

Degradación física de los suelos de pastizal bajo pastoreo continuo en el Altiplano de Zacatecas



Francisco G. Echavarría Cháirez
Alfonso Serna Pérez
Rómulo Bañuelos Valenzuela
Homero Salinas González
Manuel de Jesús Flores Nájera
Ramón Gutiérrez Luna

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS**

Folleto Científico Núm. 11

Mayo del 2007

ISBN 970-43-0145-6

**SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO
RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN**

Ing. Alberto Cárdenas Jiménez

Secretario

Ing. Francisco López Tostado

Subsecretario de Agricultura

Ing. Antonio Ruíz García

Subsecretario de Desarrollo Rural

Lic. Jeffrey Max Jones Jones

Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

C. Ramón Corral Ávila

Comisionado Nacional de Acuacultura y Pesca

Dr. Everardo González Padilla

Coordinador General de Ganadería

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES,
AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Pedro Brajcich Gallegos

Director General

Dr. Sebastián Acosta Gallegos

Coordinador de Planeación y Desarrollo

Dr. Edgar Rendón Poblete

Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

Lic. Marcial A. García Morteo

Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE-CENTRO

Dr. Homero Salinas González

Director Regional

Dr. Héctor Mario Quiroga Garza

Director de Investigación

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

M. Sc. Agustín F. Rumayor Rodríguez

Director de Coordinación y Vinculación en Zacatecas

Degradación física de los suelos de pastizal bajo pastoreo continuo en el Altiplano de Zacatecas

Francisco G. Echavarría Chairez¹
Alfonso Serna Pérez²
Rómulo Bañuelos Valenzuela³
Homero Salinas González⁴
Manuel de Jesús Flores Nájera⁵
Ramón Gutiérrez Luna⁶

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS**

Folleto Científico Núm. 11

Mayo del 2007

¹ Dr. Investigador del Programa de Sistemas de Producción del Campo Experimental Zacatecas

² Dr. Investigador del Programa de Sistemas de Producción del Campo Experimental Zacatecas

³ Dr. Profesor –Investigador UAMVZ-Universidad Autónoma de Zacatecas

⁴ Dr. Director del Centro de Investigación Regional Norte Centro del INIFAP

⁵ MC. Investigador del Programa Caprinos del Campo Experimental Zacatecas

⁶ Dr. Investigador del programa de Manejo de Pastizales del Campo Experimental de Zacatecas

Degradación física de los suelos de pastizal bajo pastoreo continuo en el Altiplano de Zacatecas

**CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS
Km 24.5 Carretera Zactecas – Fresnillo
Apartado Postal N° 18
Victor Rosales, Calera, Zac, México
CP 98500
Tel: (01 478) 985-01-98 y 985-01-99
Faz: (01-478) 985-03-63**

www.inifapzac.sagarpa.gob.mx

echavarria.francisco@inifap.gob.mx

ISBN: 970-43-0145-6

CONTENIDO

	Página
RESUMEN _____	1
INTRODUCCIÓN _____	2
MATERIALES Y MÉTODOS _____	6
Descripción del área de estudio _____	6
Sistemas de pastoreo _____	7
Indicadores de la degradación física del suelo _____	8
Variables estructurales del suelo _____	8
Variables hidrológicas del suelo _____	12
Indicadores de la degradación biológica _____	13
Materia orgánica y ácidos húmicos _____	13
Análisis estadístico _____	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	15
Indicadores de la degradación física del suelo _____	15
Variables estructurales del suelo _____	15
Variables hidrológicas del suelo _____	22
Indicadores de la degradación biológica _____	24
Contenido de materia orgánica y ácidos húmicos _____	24
Erosión hídrica, escorrentía y factor C de la EUPS _____	25
CONCLUSIONES _____	30
LITERATURA CITADA _____	30
AGRADECIMIENTOS _____	35

RESUMEN

La degradación física de los pastizales del estado de Zacatecas, se debe principalmente al sobrepastoreo. El objetivo del presente estudio, fue valorar los cambios en el suelo por efecto de los sistemas de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC), con pequeños rumiantes, sobre indicadores de degradación física, como son: variables estructurales e hidrológicas y de degradación biológica (contenido de materia orgánica del suelo, erosión hídrica y escorrentía). El estudio se realizó en terrenos de pastizal del ejido Pánuco, Zacatecas, del año 2002 a 2005. El área presenta una precipitación promedio de 400 mm y suelos arenosos, realizándose el monitoreo de diversas variables de suelo en un sitio cercado de 53 ha, dividido en potreros y sus alrededores. Los resultados indican, que debido al continuo pisoteo y la presión de carga animal bajo PC, los valores de densidad aparente se han incrementado (de 1.41 a 1.53 gr cm⁻¹) en los cuatro años de estudio, mientras que los de PR se han mantenido casi fijos en el valor inicial (de 1.42 a 1.43 gr cm⁻¹). Asimismo, se incrementaron los valores de resistencia a la penetración del suelo de los sitios de PC (de 14.6 a 17.9 Jcm⁻¹), mientras que en PR se mantuvieron estables (de 15 a 16.1 Jcm⁻¹), una diferencia en la porosidad (entre 4 y 5%) en PR respecto a PC y un menor tamaño medio de radio de poro (534-550 μ vs 578-592 μ), en comparación con PC (P<0.05). En las variables hidrológicas no hubo diferencias entre sistemas (P>0.05) en

sorbididad (0.54–0.6 vs 0.71-0.76 cm min^{-1/2}), en infiltración (7.1-7.6 vs 9.7-10.7cm h⁻¹), ni en rugosidad (1.03-1.21 vs 1.23-1.37 adimensional). Asimismo, no se presentaron diferencias (P>0.05) entre sistemas de pastoreo en los valores de materia orgánica y ácidos húmicos. Respecto a la erosión hídrica y escorrentía, los valores fueron sistemáticamente menores en PR que en PC bajo las condiciones de vegetación estudiadas (P<0.01). Los efectos sobre los parámetros evaluados se asociaron con incrementos en la capacidad de captación de humedad, lo que se convierte en mayor producción de material vegetativo, lo que a su vez conduce a detener la degradación física del suelo y el principio hacia la sostenibilidad del recurso suelo en los pastizales.

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos, es definida por la UNCED (1992) como “El proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir bienes y servicios”. A partir de la reunión sobre degradación de suelos realizada en Roma en 1974 (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980), se definieron seis tipos de degradación, que son: la erosión hídrica y eólica; la degradación biológica, asociada con la disminución de materia orgánica y fertilidad del suelo; la degradación química, que se refiere a problemas de acidificación y toxicidad; el exceso de sales y sodificación; y la degradación física, la cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo

(porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural). El último tipo de degradación afecta áreas agrícolas, donde el uso excesivo de maquinaria produce efectos negativos y áreas de pastizal, donde la degradación física es consecuencia del sobrepastoreo. El efecto de la degradación física es mayor al asociarse a otros tipos de degradación, ya que la física favorece el escurrimiento y la erosión hídrica, además, ésta contribuye al incremento de la degradación biológica, al reducir la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica del suelo, lo cual, agrava el efecto degradativo en los suelos e incrementa el riesgo de desertificación.

El pastoreo modifica las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y afecta los procesos hidrológicos, el ciclo de nutrientes y la producción vegetal de las áreas de pastizal (Whisenant, 1999; Beukes y Cowling, 2003; Tate *et al.*, 2004). Se ha consignado (Gifford y Hawkins, 1978; Wood *et al.*, 1978; Blackburn, 1983), que el uso racional del pastizal, favorece la recuperación de la cobertura vegetal posterior a un período de corte o consumo (pastoreo) y promueve mayor captación de la humedad vía el mejoramiento de las condiciones de infiltración del agua en el suelo. Otros estudios (Blackburn, 1983; Blackburn, 1984), han mostrado los efectos positivos o negativos de diferentes intensidades de pastoreo o la supresión temporal del mismo, sobre la producción de sedimentos en las áreas de pastizal. Además, el efecto del pastoreo sobre las condiciones del suelo puede ser diverso entre diferentes tipos

de vegetación (Blackburn *et al.*, 1982), por lo que los procesos que ocurren en el sitio podrían ser afectados por diferentes factores que dependen del tipo de comunidad vegetal (Pierson *et al.*, 2002) y manejo.

Una de las formas de manejo que se han usado para mejorar la condición de los sitios de pastizal en zonas áridas, las cuales tradicionalmente se han pastoreado de manera continua, son los sistemas de pastoreo rotacional. El uso de estos sistemas, promueve la recuperación de la cobertura vegetal y el mejoramiento de las condiciones del suelo, vía la exclusión temporal del pastoreo en un potrero, mientras que el resto de los potreros continúan pastoreándose. Los períodos de descanso y uso se van distribuyendo en espacio y tiempo hasta que finalmente, se llega a un período de recuperación por potrero, en donde la vegetación y el suelo se beneficiaron de una menor presión por parte del ganado (Holechek *et al.*, 1995; Wood y Blackburn, 1984). En estudios realizados en regiones semiáridas (Wood y Blackburn, 1984; McGinty *et al.*, 1979; Wood y Blackburn, 1981a; Wood y Blackburn, 1981b), donde se probaron varios sistemas de pastoreo, se mostró que el pastoreo rotacional ha dado las respuestas más favorables en cuanto al mejoramiento de la hidrología del sitio de pastizal, ya que incrementó la infiltración de agua en el suelo y redujo la producción de sedimentos, en comparación a los sistemas de alta intensidad-baja frecuencia, el pastoreo continuo con alta carga animal y el pastoreo continuo con carga animal moderada. Además, el pastoreo rotacional mejoró las

condiciones del suelo, ya que incrementó el contenido de materia orgánica y la estabilidad de los agregados del suelo (Wood y Blackburn, 1984).

El cambio, en las condiciones del suelo y los procesos ecológicos asociados (hidrología, ciclo de nutrientes y producción vegetal) son posteriores a cambios significativos en la vegetación del sitio de pastizal (Herrick *et al.*, 2002); de tal forma, que la presión de uso de la vegetación por el ganado en el pastoreo, puede conducir a la degradación física del suelo. No obstante, el nivel de daño debido al pastoreo no siempre será igual al aplicar una misma presión de uso sobre el pastizal, debido a que algunos suelos continuarán funcionando después del disturbio, o bien, recuperarán su función después de un tiempo (Seybold *et al.*, 1999); mientras que otros, no se recuperarán, a menos que se aplique un aporte significativo de recursos externos (Herrick *et al.*, 2002; Bestelmeyer *et al.*, 2003).

Es importante hacer notar, que el manejo del pastizal a través del control de cargas animales y el ordenamiento del uso y recuperación de la vegetación por medio de sistemas de pastoreo, ha probado ser una forma práctica para reducir el disturbio al mínimo e incrementar la resistencia y resiliencia del suelo del pastizal, mejorando su condición (Wood y Blackburn, 1984; McGinty *et al.*, 1979; Seybold *et al.*, 1999).

Conservar y mejorar la condición de los pastizales es una necesidad fundamental en el norte de México, donde la mayor parte de la superficie se dedica a la cría extensiva de ganado.

En Zacatecas, dicha superficie es mayor de 5 millones de hectáreas, las que además presentan graves problemas de sobrepastoreo y diversos niveles de degradación del suelo. El objetivo del presente estudio, fue valorar el efecto del pastoreo continuo y rotacional, con pequeños rumiantes, sobre indicadores de degradación física como variables estructurales e hidrológicas del suelo, así como su contenido de materia orgánica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El trabajo experimental se realizó en un área de pastizal de 53 ha, que se localiza entre los 22° 54' Norte y 102° 33' Oeste, a una altitud media de 2,285 msnm. La precipitación promedio anual en la región es de 400 mm. La vegetación dominante es "pastizal nativo-matorral espinoso-nopalera" (CETENAL, 1971). El área de estudio es una microcuenca, la cual cuenta con un cauce principal que es una carcava con profundidad variable de hasta 5 m. La fisiografía varía de ondulada a escarpada.

Los suelos son predominantemente arenosos (63-87%), con pH moderadamente alcalino (pH ~ 7.8), bajo contenido de nutrimentos y materia orgánica (0.1-2.7%) y presencia de sales. De acuerdo con la clasificación WRB (2006), los suelos se clasifican como Leptosoles, con una pequeña proporción de Castanozems, con un horizonte petrocálcico de profundidad variable (Serna y Echavarría, 2002).

Sistemas de pastoreo

El tratamiento pastoreo rotacional (PR) se estableció en el año 2002, en un sitio que fue excluido al ganado durante cinco años (1995-2000) y reabierto al pastoreo continuo por dos años, para finalmente en 2002 dividirlo en cuatro potreros mediante cercos internos. La carga animal en PR se calculó con base a la capacidad de carga del pastizal y basado en el conocimiento de consumo de 1.5 kg de materia seca/día por pequeños rumiantes. El pastoreo se realizó durante 216 días del año, repartido en cada una de las cuatro estaciones del año y haciendo rotación en los cuatro potreros con periodos de descanso el resto de los días. Aunque el promedio estimado de carga animal para cuatro meses del año por potrero fue de 151 cabezas de pequeños rumiantes, se decidió mantener la carga de 250 cabezas de caprinos y ovinos, sin que se presentaran problemas de suministro de forraje durante 2002 y 2003. Esto se decidió, porque hubo un incremento substancial en la materia seca disponible del estrato herbáceo y además, en el cálculo no se incluyó la materia seca proveniente de matorrales, la cual ha sido estimada en 320 kg/ha (Medina *et al.*, 2004), lo que dio un margen de confianza adicional para mantener la carga animal. En el área aledaña se aplicó el tratamiento pastoreo continuo (PC), en el cual no se controló la carga animal, ya que el área de pastoreo es comunal (ejido) y los productores manejan diferentes tamaños de hatos; sin embargo, a partir de observaciones de la distribución informal que se hace del terreno por parte de sus usuarios, solamente

cuatro pastores acostumbran utilizar esta porción de terreno, con un promedio de uso de un hato por ganadero por día, con un tamaño de hato que varió de 200 a 300 cabezas de caprinos y ovinos por día. Ésta es la forma que comúnmente son manejadas las áreas de pastoreo ejidal en el Estado, por lo que éste es considerado el tratamiento de comparación o control. Para evaluar el efecto del pastoreo en la degradación del suelo, se determinaron diversas variables del suelo directamente en campo y laboratorio. Para facilitar la descripción y el análisis, estas variables se agruparon como estructurales, hidrológicas y contenido de materia orgánica y ácidos húmicos; además, se estimó la pérdida de sedimentos como una variable integradora, que es útil para fines de comparación.

Indicadores de la degradación física del suelo

Variables estructurales del suelo

Éstas incluyen: densidad aparente, porosidad, radio de poro, compactación y textura, que fueron determinadas en los sistemas de pastoreo rotacional y continuo. La densidad aparente (Dap) de la superficie del suelo, se midió con el método del cilindro de volumen conocido (Blake, 1965), al usar aros metálicos de 12 cm de diámetro y 6 cm de altura. La vegetación viva y el material orgánico en cada sitio de muestreo fueron recortados hasta la superficie del suelo y removidos del sitio previo a la colección de muestras. En el área de PR, se determinó la Dap a través de cinco transectos totalizando 51 muestras en 2002 y 10 muestras en 2005. En el

sitio de PC se muestreo a través de cinco transectos para obtener un total de 20 muestras en el 2002 y 10 en el 2005. Cada transecto fue de longitud variable y los puntos de muestreo se ubicaron a 500 m de distancia entre ellos. El suelo obtenido en cada sitio de muestro se seco hasta peso constante a 105 °C, se calculó el volumen del aro respectivo y finalmente se estimo la Dap, de acuerdo con Brady y Weil (2000).

La porosidad y el radio de poro se determinaron al final del período de estudio. Para ello se colectaron dos muestras inalteradas por transecto, una por cada posición fisiográfica: ladera y pie de monte. Se muestrearon cinco transectos por cada sistema de pastoreo (PR y PC), para un total de 10 muestras por sistema. Las muestras inalteradas se tomaron con embudos metálicos tipo Buchner de 12 cm de diámetro, 6 cm de altura y una salida de 3.175 mm. Para obtener las muestras inalteradas de suelo, los embudos metálicos fueron insertados directamente sobre el suelo, con la ayuda de una placa circular de acero colocada sobre el fondo del embudo, la cual fue golpeada en su parte anterior con un marro de madera y promoviendo la inserción paulatina en el suelo. La muestra se extrajo excavando alrededor del embudo, para evitar alterar la muestra y finalmente se cortó al ras del borde superior del embudo. Las muestras se llevaron al laboratorio y se utilizó la técnica de Vomocil (1965), para la determinación de la distribución de porosidad. Para ello, la muestra se montó en un aro metálico sostenido por un soporte. El embudo se conectó

por medio de mangueras plásticas a una bureta graduada y se permitió la entrada de agua por gravedad a la muestra de suelo hasta saturación; una vez saturada, se inició el drenado de la misma, midiendo la cantidad de agua drenada y la altura de la muestra. El procedimiento finalizó, hasta que se presentó la entrada de aire al sistema.

Para estimar el valor de porosidad total, al finalizar el proceso anterior, la muestra se secó hasta peso constante y se estimó el volumen del embudo, cuantificándose primero la D_{ap} y después la porosidad, de acuerdo con Brady y Weil (2000). La porosidad, es la cantidad máxima de agua que pueden ocupar los espacios vacíos o poros, conocida como contenido de humedad a saturación. Como consecuencia del continuo drenado de la muestra de suelo, se obtuvieron dos columnas de valores, los que correspondieron a la humedad del suelo a partir de saturación y su decremento, y el valor de potencial matricial o tensión, a la que dicha cantidad de agua es liberada. Con el valor de potencial matricial, fue posible estimar el radio de poro. La estimación del radio de poro se basó en la relación (Brady y Weil, 2000): $r = 0.149 \text{ cm}^2/\Psi_m$, en donde r es el radio de poro, 0.149 cm^2 es una constante a partir de la ecuación de capilaridad y Ψ_m es el potencial matricial (cm). El valor inicial del cual se partió fue un valor hipotético de 1000μ de radio de poro, lo que representa un diámetro de 2000μ ó 2 mm . Los valores obtenidos representaron una distribución bivariada de radios de poros y contenido de humedad, de la cual se calcularon los momentos (media, varianza, sesgo y curtosis),

utilizando solamente el primer momento, el cual representa el valor medio del radio de poro de la distribución.

La estimación de textura del suelo en los sitios bajo estudio se realizó por el método del hidrómetro de Bouyoucos (Pulido y Del Valle, 2001). Las muestras del suelo fueron colectadas a la par, que las muestras de suelo inalteradas que se utilizaron para la determinación de radio de poros y porosidad, con el mismo esquema de muestreo.

La compactación del suelo, reportada como resistencia a la penetración, se midió bajo el principio de penetración dinámica (Davidson, 1965), con un penetrómetro de cono similar al descrito por Herrick y Jones (2002). Se realizaron mediciones de profundidad de penetración de suelo en cinco transectos con puntos a 500 m de distancia. Bajo los sitios de PR se ubicaron 51 puntos y 20 bajo el tratamiento de PC. Cada punto de muestreo fue el promedio de cinco mediciones. Las mediciones se realizaron desde marzo de 2002 hasta noviembre de 2005, siendo un total de ocho muestreos. El número de golpes de martillo se estandarizó a 10 por determinación. Los valores de profundidad de penetración se transformaron a unidades de fuerza, la cual se opone a la penetración (resistencia), mediante la fórmula siguiente (Herrick y Jones, 2002):

$$F = \frac{(n_i)(m)(g)(h)}{d_i} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: F es la energía que se opone a la penetración en Joules cm^{-1} ; n_i , es el número de golpes de martillo; m , es el peso del martillo en kg; g , es la velocidad de caída por efecto de gravedad (9.81 m seg^{-2}); h , es la altura de caída de martillo en m; y d_i , es la distancia de penetración en m. Los valores obtenidos fueron promediados y graficados a través del tiempo.

Variables hidrológicas del suelo

Éstas incluyen la sorbilidad (S) (Fuentes, 1989), infiltración acumulada a los 60' de la prueba de infiltración (I_{60}), velocidad final de infiltración (V_f) y rugosidad del suelo. Estas variables se determinaron al final del período de estudio, al utilizar el mismo esquema de muestreo usado para la determinación del radio de poro y porosidad, descrito en párrafos anteriores. Las variables S , I_{60} y V_f , se estimaron a partir de pruebas de infiltración con cilindros concéntricos (Bertrand, 1965), al utilizar una carga hidráulica, que varió de 4 a 3 cm. El cilindro interior tuvo un diámetro de 25 cm y el exterior de 40 cm; este último, es usado para proporcionar una barrera hidráulica y crear un flujo unidimensional. La vegetación viva y el material orgánico en cada sitio de prueba, fueron recortados hasta la superficie del suelo y removidos del lugar. Cada cilindro fue introducido en el suelo a una profundidad de 6 a 7 cm. Las lecturas de lámina infiltrada se fijaron a 1 cm y se registró la longitud de tiempo que tardó la lámina en infiltrarse. Un volumen de agua suficiente para recuperar la lámina de 1 cm fue aplicada inmediatamente en el cilindro interior, para recobrar la carga hidráulica de 4 cm de profundidad. Las mediciones se

realizaron una vez por sitio de muestreo. La información de campo obtenida se transformó a velocidades de infiltración (cm h^{-1}) y láminas infiltradas acumuladas parciales y totales (cm). Con los datos de los primeros 15' de la prueba de infiltración, se estimó la sorbilidad mediante el método propuesto por Sharma *et al* (1980). Al inicio de cada prueba se estimó el contenido volumétrico de humedad ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) del suelo.

Para determinar la rugosidad del suelo, se utilizó un rastrillo de 20 agujas (Kincaid y Williams, 1966). Esta variable se consignó como la desviación estándar de alturas tomadas hacia arriba o abajo de un plano arbitrario paralelo a la superficie del suelo (Pierson *et al.*, 2002). Se realizaron dos muestreos por transecto, tanto en la ladera como a pie de monte, las cuales son posiciones fisiográficas con diferente desarrollo de suelo.

Indicadores de la degradación biológica

Materia orgánica y ácidos húmicos

El contenido de materia orgánica del suelo (porcentaje con base en peso total del suelo) y su diferenciación en ácidos húmicos y huminas, se obtuvo en el laboratorio al utilizar métodos propuestos por Schnitzer (1982). El muestreo de campo para estas variables, se realizó al final del período de estudio, al utilizar el mismo esquema de muestreo para determinar el radio de poro y porosidad descrito en párrafos anteriores.

Erosión, escorrentía y factor de cobertura (C) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS)

La pérdida de sedimentos (erosión hídrica), es una variable registrada desde el inicio del estudio dentro del área de PR, pero que solo se midió en ambos sistemas de pastoreo (PR y PC) durante los años 2004 y 2005. Para ello, se utilizaron lotes de escurrimiento estándar de 3 x 22 m, equipados con colectores y tanques de almacenamiento para captar el agua escurrida y los sedimentos (Wischmeier y Smith, 1978). Los lotes se instalaron en las condiciones de vegetación nopalera densa de alta densidad (~2000 plantas/ha en promedio) y matorral espinoso de cobertura media (~1200 plantas/ha en promedio). Además, se instaló un lote de escurrimiento que se mantuvo artificialmente en condiciones de suelo desnudo, el cual proporcionó datos de erosión potencial o pérdida máxima de sedimentos y que sirvió para la estimación del factor C de la EUPS. El registro de la precipitación pluvial se obtuvo con tres pluviómetros distribuidos en las áreas de estudio. La cantidad de la precipitación y el volumen escurrido en cada una de las parcelas de esorrentía fueron registrados para cada evento. Asimismo, se tomó una alícuota por parcela, para determinar los sedimentos en suspensión ($g\ l^{-1}$). Los datos obtenidos a partir de esta información fueron pérdida anual de suelo por erosión hídrica ($kg\ ha^{-1}$), esorrentía anual ($m^3\ ha^{-1}$) y el factor C de manejo de la vegetación de la EUPS (Wischmeier y Smith, 1978).

Análisis estadístico

En el caso de muestras apareadas de transectos en ambos sistemas de pastoreo, éstas se compararon por medio de pruebas de *t* de Student y los análisis se realizaron por medio del programa SAS (1992). Para la determinación de la media en la distribución de una función bivariada de humedad y radio de poro se utilizó el programa CALMOM (Skopp y Clague, 1986), con el cual también se calcularon los momentos de una distribución acumulada de intervalos variables y de muestras puntuales. Por medio de un análisis conjunto de varianza, se analizaron los valores medidos de erosión hídrica y escurrimiento. El factor año, se ubicó como primer factor y la condición de vegetación se analizó como segundo factor, por medio de análisis de varianza. Para realizar el análisis de varianza de la erosión hídrica, los datos se transformaron a logaritmo natural, ya que éstos se distribuyen como log – normal (Giordanengo *et al.*, 2003). El análisis fue realizado con el programa SAS (1992).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Indicadores de la degradación física del suelo

Variables estructurales del suelo

Los valores medios de Dap para los sistemas de pastoreo en estudio se presentan en la Figura 1. Al inicio del período de evaluación (año 2002), las medias de Dap fueron iguales en ambos sistemas ($P>0.05$). En cambio, al final del período de

evaluación (año 2005) y después de casi cuatro años de manejo de los hatos de cabras, los valores medios de Dap fueron diferentes ($P < 0.05$), incrementándose el valor medio de la Dap en el tratamiento de PC, mientras que la media de Dap en el tratamiento PR se mantuvo en los mismos valores de 2002. Dicho incremento en la Dap en el área de PC fue de $\sim 0.12 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1).

Los valores promedio de resistencia a la penetración de la superficie del suelo para los sistemas de pastoreo bajo estudio se presentan en la Figura 2. Al inicio del período de estudio, las medias de resistencia a la penetración presentaron valores iguales ($P > 0.05$). A partir del muestreo realizado en diciembre de 2002 y hasta el final del período de estudio en noviembre de 2005, los valores promedio de resistencia a la penetración fueron diferentes ($P < 0.05$) entre los sistemas de pastoreo (15.3 vs 17.06 J cm^{-1} , PR y PC, respectivamente). El suelo del área con PC, desde el segundo muestreo en adelante, siempre mostró mayor resistencia a la penetración ($P < 0.05$) que el suelo del área en donde se manejo el hato de cabras bajo el sistema de PR (Figura 2). Además, hacia el final del estudio, los valores de resistencia se mostraron estables en el área dedicada a PR (Figura 2). Un incremento en los valores de Dap y compactación, se asocian con un decremento en la porosidad total (Warkentin, 1971) y valores de potencial matricial menos negativos.

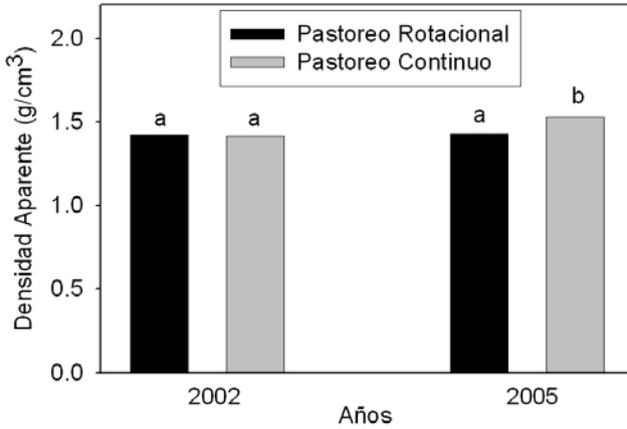


Figura 1. Valores medios de densidad aparente de la superficie del suelo en los sitios de pastoreo rotacional y continuo. Por año, medias seguidas por diferente letra son estadísticamente diferentes ($P > 0.05$).

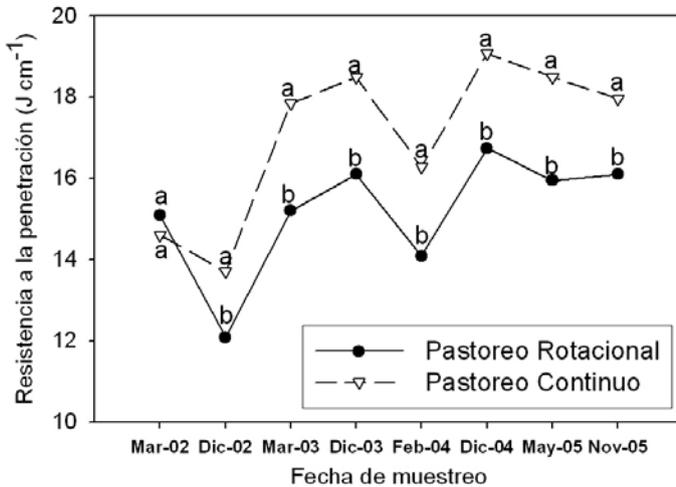


Figura 2. Medias de resistencia a la penetración del suelo en los sitios de pastoreo rotacional y continuo a través de diferentes fechas de muestreo. Por fecha de muestreo, medias seguidas por diferente letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

El Cuadro 1, muestra los valores promedio de radio de poro, porcentaje de porosidad y contenido de arena del suelo en los sitios de PR y PC, muestreados en dos posiciones fisiográficas, a través de las áreas de estudio. Los suelos ubicados en ladera, donde se practicó el PC, presentaron un promedio de radio de poro mayor ($P < 0.05$) que los suelos en la misma posición fisiográfica, en donde se realizó el PR. De manera inversa sucedió con la porosidad, presentando valores mayores en los sitios de menor tamaño de poro ($P < 0.05$), que fueron los suelos localizados en ladera. Para el caso de los suelos a pie de monte, no se encontró diferencia entre los valores promedio de porosidad y radio de poro, entre las áreas de pastoreo PR y PC. En general, los valores de tamaño de poro mayores se asociaron con valores de menor porcentaje de porosidad y éstos se ubicaron en los sitios dedicados a PC (Cuadro 1). En lo que respecta al contenido medio de arena presente en el área de estudio, éste presentó poca variación; sin embargo, a pie de monte el suelo del área en donde se practicó el PC mostró un valor medio de contenido de arena significativamente mayor ($P < 0.05$) que el suelo del área bajo PR (Cuadro 1). Esto explica los valores de mayor tamaño de poro en esta posición topográfica.

El cambio, en los valores de Dap en PC, indicó que bajo este tratamiento, el peso de suelo por unidad de superficie se incrementó; este cambio, se reflejó en una menor porosidad, lo que a su vez significó menor captación de humedad y mayor resistencia a la penetración (Figura 2). Valores de Dap entre

1.1 y 1.5 g cm⁻³, tienen poca influencia en la succión de agua por el suelo, pero valores de 1.5 a 1.7 g cm⁻³, resultan en una succión menor del suelo (Warkentin, 1971). Una característica atribuible al pisoteo de las especies animales, es la compactación de la capa superficial. Se ha establecido que conforme se incrementa la carga animal y el período de estancia del ganado en el potrero, el pisoteo continuo de los animales produce la destrucción paulatina de los agregados del suelo, provocando mayor compactación de la superficie del mismo y el incremento en la Dap del horizonte superficial (Warren *et al.*, 1986a; Tate *et al.*, 2004), reduciendo además la velocidad de infiltración y la retención de humedad e incrementando la erosión (Warren *et al.*, 1986b). De acuerdo con lo mencionado y los resultados obtenidos, se infiere que el pisoteo continuo de la carga animal aplicada ininterrumpidamente durante todo el año en PC, propició el incremento tanto en Dap, como en resistencia a la penetración; sin embargo, no se descarta que adicionalmente al sistema de PC aplicado, los periodos de descanso propios de este sistema, y un periodo de exclusión del sitio de estudio de 1995 a 2000, influyeran para producir los menores valores observados en PR.

Cuadro 1. Media y desviación estándar de radio de poro, porosidad y contenido de arena del suelo de los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) en dos posiciones fisiográficas. Pánuco, Zacatecas, México.

Variable	Ladera		Pie de monte	
	PR	PC	PR	PC
Radio de poro (10^{-3} mm)	534b ± 30	578a ± 22	550a ± 34	592a ± 52
Porosidad (%)	0.47a ± 0.03	0.42b ± 0.02	0.45a ± 0.03	0.41a ± 0.05
Contenido de arena (%)	55.9a ± 6.0	57.1a ± 8.6	54.4b ± 3.7	70.5a ± 6.2

Entre columnas y por posición fisiográfica, medias seguidas por diferente letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

En lo que respecta a los valores medios de radio de poro, éstos se asociaron con la porosidad del suelo de manera inversa, es decir, los tamaños de poro menor se asociaron con valores altos de porosidad, lo que indicó que una mayor habilidad para almacenar agua, depende de los microporos y mesoporos (Skopp, 1998a). Las diferencias en la porosidad entre los sistemas de pastoreo fueron de 4 a 5% de la humedad, con base en volumen para pie de monte y ladera, respectivamente. Esto representa mayor porcentaje de humedad a saturación en los suelos, como resultado del manejo bajo PR. Aunque no se evaluaron los valores de contenido de humedad del suelo, los valores de humedad aprovechable pudieran verse incrementados en proporción al incremento de humedad a saturación, ya que la porosidad total representa la capacidad de almacenamiento máxima de agua en el suelo (Skopp, 1998a), indicando esto una ventaja comparativa en la capacidad de almacenamiento del suelo bajo PR en relación a PC.

Asimismo, es notoria la diferencia entre valores de tamaño de poro, porosidad y contenido de arena por posición fisiográfica (Cuadro 1). Esto se explica por las diferencias en el desarrollo del suelo para cada posición. Aunque los suelos de ladera son sometidos a un proceso erosivo más intenso, éstos son de desarrollo *in situ*, mientras que los suelos ubicados al pie de monte son suelos de acumulación. El predominio de microporos y mesoporos, una mayor capacidad de almacenamiento de humedad y menor contenido de arena, son características que requieren tiempo y estabilidad para su formación, que es el caso de los suelos desarrollados *in situ*. En los suelos de acumulación como los de pie de monte, el mejoramiento de las características estructurales del suelo evaluadas requiere que los procesos de degradación o compactación sean de menor intensidad, además de que posiblemente necesiten de mayor tiempo para expresarse. La coincidencia de este grupo de indicadores en revelar un proceso paulatino de cambio, en el sentido de la degradación física del pastizal, en los sitios bajo PC; además de demostrar que el proceso de degradación física de los pastizales es permanente, también advierte que la capacidad actual y potencial de producir la biomasa vegetal se ha disminuido. Esto último, ha sido evidenciado para estos mismos sitios en un estudio paralelo (Echavarría *et al.*, 2006).

Variables hidrológicas del suelo

Los valores promedio de rugosidad y variables de infiltración asociados con los tratamientos de pastoreo para dos posiciones fisiográficas se presentan en el Cuadro 2. La rugosidad del suelo presentó sistemáticamente valores más altos en la ladera que en el pie de monte, así como en PR. Por otro lado, los valores de infiltración a los 60 minutos (I_{60}), velocidad final de infiltración (V_f) y sorbilidad (S), fueron mayores en el tratamiento PR que en PC. En todos los casos, los valores promedio no fueron diferentes estadísticamente entre tratamientos de pastoreo ($P > 0.05$), ni entre las posiciones fisiográficas estudiadas. De acuerdo con Fuentes (1989): “La sorbilidad representa la capacidad del suelo para absorber agua, debido únicamente a las fuerzas capilares bajo un contenido dado de humedad”. Esto implica una fuerte dependencia de las variables de infiltración con el tamaño de poro. Los valores altos de sorbilidad e infiltración del PR (Cuadro 2), coinciden con los valores medios menores de tamaño de poro y la posición fisiográfica de ladera. Por el contrario, valores menores de sorbilidad e infiltración se ubicaron en PC, coincidiendo con valores medios mayores de tamaño de poro y la posición fisiográfica pie de monte. De acuerdo con Skopp (1998b), una distribución ideal de porosidad en un suelo, es aquella que incluye la cantidad balanceada de micro, meso y macroporos. Valores altos de porosidad indican una mayor cantidad de agua en el suelo a saturación; sin embargo, valores altos de tamaño medio de poro, no necesariamente se asocian con valores altos

de porosidad (Ver Cuadro 1 en PR) y si pueden indicar un desequilibrio en la distribución del tamaño de poro, lo cual podría afectar la capacidad del suelo para almacenar humedad. En este caso, los valores altos de sorbilidad e infiltración son controlados por la distribución de la porosidad, en donde el tamaño medio de poro es menor. Además, esta característica se ubica principalmente dentro del tratamiento PR y en la ladera, en donde de manera natural se ha desarrollado una red de poros conectados entre si, los cuales permiten un mejor drenado del agua que se infiltra. El comportamiento opuesto se observó en el tratamiento PC ubicado a pie de monte, en donde el desarrollo de la red de poros interconectados no se ha presentado. Aunque las diferencias en las variables hidrológicas no son significativas ($P>0.05$), se aprecia que un cambio incipiente en el mejoramiento de las mismas se ha iniciado en PR y esto permite distinguir que el proceso de degradación física del pastizal bajo PC, lentamente ira reduciendo la capacidad de las variables hidrológicas, afectando la acumulación de humedad y favoreciendo la erosión hídrica y el escurrimiento, lo que finalmente se convierte en la reducción de la capacidad productiva del pastizal.

Cuadro 2. Media y desviación estándar de variables de infiltración y rugosidad del suelo de los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) en dos posiciones fisiográficas al final del estudio. Pánuco Zacatecas, México.

Variable	Ladera§		Pie de monte§	
	PR	PC	PR	PC
Rugosidad (adimensional)	1.37 ± 0.48	1.21 ± 0.88	1.23 ± 0.035	1.03 ± 0.81
Infiltración acumulada a los 60 minutos (cm)	10.4 ± 2.8	8.0 ± 2.1	11.2 ± 3.7	7.9 ± 1.3
Sorbilidad (cm min ^{-1/2})	0.71 ± 0.16	0.60 ± 0.09	0.78 ± 0.29	0.54 ± 0.06
Velocidad final de infiltración (cm h ⁻¹)	9.7 ± 2.8	7.1 ± 2.1	10.7 ± 3.4	7.6 ± 1.5

§Las medias de los valores no son estadísticamente diferentes.

Indicadores de la degradación biológica

Contenido de materia orgánica y ácidos húmicos

Los resultados de la determinación de contenido de materia orgánica y ácidos húmicos en los sistemas de pastoreo se presentan en la Figura 3. Los valores de contenido de materia orgánica en ambos sistemas de pastoreo fueron estadísticamente iguales ($P > 0.05$). Al separar los ácidos húmicos de la materia orgánica del suelo, se encontró que el contenido de los primeros en PR fue menor que en el pastoreo continuo, sin ser estadísticamente significativa dicha diferencia. Esta tendencia indica que en los sitios de PC, cuando se ha presentado una acumulación de material vegetal, éste ha sido de mayor facilidad de degradación, lo cual corresponde a un consumo continuo de material verde de menor desarrollo. Por su

parte en PR, una parte del material vegetal no llega a ser consumido por los animales y esto permite la formación de material leñoso, el cual cuando se deposita en el suelo no se degrada rápidamente. Aunque los resultados son iguales en términos estadísticos, la presencia de materiales de difícil degradación asegura una lenta mineralización de sus componentes (Sparks, 1995), y su estancia durante una longitud mayor de tiempo en el suelo, podría contribuir a mantener características físicas favorables (Dap, resistencia a la penetración y mayor captación de humedad) y coadyuvar a la sostenibilidad del pastizal.

Erosión hídrica, escorrentía y factor C de la EUPS

Los resultados de pérdida de suelo como erosión hídrica, escorrentía y factor C de la EUPS, para dos condiciones de vegetación en los sistemas de pastoreo bajo estudio se presentan en el Cuadro 3.

En el año 2004, los valores de erosión hídrica en PR bajo ambas condiciones (nopalera de alta densidad y matorral espinoso de cobertura media), fueron muy bajos (menos de 5 kg ha⁻¹); en cambio, los valores para PC fueron mayores en ambas condiciones de vegetación (30 y 357 kg ha⁻¹, respectivamente), aunque se mantuvieron dentro del intervalo de valores permisibles de erosión (~2 ton/ha/año). En ambos casos, las diferencias fueron significativas (P<0.01). En el año 2005, la diferencia de valores fue mayor (P<0.01), manteniéndose valores bajos en PR y altos (263 y 477,

nopalera de alta densidad y matorral espinoso de cobertura media, respectivamente) en el tratamiento PC. No hubo diferencia entre años ($P>0.05$).

La escorrentía superficial fue afectada de manera directa por la magnitud de la precipitación anual, encontrándose un volumen escurrido mayor en el año 2004 que en 2005, tanto para los sistemas de pastoreo, como para las condiciones de vegetación en estudio. Para la condición de matorral espinoso de cobertura media, la escorrentía superficial fue mayor ($P<0.05$) en PC que en PR durante ambos años. No se encontraron diferencias estadísticas para esta variable en la otra condición de vegetación durante el período de estudio. Los valores de erosión hídrica observados, que fueron menores a los esperados, se asocian con los niveles actuales de degradación de los sitios utilizados como parcelas de escurrimiento, los cuales han perdido los horizontes A y B, encontrándose en todos los sitios bajo estudio con horizontes C subyacente a un incipiente horizonte A de reciente formación. Esto se detectó en un estudio morfológico realizado separadamente y cuyos datos no se incluyen aquí; sin embargo, evidencian un alto grado de degradación previa por efecto de erosión hídrica.

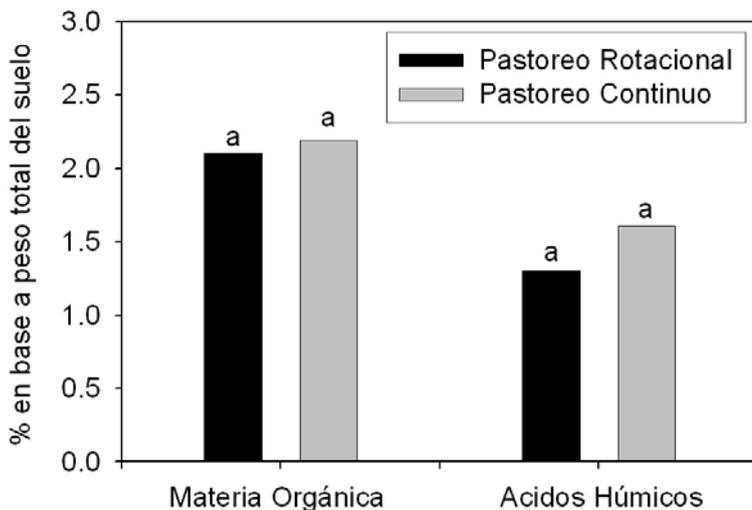


Figura 3. Medias de materia orgánica del suelo y contenido de ácidos húmicos de los sitios de pastoreo rotacional y continuo en el año 2005. Por variable, medias seguidas por diferente letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$).

La reducida capa de suelo sumado al efecto de la cobertura vegetal, impide que los valores de solutos en suspensión sean de gran magnitud, subestimando de esta manera, el nivel de degradación real que se presenta en la zona, ya que el nivel de degradación no es homogéneo. Por otra parte, los valores estimados del factor de cobertura (C) de la EUPS fueron menores para PR y altos para PC; éste es un indicador de la influencia de la cubierta vegetal en el proceso de la erosión hídrica. Los valores encontrados permiten, a pesar de su baja magnitud, distinguir la oportunidad de reducir la degradación y proporcionarle sostenibilidad al pastizal. Asimismo, muestran la necesidad de evaluar morfológicamente los suelos,

independientemente de la cobertura vegetal, y considerar en estudios futuros, la necesidad de realizar mediciones de erosión de suelos con menor nivel de degradación, permitiendo con ello, un mejor entendimiento del riesgo de sitios con menor nivel de degradación.

Cuadro 3. Pérdidas de suelo por erosión hídrica, escorrentía y factor de manejo de la vegetación C de la EUPS de los sitios de pastoreo rotacional (PR) y continuo (PC) en dos condiciones de vegetación. Pánuco, Zacatecas, México.

Condición de vegetación	Erosión (kg/ha/año)		Escorrentía (m ³ /ha/año)		Factor C de la EUPS	
	PR	PC	PR	PC	PR	PC
Año 2004 [§] (Precipitación anual = 485 mm)						
Matorral espinoso de cobertura media	4.72 ^a	356.9b	76.7a	346.1b	0.0059	0.45
Nopalera de alta densidad	4.43 ^a	30.7b	37.4a	23.4a	0.0059	0.038
Año 2005 [¶] (Precipitación anual = 269 mm)						
Matorral espinoso de cobertura media	2.4 ^a	477.1b	12.0a	200.1b	0.0011	0.208
Nopalera de alta Densidad	6.2 ^a	263.2b	20.0a	21.5a	0.0027	0.115

[§]En el 2004, la erosión potencial fue de 790.8 kg/ha/año y el escurrimiento máximo de 816.7 m³/ha/año.

[¶]En el 2005, la erosión potencial fue de 2283.5 kg/ha/año y el escurrimiento máximo de 661.7 m³/ha/año. Entre columnas, para erosión y escorrentía, medias seguidas por diferente letra son estadísticamente diferentes (P<0.05).

CONCLUSIONES

1. La degradación física del pastizal bajo pastoreo continuo, es un proceso permanente en las áreas de explotación pecuaria del estado de Zacatecas.
2. El incremento de los valores de densidad aparente, compactación y radio de poro y la disminución de porosidad, son indicadores del proceso de degradación física.
3. Los cambios en las características físicas de los sitios de pastoreo continuo disminuyeron la infiltración y aunque éstos no fueron significativamente diferentes del pastoreo rotacional, contribuyeron a incrementar la erosión hídrica y el escurrimiento.
4. El descanso y el establecimiento posterior de un sistema de pastoreo rotacional, ayudarán a reducir el proceso degradativo y será el inicio del manejo sostenible del recurso suelo del pastizal.

LITERATURA CITADA

- Bertrand A.R. 1965. Rate of water intake in the field. In: Black C.A. (ed). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy. Madison, Wis., USA; 197-209.
- Bestelmeyer B.T., J.R. Brown, K.M. Havstad, R. Alexander, G. Chavez, J.E. Herrick. 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. J Range Manage; 56(2): 114-126.
- Beukes P.C., Cowling R.M. 2003. Non-selective grazing impacts on soil-properties of the Nama Karoo. J Range Manage 56(5): 547-552.

- Blackburn W.H., R.W. Knight, M.K. Wood. 1982. Impacts of grazing on watersheds: A state of knowledge. College Station, Texas, USA. Texas Agricultural Experiment Station.
- Blackburn W.H. 1983. Livestock grazing impacts on watersheds. *Rangelands*. 5(3): 123-125.
- Blackburn W.H. 1984. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. In: *Developing strategies for rangeland management*. Nat. Res. Counc., Nat. Acad. of Sci. Westview Press, Boulder, Colorado and London, England. Pp. 927-1000.
- Blake G.R. 1965. Bulk density. In: Black C.A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy. Madison, Wis., USA. Pp. 374-390.
- Brady N.C., R.R. Weil. 2000. *Elements of the nature and properties of soil*. 12th edition. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 106pp.
- CETENAL. 1971. Carta de vegetación F-13-B-58, Zacatecas. [mapas] Comisión de estudios del territorio Nacional. Dirección de estudios económicos. Secretaría de la Presidencia. Estados Unidos Mexicanos.
- Davidson D.T. 1965. Penetrometer measurements. In: Black C.A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy. Madison, Wis., USA. 472-484pp.
- Echavarría C.F.G., R. Gutiérrez L., R.I.Ledesma R., R. Bañuelos V., J.I. Aguilera S., A. Serna P. 2006. Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un pastizal del semiárido Zacatecano. I Vegetación nativa. *Tec Pecu Méx* 2006; 44(2):203-207.
- FAO-PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Via delle Terme di Caracalla., 00100 Roma Italia. Pp 86.

- Fuentes R. C. 1989. Teoría de la infiltración unidimensional: 2. La infiltración vertical. *Agrociencia* 78:119-153.
- Gifford G.F., R. H. Hawkins. 1978. Hydrologic impact of grazing on infiltration: A critical review. *Water Resour Res.* 14(2): 305-313.
- Giordanengo J.H., G. W. Frasier y M.J.Trlica. 2003. Hydrologic and sediment responses to vegetation and soil disturbances. *J Range Manage.* 56(2):152-158.
- Herrick J.E., J.R. Brown, A.J. Tugel, P.L.Shaver, K.M. Havstad. 2002. Application of soil quality to monitoring and management: Paradigms from rangeland ecology. *Agron J.* 94(1): 3-11.
- Herrick J.E., T.L. Jones. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Sci Soc Am J.* 66: 1320-1324.
- Holechek J.L., R.D. Pieper, C.H. Herbel. 1995. Range management: Principles and practices. 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc. 526 pp.
- Kincaid D.R., G. Williams. 1966. Rainfall effects on soil surface characteristics following range improvement treatments. *J Range Manage.* 19:346-351.
- McGinty W.A., F.E. Smeins, L.B. Merrill. 1979. Influence of soil, vegetation and grazing management on infiltration rate and sediment production of Edwards Plateau rangeland. *J Range Manage.* 32(1): 33-37.
- Medina G.,G., R. Gutiérrez L., E. Acosta D., M. Tiscareño L., A.D. Báez G., F.G. Echavarría C. 2004. Sistema de monitoreo agroclimático y predicción de cosechas para el estado de Zacatecas. 4^o informe trimestral de investigación. INIFAP-CIRNOC-CEZAC.
- Pierson F.B., K.E. Spaeth, M.A. Weltz, D.H.Carlson. 2002. Hydrologic response of diverse western rangelands. *J Range Manage.* 55(6): 558-570.
- Pulido A. R., F.H. Del Valle. 2001. Instructivo para el análisis de suelos y aguas para riego. Departamento de irrigación, Chapingo, México.
- SAS. 1992. SAS/STAT Users' Guide. (Release 6.08). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc.
- Schnitzer M. 1982. Organic matter characterization. In: Page AL (ed). *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties.* 2nd ed. Agronomy Monograph

- Series. American Society of Agronomy. Madison, Wis., USA. 581-594pp.
- Serna P.,A, F.G. Echavarría C. 2002. Caracterización hidrológica de un pastizal comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. I. Pérdidas de suelo. *Téc Pecu Méx.* 40(1): 37-53.
- Seybold C.A., J.E. Herrick, J.J. Brejda. 1999. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci.* 164(4): 224-234.
- Sharma M.L., G.A. Gander, C.G. Hunt. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J of Hidrol.* 45: 101-122.
- Skopp, J., F. Clague. 1986. Calculation of Statistical moments. Lincoln NE, USA. University of Nebraska.
- Skopp J. 1998a. Physical properties of primary particles. Chapter 1 in *Handbook of Soil Science*. CRC Press.
- Skopp J. 1998b. Physical concepts of soils. Class notes. Chapter 6. University of Nebraska - Lincoln. Lincoln, NE.
- Sparks D.L. 1995. Environmental soil Chemistry. Academic Press Inc. San Diego, California, USA.
- Tate K.W, D.M. Dudley, N.K. McDougald, M.R. George. 2004. Effect of canopy and grazing on soil bulk density. *J Range Manage.* 57(4): 411-417.
- UNCED (1992). Earth summit agenda 21: Programme of action for sustainable development. New York. United Nations Department of public information.
- Vomocil J.A. 1965. Porosity. In: Black C.A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy. Madison, Wis., USA. 299-314.
- Warkentin, B.P. 1971. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. P 126-153. IN: Burnes KK (ed) *Compaction of agricultural soils.* ASAE. St. Joseph. MI.
- Warren S.D., M.B. Nevill, W.H. Blackburn, y N.E. Garza. 1986a. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Sci Soc Am J.* 50(5): 1336-1341.
- Warren, S.D., W.H. Blackburn, y C.A.Taylor Jr. 1986b. Soil hydrologic response to number of pastures and stocking density under intensive rotation grazing. *J. Range Manage.* 39: 500-504.

- Whisenant, S.G. 1999. Repairing damaged wildlands: A process-orientated, landscape-scale approach. Cambridge, U.K: Cambridge University Press. 312.
- Wischmeier W.H., D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric., Handbook 537, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. USA. 58pp.
- Wood M. K., W.H. Blackburn, F.E. Smeins, W.A. McGinty. 1978. Hydrologic impacts of grazing systems. In: Proceedings of the First Internat. Range Congr. Soc. Range Manage., Denver, Colorado. 298-291pp.
- Wood M.K., W.H. Blackburn. 1981a. Sediment production as influenced by livestock grazing in the Texas Rolling Plains. *J Range Manage.* 34(3): 228-231.
- Wood M.K., W.H. Blackburn. 1981b. Grazing systems: Their influence on infiltration rates in the Rolling Plains of Texas. *J Range Manage* 34(4): 332-335.
- Wood M.K., W.H. Blackburn. 1984. Vegetation and soil responses to cattle grazing systems in the Texas Rolling Plains. *J Range Manage* 1984; 37(4): 303-308.
- WRB. IUSS Working group. 2006. World reference base for soil resources. 2nd edition. World soil resources reports No. 103. FAO, Rome, Italy.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la cooperación de los miembros del Ejido Pánuco, en Pánuco Zacatecas, en especial al presidente del Comisariado ejidal, el Sr. Delfino López Rodríguez, quienes permitieron la realización de este estudio en los terrenos de su propiedad.

También se agradece el apoyo del personal técnico del Campo Experimental Zacatecas, el Sr. Manuel de Haro Pinedo.

El financiamiento parcial para esta investigación fue otorgado por la Fundación Produce Zacatecas A.C. a través de los proyectos FPZ/017 y FPZ/072. Asimismo, se contó con financiamiento del Fondo Internacional para el Desarrollo de la Agricultura (International Fund for Agricultural Development, IFAD) y del Centro Internacional para la Investigación Agrícola en Zonas Áridas (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas, ICARDA).

Revisión Técnica y Edición:

Dr. Uriel Figueroa Viramontes
Dr. Miguel Ángel Flores Ortíz
MC. J. Ricardo Gutiérrez Sánchez
Dr. Ramón Gutiérrez Luna

Campo Experimental Zacatecas
Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo
Apartado Postal No. 18
Víctor Rosales, Calera, Zacatecas, 98500

Tele: (478) 9 85 01 98 y 9 85 01 99
Fax: (478) 9 85 03 63

Correo electrónico: direccion@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Página WEB: <http://www.inifapzac.sagarpa.gob.mx>

Esta publicación se terminó de imprimir el 31 de Mayo del 2007, en la ciudad de Víctor Rosales, Calera, Zacatecas, México.
Su tiraje constó de 1000 ejemplares.

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN | **SAGARPA**



FUNDACIÓN
PRODUCE *Zacatecas* A.C.