Pámanes G.; D. S. (2006). Guía de pastos para el ganadero del estado de Durango. IPN-COCyTED – Fundación Produce Durango A. C. 290 pp.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press. New York. U.S.A.
- Huntsinger L.; Starrs, P. F. (2006). Grazing in arid North America: A biogeographical approach. *Sécheresse*. 17: 219 -233.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). (1994). Manejo y rehabilitación de agostaderos de las zonas áridas y semiáridas de México (Región Norte). AE 333 .736153 C655. Saltillo, Coah. México. 115 p.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). (2007). IV. Clasificación y nomenclatura de la vegetación de México. Consultado 29 de junio de 2012. *Disponible en:* <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/443/cap4.html>.
- Jaramillo V., V. (1994). Revegetación y reforestación de las áreas ganaderas en las zonas áridas y semiáridas de México. SARH-COTECOCA.48 p.
- Lehmann, J.; Droppelmann, K.; Zech, W. (1998). Runoff irrigation of crops with contrasting root and shoot development in northern Kenya: water depletion and above-and below-ground biomass production. *Journal of Arid Environments*. 38: 479-492.
- Lesschen, J. P.; Cammeraat, L. H.; Nieman, T. (2008). Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment. *Earth Surf. Process.Landforms*.33: 1574-1584.
- Mein, R. G.; Larson, C. L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*. 9: 384-394.
- Merzougui, M.; Gifford, G. F. 1987. Spatial variability of infiltration rates on a semiarid seeded rangeland. *HydrologicalSciences*. 32:243-250.
- Medina, G. G.; Díaz P., G.; López H., J.; Ruíz C., J. A.; Marín S., M. (2005). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango. (Periodo 1961 – 2003). Libro Técnico № 1. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC-INIFAP. 224 p.
- Mganga, K. Z.; Musimba, N. K. R.; Nyangito, M. M.; Nyariki, D. M.; Mwang'ombe, A.W. (2010). Improving hydrological responses of degraded soils in semi Arid Kenya. *Journal of Environmental Science and Technology*.3: 217-225.
- Miller, W. P. (1987). A selenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Sci. Am J*. 51: 832-834.
- Montenegro, G. H.; Malagón, C. D. (1990). Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Subdirección Agrologica. Santafé de Bogotá D. C. 812 p.
- Pierson, F. B.; Spaeth, K. E.; Weltz, M. A.; Carlson, D. H. (2002). Hydrologic response of diverse western rangelands. *J. RangeManage*. 55: 558-570.
- Quiñones-Vera, J. J.; Castellanos-Pérez, E.; Valencia-Castro, C. M.; Martínez-Ríos, J. J.; Sánchez-Olvera, T.; Montes-González, C. A. (2009). Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. *Terra Latinoamericana*. 27: 287-293.

- Reilly, J.; Tubiello, F.; MccarL, B.; Abler, D.; Darwin, R.; Fuglie, K.; Hollinger, S.; Izaurralde, C.; Jagtap, S.; Jones, J.; Mearns, L.; Ojima, D.; Paul, E.; Paustian, K.; Riha, S.; Rosenberg, N.; Rosenzweig, C. 2003. U.S. Agriculture and Climate Change: New Results. *Climatic Change* 57: 43-69.
- SAGAR. 1996. Programa de fomento de pastizales. Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero. 29 p.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1978. Estadísticas del recurso forestal de la República Mexicana. S. F. F. Dir. Gral. Inventario Forestal. pp. 6-24. México.
- SAS Institute. 1994. The SAS System para Windows 9.0. ed. SAS Inst., Cary. NC. USA.
- Scanlan, J. C.; Prinsley, R.T.; Pigott, S. J. P. ; Wakefield, F. Van DerSommen, J.; Duncan, F.; Stadler, T.; McLellan, R.; Farago, A. 1992. Retention of woody vegetation on farms in Australia: management considerations, planning guidelines and information gaps. *Agroforest. Syst.* 20: 141-66.
- Simanton, J. R.; Osborn, H. B.; Renard, K. G. 1978. Hydrological effects on rangeland renovation. Pages 331-334. *In: Proceedings of the First International Rangeland Congress.* Denver, CO. U.S.A. Society for Rangeland Management.
- Singh, V. P. 1988. Hydrologic Systems. Watershed Modeling. Vol II. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. U. S. A.
- Tromble, J. M. 1980. Infiltration rates on rootplowed rangeland. *J. Range Manage.* 33: 423-425.
- Tromble, J. M. 1988. Water budget for creosotebursh-infested rangeland. *J. of Arid Environments.* 15: 71-74.
- Turner, N. C. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *Journal of Experimental Botany.* Vol. 55: 413-425.
- Villegas D. G.; Bolaños M. A.; Olguín, P. L. 2001. *La ganadería en México.* México. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM. Plaza y Valdés Editores. S.A. de C.V. 163 p.