

DOI: 10.24850/j-tyca-14-06-08

Artículos

**Impacto del uso del rodillo aireador para la siembra de
pasto en el proceso hidrológico de una cuenca con
lluvia natural y en condiciones de lluvia simulada**

**Land imprinter hydrological impacts for grasslands in a
watershed with natural rainfall and rainfall simulation**

Azucelli Maythe Mauricio-Pérez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8467-2549>

Ignacio Sánchez-Cohen², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9063-7114>

Aurelio Pedroza-Sandoval³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8008-8641>

Miguel Agustín Velásquez-Valle⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8793-5543>

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Durango, México, mauricioazucelli@hotmail.com

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Gómez Palacio, Durango, México, sanchez.ignacio@inifap.gob.mx



³Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Durango, México, apedroza@chapingo.uruz.edu.mx

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigaciones Noreste, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, miguel60vv@yahoo.com.mx

Autor para correspondencia: Ignacio Sánchez-Cohen, sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

Resumen

La investigación se realizó en la Región Hidrológica 36 (ríos Nazas-Aguanaval), zona árida del norte de México. En 2017, parte de la cuenca fue alterada durante el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) con rodillo aireador (RA). El objetivo de esta investigación fue proponer un marco metodológico para integrar y analizar la información experimental de una cuenca de zonas áridas. El impacto del RA se cuantificó mediante el uso de simulador de lluvia *in situ* en el área de la cuenca. Los resultados indican que el empleo de RA provoca un retraso en el inicio del escurrimiento. De igual manera, la producción de escurrimiento fue menor en la parcela donde se utilizó el RA, con una producción media de $0.000004 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que la producción media de escurrimiento en las parcelas bajo condiciones naturales (testigo) fue de $0.000016 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Además, la producción de sedimentos en la parcela con paso de RA fue significativamente mayor en la producción de sedimentos, con un valor medio de 833 mg l^{-1} ; en tanto que en la parcela

experimental bajo condiciones naturales, la producción media de sedimentos fue de 470 mg l^{-1} . Se infiere que las microdepresiones causadas por el RA capturaron el agua de lluvia ejerciendo una mayor retención del líquido en el suelo, lo cual redujo la escorrentía y aumentó la infiltración de agua en la cuenca. Los hallazgos muestran que, debido al tamaño, la cuenca (158.87 ha) es muy sensible a los cambios en los regímenes de precipitación y la cubierta vegetal.

Palabras clave: cobertura vegetal, rodillo aireador, microdepresiones, simulador de lluvia, escurrimiento, sedimentos.

Abstract

The research was carried out in Hydrological Region 36 (Nazas-Aguanaval rivers), arid land in northern Mexico. In 2017, part of the watershed was altered during the establishment of buffel grass (*Cenchrus ciliaris L.*) with the land imprinter (AR). The objective of this research was to propose a methodological framework to integrate and analyze the experimental information of a watershed in arid lands. The impact of the AR was measured by using an in situ rainfall simulator in the watershed area. As a result, the use of AR caused a delay in the onset of runoff. The production of runoff was lower in the plot under conditions of passage in the soil of the AR, with an average production of $0.000004 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, while the average production of runoff in the plots under natural conditions (control) was $0.000016 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Additionally, the production of sediments in the plot with AR passage was significantly higher in the production of sediments with an average value of 833 mg l^{-1} , while in the experimental

plot under natural conditions, the average production of sediments was 470 mg l⁻¹. It is inferred that the microdepressions captured the rainwater exerting greater retention of the liquid in the soil, which reduced the runoff and increased the infiltration of water in the watershed. The results show that, due to its size, the watershed (158.87 ha) is very sensitive to changes in precipitation regimes and vegetation cover.

Keywords: Vegetation cover, land imprinter, micro depressions, rainfall simulator, runoff, sediments.

Recibido: 01/02/2022

Aceptado: 06/06/2022

Publicado online: 07/07/2022

Introducción

En México, los principales tipos de degradación del suelo son la erosión hídrica, eólica y química, siendo la erosión hídrica la más importante (Bolaños *et al.*, 2016). Algunos problemas de degradación del suelo son la pérdida de estructura del suelo, disminución de materia orgánica y nutrientes del suelo, reducción de la disponibilidad de agua en el suelo, y también aumento de sedimentos en la red de drenaje de las cuencas hidrográficas que reducen la capacidad de transporte y calidad del agua (Ffolliott, Brooks, Neary, Tapia, & Garcia-Chevesich, 2013).

Las zonas áridas y semiáridas son ecosistemas frágiles donde se incrementa la necesidad de estudios sobre el funcionamiento de las aguas pluviales y superficiales en relación con la presión que ejercen los diferentes sistemas productivos (Esquivel-Arriaga, Bueno-Hurtado, Sánchez-Cohen, Velásquez-Valle, & Muñoz-Villalobo, 2015). La fragilidad de estos ecosistemas tiene su origen de la escasa y errática precipitación pluvial, baja cobertura vegetal, altos índices de erosión del suelo y baja diversidad biológica, entre otros (FAO, 2021).

El impacto en la degradación de los recursos naturales de estas regiones de alta vulnerabilidad se ha agudizado debido a la explotación intensiva de estos recursos por cuestiones antrópicas y naturales, estas últimas derivadas del impacto ambiental por efecto del cambio climático (Forero, Saldarriaga, & Vargas, 2017). Lo anterior hace necesario la aplicación sistemática de estrategias de planeación, uso y manejo integral de los recursos naturales con visión de cuenca hidrológica como unidad de estudio (Cotler-Ávalos, Galindo-Alcántar, González-Mora, Pineda-López, & Ríos-Patrón, 2013).

La importancia de la caracterización de la cuenca radica en que el balance hídrico de la cuenca puede verse alterado por factores como el clima, la geología, la hidrografía, la topografía, el tipo de suelo y vegetación, y las actividades agrícolas (Pereira, Almeida, Martínez, & Rosa, 2014; Alvez, Mello, Colombo, & Cuartas, 2017).

A partir de la caracterización de cuencas hidrográficas y el análisis de la información, Sánchez, Velásquez, Esquivel, Bueno y Pedroza (2015) demostraron que la estimación cuantitativa del balance hídrico debe desarrollarse en cuencas hidrográficas experimentales donde se puedan

controlar variables "modificables". Por otro lado, un método para revertir la degradación de suelo es mediante la reducción del escurrimiento del agua y la mejora en la infiltración del agua en el suelo; esto es posible con el aumento de la cubierta vegetal de la superficie del suelo (Sastre, Bienes, García, & Cuevas, 2016).

Una técnica empleada para revertir la degradación del suelo es el rodillo aireador. El rodillo aireador fue desarrollado con el objetivo de revegetar suelos degradados mediante la impresión de la tierra (genera un aumento del almacenamiento del agua) y la siembra simultánea de semillas de algunas plantas (Clary, 1989).

En áreas de pastizal, una de las maneras de cómo se puede alterar el balance hidrológico es a través de la manipulación de la vegetación nativa. En la actualidad, con el propósito de incrementar la disponibilidad de forraje en las zonas semiáridas y áridas se ha considerado el uso del rodillo aireador para el establecimiento de zacates y la rehabilitación de los pastizales deteriorados (Berlanga, Beltrán, Martínez, Hernández, & Torres, 2009). El objetivo de este estudio es proponer un marco metodológico para integrar y analizar la información experimental de una cuenca de zonas áridas, referente al impacto del manejo de sus recursos naturales sobre la respuesta hidrológica y la producción de sedimentos.

Materiales y métodos

Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio es una cuenca experimental dentro del municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango, México. Se ubica en la Región Hidrológica 36 (ríos Nazas-Aguanaval), entre las coordenadas 25° 15' 00" a 25° 31' 00" de latitud norte y 104° 07' 00" a 104° 33' 00" de longitud oeste, a una altura de 1 508 msnm (Esquivel-Arriaga *et al.*, 2015; Yáñez *et al.*, 2018).

La superficie de la cuenca es de 158.87 ha (Figura 1). Las temperaturas máximas ocurren de mayo a agosto, alcanzando 40 °C, mientras que las temperaturas más bajas, que rondan los 0 °C, comienzan en diciembre y terminan en marzo (Bueno, Sánchez, Esquivel, Velásquez, & Inzunza, 2013).

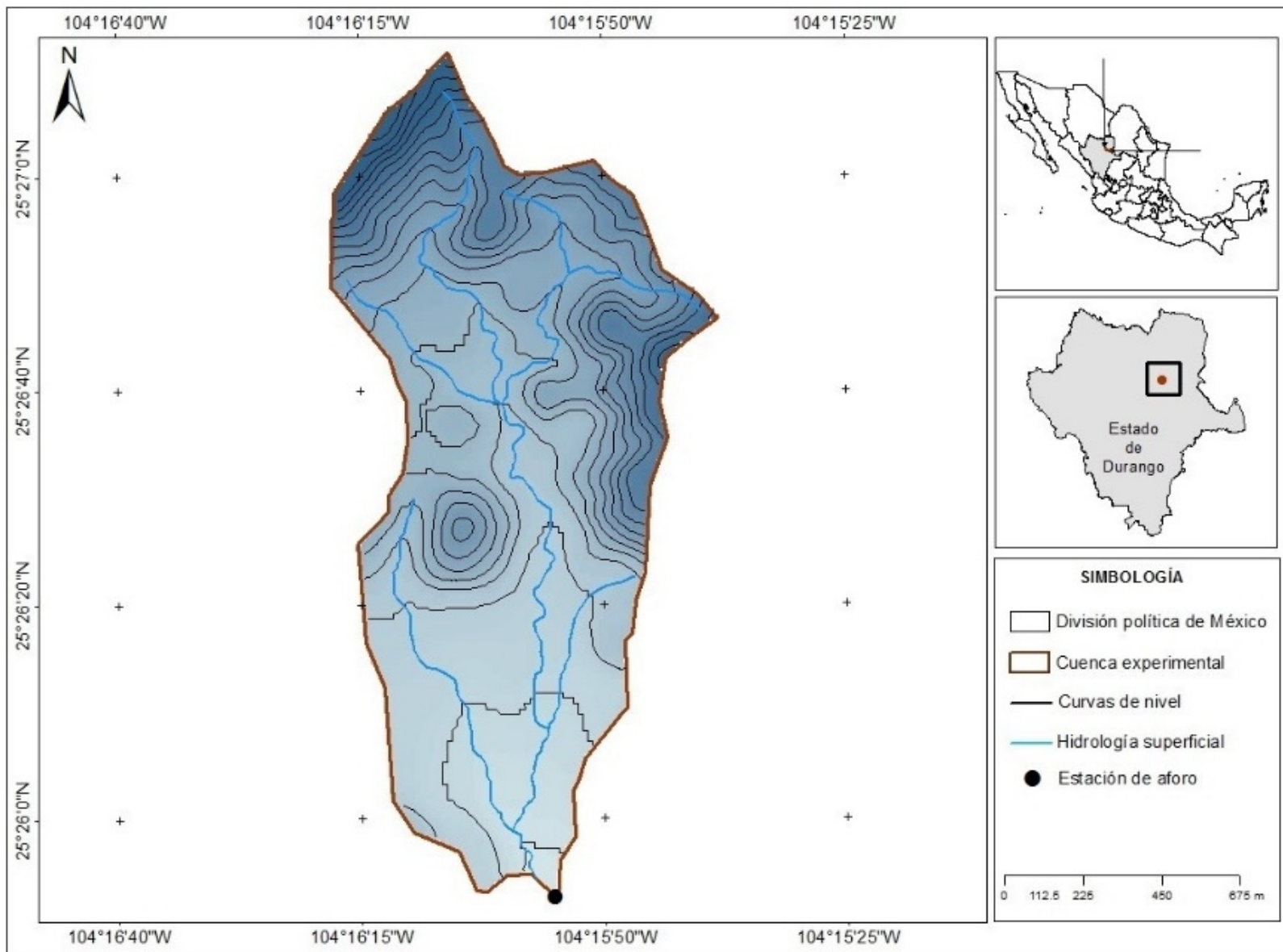


Figura 1. Cuenca experimental San Luis del Cordero en la región hidrológica No36 en el estado de Durango.

El clima predominante es de semiseco a semicálido seco, con altitudes que oscilan entre 1 300 y 1 900 msnm, con una precipitación

media anual de 360 mm (Castillo *et al.*, 2009), por lo que en el ejido San Luis del Cordero, el desarrollo de la actividad agrícola se ve limitada por el factor agua. La clase de textura representativa del suelo en la cuenca es franco arenoso con vegetación tipo matorral desértico (INEGI, 2016). Los componentes de la cobertura superficial del suelo son roca (26.85 %), suelo desnudo (52.4 %), materia orgánica (4.44 %) y vegetación (15.92 %) (Sánchez, Pedroza, Velásquez, Bueno, & Esquivel, 2018).

San Luis del cordero es un área ganadera, representando la ganadería el 45 % de sus ingresos económicos. Aunque hay una gran emigración de sus pobladores, los hatos ganaderos se mantienen, lo que genera un pastoreo excesivo y la disminución de los pastizales; el periodo de pastoreo en el agostadero comunal se realiza en promedio durante 6.3 meses al año (junio-diciembre); a pesar del intento de incrementar el número de ganado, esto se ha visto limitado por la falta de pastizal (Castillo *et al.*, 2009).

En 2017, en partes de la cuenca se utilizó el rodillo aireador para sembrar pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), a fin de incrementar la disponibilidad de forraje, incrementando la cobertura vegetal y alterando propiedades físicas del suelo. Esta práctica implica eliminar parte de la vegetación nativa (Figura 2).



Figura 2. Uso del rodillo aireador para la siembra de pasto buffel en áreas de la cuenca experimental.

En 2017, el rodillo fue usado en la cuenca para establecer pasto buffel y captar de agua de lluvia en 24 ha de la cuenca, lo que representa el 15 % de su superficie (Figura 3).

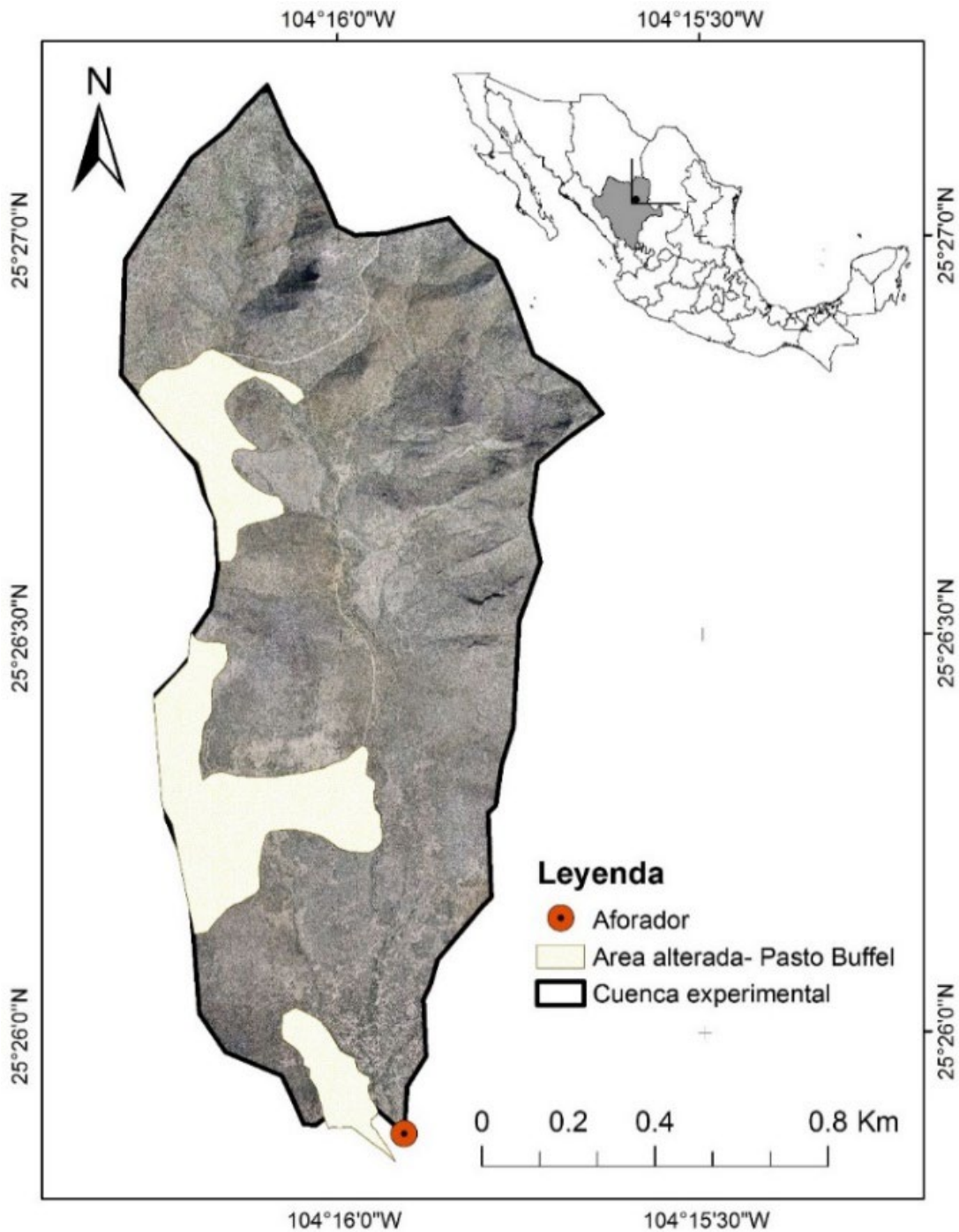


Figura 3. Superficie sembrada con pasto buffel en la cuenca San Luis del Cordero.

Descripción de los procesos hidrológicos en la cuenca

Precipitación pluvial

Las mediciones de precipitación en la cuenca iniciaron en 2016 y del escurrimiento empezaron en 2017. Para medir los eventos de lluvia dentro de la cuenca se instalaron tres pluviómetros (HOBO-Tipping-Bucket®), con una programación de registros cada minuto en temporada de lluvia y cada hora para el resto del año (Figura 4); los pluviómetros tienen una precisión de 0.2 mm por pulso y una capacidad de registrar intensidades de lluvia de hasta 127 mmh⁻¹; los pluviómetros se dispusieron en la cuenca tomando como criterio de instalación la representatividad de la altitud, tipo de vegetación y suelos.



Figura 4. Recopilación de la información pluviométrica en la cuenca San Luis del Cordero.

Considerando los criterios anteriores para la instalación de los pluviómetros, los tres pluviómetros quedaron ubicados en partes de la cuenca donde no se usó el rodillo aireador, esto ayudó a que los pluviómetros no quedaran en lugares expuestos al ganado o paso de la maquinaria que pudiera dañarlos. De modo que con respecto a la intensidad de la lluvia en diferentes partes de la cuenca, falta hacer este análisis siempre y cuando exista al menos un pluviómetro en cada condición (alterada por el uso del rodillo y con vegetación nativa).

Escurrimiento superficial

Las mediciones de escurrimiento en el sitio de estudio se iniciaron en 2017, utilizando un aforador rectangular con una sección hidráulica y una relación altura-volumen conocida (Figura 5). El aforador tiene un ancho de 1.76 m, una longitud de 4.8 m, una altura de 1 m y una pendiente de 0.20 %, que fue diseñado para forzar el tránsito del escurrimiento a través de una estructura de geometría conocida que facilita el monitoreo del tirante hidráulico y la conversión del flujo (Q) por unidad de tiempo. La estación de aforo se ubicó en la parte baja de la cuenca experimental.



Figura 5. Sección hidráulica del aforador a la salida de la cuenca experimental.

Las lecturas de la altura del flujo se realizaron utilizando una escala pintada en la pared del aforador con precisión de un centímetro. Las mediciones de la altura del flujo se registraron cada minuto al comienzo del escurrimiento, luego cada cinco minutos. Una vez que se obtuvieron tres lecturas consecutivas similares, se asumía que el hidrograma había alcanzado el punto de estabilización y las lecturas de la altura del flujo se registraron cada cinco minutos hasta el final del evento de escorrentía.

Posteriormente, las lecturas se correlacionaron con la curva de calibración del canal para calcular la tasa de escurrimiento (m^3s^{-1}) (Figura 6). Se tomó una muestra de un litro de escorrentía en cada lectura para estimar la carga de sedimentos de cada evento de escorrentía. La información hidrológica presentada corresponde al año 2017, en el cual se registraron tres eventos de lluvia en la cuenca: el primero el 4 de agosto, el segundo el 17 de agosto por la mañana y el tercero el 17 de agosto por la tarde.

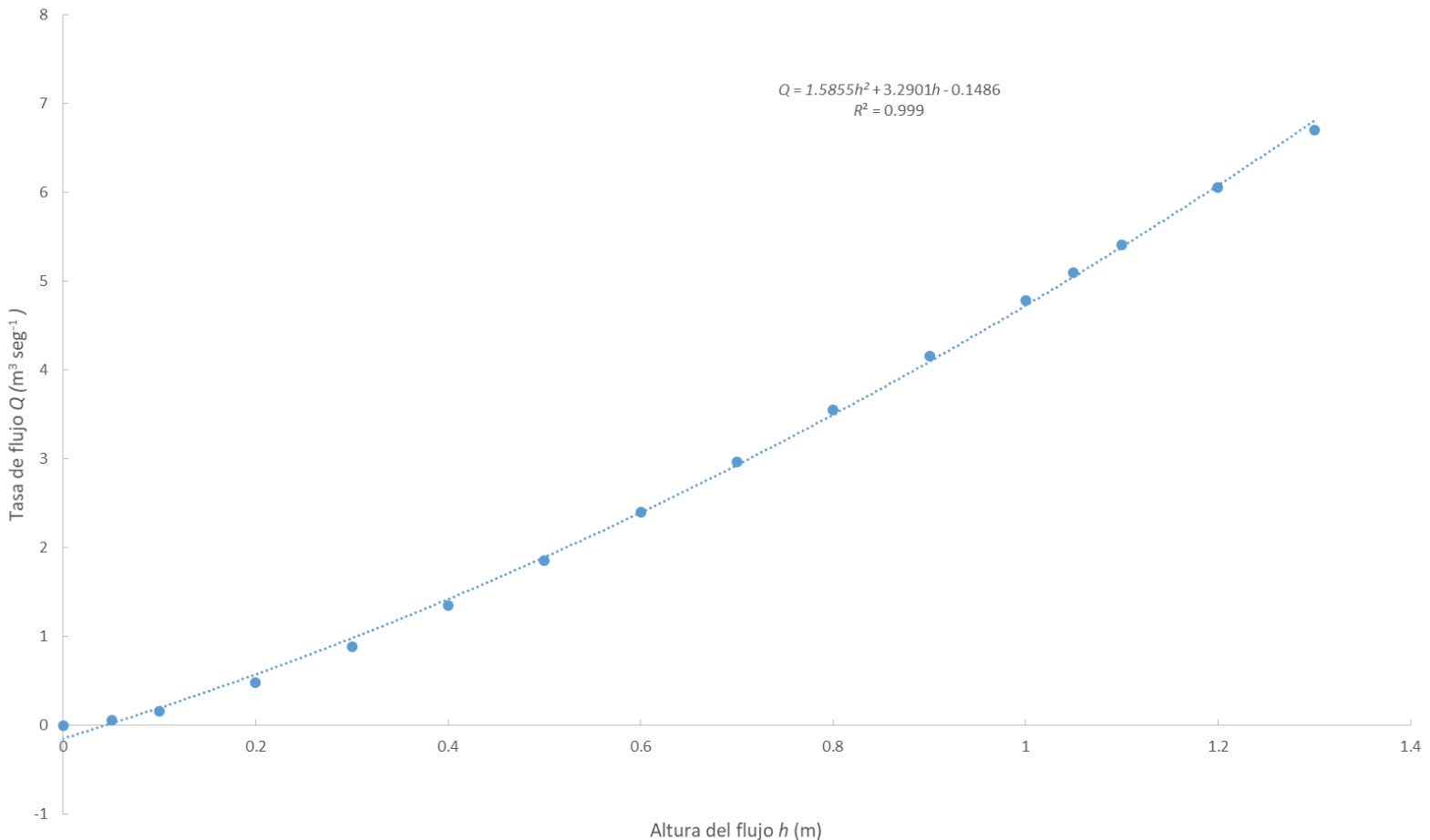


Figura 6. Relación entre la altura del tirante hidráulico y la tasa de flujo en la sección de aforo de la corriente principal de la cuenca.

Simulación de lluvia en la cuenca

Para determinar el impacto del rodillo aireador sobre los procesos hidrológicos de la cuenca se hizo un estudio de simulación de lluvia en 2018, en áreas donde se usó el rodillo aireador y áreas donde no fue utilizado (Figura 7).



Figura 7. Simulador de lluvia en la cuenca.

Se empleó el simulador de lluvia Miller modificado, que tiene tres electroválvulas para controlar la intensidad de la lluvia (Miller, 1987, modificado por Velásquez, Esquivel, Bueno, Sánchez, & Flores, 2014). Las simulaciones de lluvia se llevaron a cabo en parcelas de escurrimiento experimentales bajo dos tratamientos: área donde se utilizó el rodillo aireador (rodillo) y áreas donde no se utilizó (condición natural). Para cada tratamiento se consideraron dos contenidos antecedentes de humedad: seco (al momento de la primera simulación) y húmedo (24 horas después de la primera simulación). La aplicación de la lluvia simulada fue con una intensidad de 60 mm.h^{-1} .

Las parcelas experimentales fueron de 1 m de ancho por 3 m de largo; cada parcela con una caja para recolectar la esorrentía. Antes de iniciar la simulación de lluvia, cada parcela fue etiquetada, se midió el microrrelieve de la capa superficial del suelo, se caracterizó la cobertura del suelo y se midió la temperatura tanto del ambiente como del suelo dentro de la parcela (Figura 8). Aunque la cuenca tiene pendientes pronunciadas que hace a los suelos susceptibles a erosión (Muriel & Trujillo, 2013), la variable pendiente no fue considerada como fuente de variación de los resultados de la simulación de la lluvia, ya que la pendiente fue la misma en los tratamientos.



Figura 8. Caracterización de parcelas experimentales.

Una vez iniciado el escurrimiento, se cuantificó el volumen escurrido cada minuto y después cada dos minutos; en función de la disponibilidad de volumen escurrido se tomaron muestras de un litro para determinar la concentración y cantidad de sedimentos (Figura 9).



Figura 9. Simulación de lluvia y toma de muestra del escurrimiento.

Resultados

Cuenca experimental

La precipitación media anual para 2016 fue de 502 mm y se tuvieron 68 días de lluvia. Para 2017 se tuvieron 43 días de lluvia, con una precipitación media anual de 288 mm. Para 2016 y 2017, las temperaturas máxima y mínima promedio anual fueron 29 y 11 °C, respectivamente.

La relación precipitación-escurrimiento de la cuenca se observa en la Figura 10, donde se puede apreciar un cambio en el comportamiento

de la escorrentía. Para 2016, donde la cuenca tiene sus condiciones naturales, el escurrimiento da inicio con una precipitación de 9 mm; mientras que para 2017, el escurrimiento da inicio con 6 mm de precipitación. Además, en condiciones naturales, una precipitación de 10 mm produjo una escorrentía de 0.99 mm, mientras que para 2017 una precipitación de 10 mm produjo un escurrimiento de 0.1 mm.

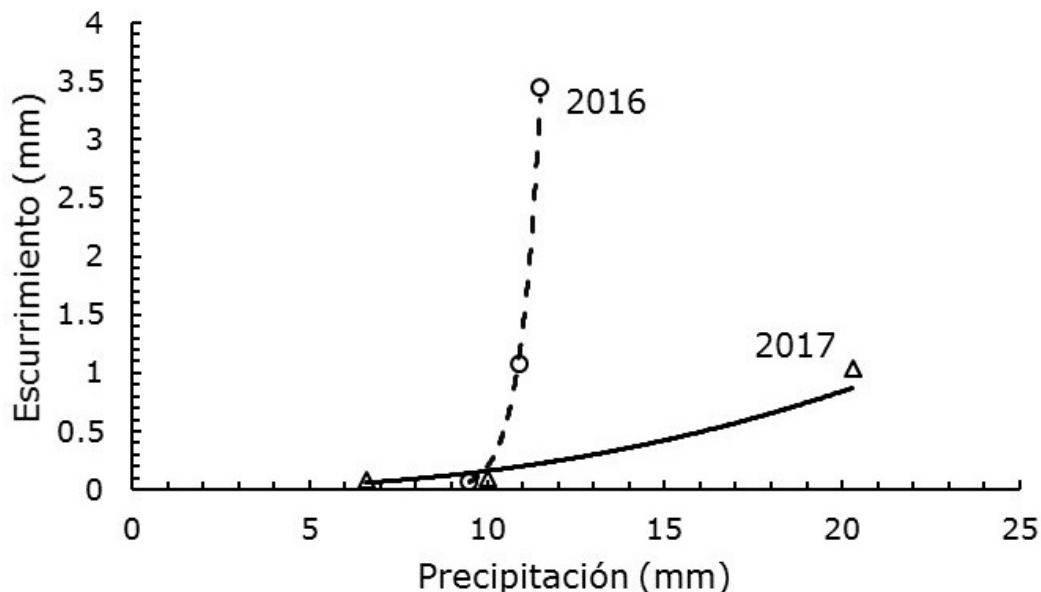


Figura 10. Relaciones precipitación-escurrimiento del año 2016 (sin rodillo aireador) y 2017 (con rodillo aireador).

De lo anterior se puede asentar que el uso del rodillo produjo un adelanto en el inicio de la escorrentía; pero, por otro lado, la escorrentía en la cuenca después del uso del rodillo disminuyó. La Figura 11 muestra los resultados de la concentración de sólidos en suspensión y el hidrograma de tres eventos de escorrentía ocurridos durante 2017; el

evento de mayor precipitación corresponde al 17 de agosto por la tarde. Este evento duró 1 hora y 26 minutos, mientras que los eventos del 4 y 17 de agosto por la mañana tuvieron una duración aproximada de 1 hora.

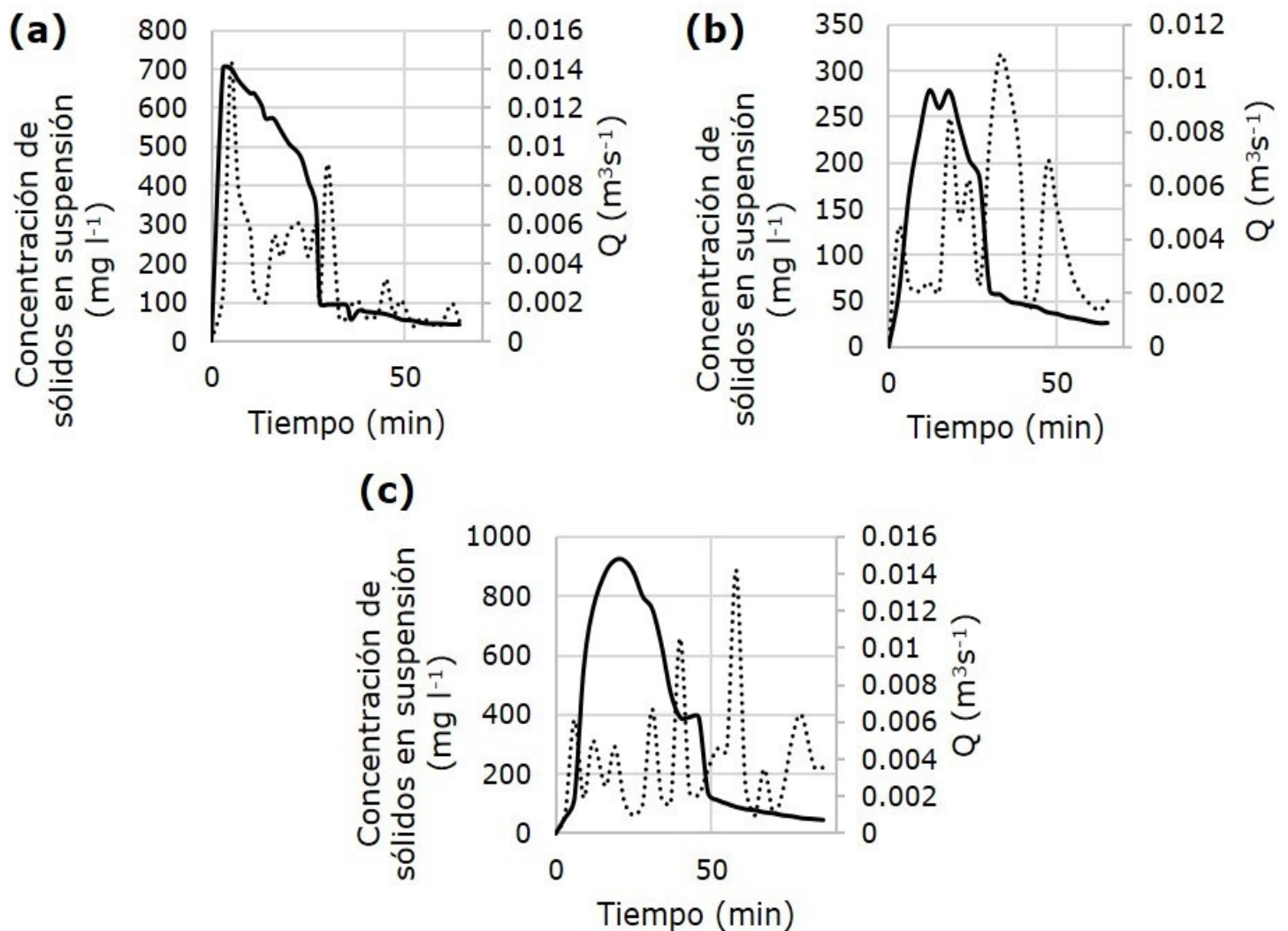


Figura 11. Concentración de sólidos en suspensión (línea punteada) e hidrograma (línea continua) durante tres eventos de 2017: a) 4 de agosto, b) 17 de agosto por la mañana y c) 17 de agosto por la tarde.

Los eventos de lluvia del año 2017 muestran un comportamiento similar del hidrograma. En el caso del evento del 17 de agosto por la tarde, hay una mayor producción de sedimentos, lo cual se debe a la mayor cantidad de precipitación y la humedad antecedente del suelo. Por otro lado, el evento del 4 de agosto con la condición de suelo seco al inicio de la lluvia mostró una menor producción de sedimentos.

Simulación de lluvia

De la caracterización de las parcelas se cuantificó el contenido de materia orgánica total en la superficie de la parcela y las temperaturas tanto ambientales como la del suelo (Tabla 1). Se observan temperaturas que varían de 27 a 56 °C en el suelo seco, y de 25.7 a 42 °C en suelo húmedo. Por otra parte, el contenido de materia orgánica fue mayor para las parcelas con el uso del rodillo (2.028 %), principalmente en la repetición 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de las parcelas: R1, R2 (número de repetición), N (condición natural), R (rodillo).

Parcela	Materia orgánica (kg)	Temperatura Suelo seco (°C)		Temperatura Suelo húmedo (°C)	
		Ambiente	Suelo	Ambiente	Suelo
R1N	1.02	35.6	56	36.6	42
R1R	2.028	34.6	34.2	39.6	37.2
R2N	0.28	27.6	27	31	25.7
R2R	0.312	39.8	47.6	38.2	35.8

A partir de las simulaciones de lluvia, se obtuvo la producción de escurrimiento y sedimentos en las parcelas experimentales con el efecto del rodillo y sin efecto del rodillo (condición natural) bajo condiciones de suelo seco y suelo húmedo (Figura 12).

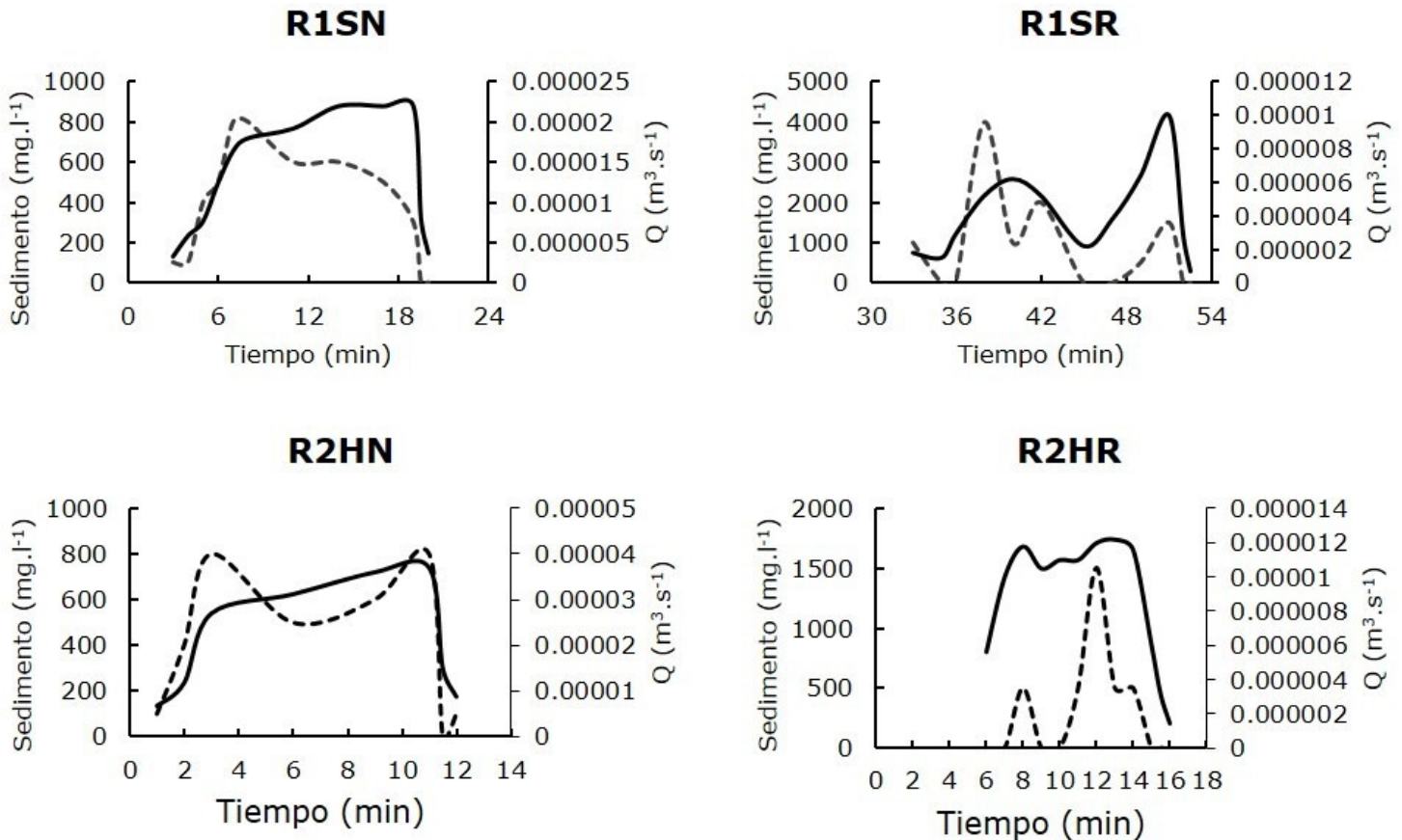


Figura 12. Sedigramas (línea punteada) e hidrogramas (línea continua) durante la simulación de lluvia con suelo seco (R1SN y R1SR) y con suelo húmedo (R2HN y R2HR).

Dado que las condiciones de humedad del suelo en las parcelas experimentales fueron las mismas, de la Figura 12 se puede deducir que un cambio significativo debido al uso del rodillo fue el retraso en el inicio del escurrimiento tanto para suelo seco como húmedo.

Para la condición de suelo seco, la escorrentía en la parcela experimental R1SN comenzó tres minutos después del inicio de la lluvia;

mientras que el inicio de la escorrentía en la parcela R1SR fue 33 minutos después del inicio de la lluvia. Por otro lado, el gasto del escurrimiento para R1SR fue menor, con una producción media de $0.000004 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que el gasto medio del escurrimiento en la parcela R1SN fue de $0.000016 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Contrario a lo anterior, hubo un aumento considerable en la producción de sedimentos en la parcela experimental R1SR, donde se obtuvo una producción media de sedimentos de 833 mg l^{-1} ; mientras que en la parcela experimental R1SN, la producción media de sedimentos fue de 470 mg l^{-1} .

Para la condición de suelo húmedo, el escurrimiento ocurrió 4 minutos antes en las parcelas sin efecto del rodillo aireador; el gasto del escurrimiento para R1HR fue menor, con un gasto medio de $0.0000088 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; mientras que el gasto medio de escurrimiento en la parcela R1HN fue de $0.000022 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Respecto a la producción media de sedimentos, para R1HR y R1HN fue de 291.6 y 412.5 mg l^{-1} , respectivamente.

Discusión

Cuenca experimental

El objetivo de utilizar el rodillo es rehabilitar suelos donde hay escasa vegetación y evitar procesos de degradación del sitio. En el área de estudio se utilizó el rodillo para incrementar la producción de forrajes, ignorando los efectos potenciales de la remoción de vegetación natural

que impacta en el hábitat de la microfauna, así como en las características físicas y biológicas del suelo.

El empleo del rodillo produce cambios en la vegetación. Un estudio realizado en el condado de Northern Johnson, en el estado de Wyoming, EUA, donde se utilizó el rodillo aireador para mejorar las condiciones de los agostaderos, reveló que los terrenos tratados con el rodillo aireador tuvieron una disminución de los pastos nativos, como el navajita (*Bouteloua gracilis*), y de los arbustos (Sanez, Cantú, Armenta, & Barreras, 2017).

Por otro lado, el rodillo aireador fue usado para el establecimiento de pasto buffel, y una de las cualidades del pasto buffel es su alto potencial de rendimiento, de hasta 2 y 10 veces más forraje que los pastos nativos, por lo que el potencial del agostadero no se ve afectado y se favorece al desarrollo de la ganadería. Aunado a lo anterior, el cambio del uso del suelo de un pastizal nativo al establecimiento de pasto buffel no representa diferencias estadísticamente significativas en la hidrología del terreno (Valle, Cohen, Luna, Villalobos, & Rodríguez, 2014).

El cambio de cobertura vegetal, la formación de microdepresiones y mantillo, realizado en 24 ha de la cuenca por el paso del rodillo, modificó la hidrología de la cuenca. El mantillo evitó que las gotas de lluvia cayeran directamente sobre la superficie del suelo y retrasó el inicio del escurrimiento, favoreciendo así la infiltración del agua a la cuenca. La cobertura vegetal reduce la pérdida de suelo por erosión hídrica, también mejora la infiltración del agua en el suelo y reduce la velocidad de escorrentía.

Eso también coincide con lo que proponen Esquivel, Nevarez, Velásquez, Sánchez y Bueno (2017) en relación con que la capacidad de los suelos para producir escorrentía está fuertemente ligada con el estado superficial, así como con las propiedades físicas del suelo. Además, Olguín y Pineda (2010) reportaron que el tamaño de la cuenca influye en el comportamiento de su hidrología, siendo las cuencas pequeñas las más sensibles a la forma de los hidrogramas y cantidad de la escorrentía; esta última influenciada por las características físicas del suelo y cubierta vegetal.

Por tanto, las características de la cuenca donde se realizó el estudio, específicamente el tamaño de la cuenca, hicieron que el cambio en la cobertura superficial del suelo modificara los patrones de escorrentía, infiltración, producción de sedimentos y la relación precipitación-escorrentía en toda la cuenca (Simanton, Hawkins, Mohseni, & Renard, 1996).

Con base en los resultados observados del uso del rodillo, la hidrología de la cuenca es sensible a los cambios en su cobertura superficial; incluso cuando la superficie modificada es pequeña, la modificación del 15 % de la superficie de la cuenca (cobertura de suelo y vegetación) provoca cambios notables en su hidrología.

Dentro de la cuenca hay áreas que deben ser identificadas y monitoreadas más a fondo, como son las zonas de recarga, a fin de mantener un equilibrio en el ciclo hidrológico y lograr un mejor manejo del recurso hídrico. Por otro lado, los resultados obtenidos en esta investigación solo reflejan el efecto inicial del uso del rodillo; una vez que

crezca el pasto buffel sembrado y se establezca un nuevo manejo de la cuenca (carga animal), la hidrología de la cuenca puede cambiar.

Simulación de lluvia

Además del retraso en el inicio de la escorrentía atribuido a la mayor cantidad de materia orgánica en la superficie del suelo, el empleo del rodillo provocó una reducción en la cantidad de escorrentía. La disminución de la escorrentía en las parcelas con efecto del rodillo coincide con el comportamiento de la hidrología de la cuenca para 2017, año en que se utilizó el rodillo en la cuenca y donde hubo un descenso de la escorrentía. Por tanto, la simulación de lluvia puede utilizarse como una herramienta para comprender el comportamiento de la hidrología de una cuenca en relación con el estado de su cobertura vegetal y del suelo.

En las parcelas en condición natural el hidrograma se distribuye típicamente, es decir, comienza de manera ascendente, que corresponde a la concentración del flujo hasta alcanzar el flujo máximo y luego la línea del hidrograma desciende a medida que el flujo disminuye. Por otro lado, el hidrograma de las parcelas con efecto del rodillo se comporta de manera diferente: tiene dos caudales máximos durante la simulación de lluvia, lo cual se atribuye a las microdepresiones; la escorrentía inicialmente fue solo de las áreas sin microdepresiones; una vez que las microdepresiones estaban llenas de agua, el área de escorrentía aumentó, dando como resultado un segundo pico en el hidrograma.

González *et al.* (2006) encontraron que la escorrentía está condicionada esencialmente por la cobertura vegetal y la intensidad de la lluvia. Asimismo, Calvo, Jiménez y De-Saá (2012), y Pérez, Moreno y Roldán (2016) concluyeron que el porcentaje de lluvia interceptada es directamente proporcional al porcentaje de cobertura terrestre. Para esta investigación, la intensidad de la lluvia fue la misma para todas las simulaciones, por lo que el cambio en la respuesta de la escorrentía está directamente relacionado con la cobertura vegetal y la condición del suelo.

En las parcelas de escorrentía donde se realizó la alteración de la vegetación nativa existe una mayor pérdida de suelo, lo que coincide con los impactos de la alteración de la cobertura vegetal y microtopografía superficial del suelo referidos por Chavéz *et al.* (2012). La alteración de la cobertura vegetal no solo tiene como efecto la erosión del suelo, sino que también puede haber menor producción de agua, menor captura de carbono, alteración del clima e impactos en la biodiversidad de la cuenca (Brüschweiler, Höggel, & Kläy, 2004; Vargas & Rosales, 2014).

Conclusiones

En condiciones de simulación *in situ*, la remoción de suelo con uso de rodillo aireador como práctica que propicie el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) redujo el flujo de escorrentía superficial mediante la formación de microdepresiones que actuaron como retenedores del agua de lluvia, pero con el consecuente aumento en la producción de sedimentos con impacto en una mayor erosión del suelo. Adicionalmente, el paso de RA propicia la disminución de la cobertura

vegetal nativa e impacta la biodiversidad de la flora, al menos en un primer periodo de tiempo, lo cual debe evaluarse a mediano plazo, en cuanto a una posible regeneración y vigorización vegetal por la práctica de aireación del suelo y su mayor poder de retención de humedad.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado económicamente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) de México, y el Posgrado en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo.

Referencias

- Alvez, A. L. A., Mello, C. R. D., Colombo, A., & Cuartas, L. A. (2017). Performance of a distributed hydrological model based on soil and moisture zone maps. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41. DOI: 10.1590/18069657rbcS20160551
- Berlanga, R. C. A., S. Beltrán, O. U. Martínez, P., Hernández, R., & Torres, E. (2009). Rehabilitación de pastizales en el norte de Coahuila con el uso del rodillo aireador. En: *Memorias del VI Simposio Internacional de Pastizales*. Monterrey, México: Universidad Autónoma de Nuevo León-Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

- Bolaños, G., Martín, A., Paz, P. F., Cruz, G., Carlos, O., Argumedo, E. J. A., Romero, B. V. M., & De-la-Cruz, C. J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000300271&script=sci_arttext
- Bueno, H. P., Sánchez, C. I., Esquivel, A. G., Velásquez, V. M., & Inzunza, I. M. A. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 13(2). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Arriaga-3/publication/313596674_Caracterizacion_Hidrologica_para_cuencas_en_zonas_aridas_en_Mexico/links/5d6ecbf5299bf16522f30ca2/Caracterizacion-Hidrologica-para-cuencas-en-zonas-aridas-en-Mexico.pdf
- Brüschweiler, S., Höggel, U., & Kläy, A. (2004). Los bosques y el agua: interrelaciones y su manejo. *Geographica Bernensia*. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/48018126.pdf>
- Calvo, A. J., Jiménez, R. C., & De-Saá, Q. M. (2012). Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un bosque húmedo tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22). Recuperado de <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.355>

- Castillo, I. O., Ávalos, J. E., Ramírez, G. R., Arellano, J. D. J. E., Vázquez, C. V., & Sosa, E. S. (2009). Ganadería ejidal y emigración en el municipio de San Luis del Cordero, Durango, norte de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 25, 46-57. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/141/14118560006.pdf>
- Chavéz, L. G., Tapia, V. L. M., Bravo, E. M., Sáenz, R. T., Muñoz, F. H. J., & Vidales, F. I. (2012). *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/265125083_Impacto_d_el_cambio_de_uso_del_suelo_forestal_a_huertos_de_aguacate_IMPACT_OF_FOREST_LAND_USE_CHANGE_TO_AVOCADO_ORCHARD_S#:~:text=El%20cambio%20de%20uso%20del%20suelo%20en%20terrenos%20forestales%20para,Flora%20y%20Fauna%20Pico%20de
- Clary, W. P. (1989). Revegetation by land imprinter and rangeland drill. *Wildfires*. Paper 1. Fort Collins, USA: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.
- Cotler-Ávalos, H., Galindo-Alcántar, A., González-Mora, I. D., Pineda-López, R. F., & Ríos-Patrón, E. (2013). *Cuadernos de divulgación ambiental. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México, DF, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf>

- Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado, P., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., & Muñoz-Villalobo, J. A. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del norte-centro de México. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 15(2), 151-161.
- Esquivel, A. G., Nevarez, F. M. M., Velásquez, V. M. A., Sánchez, C. I., & Bueno, H. P. (2017). Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 9(1), 3-18. Recuperado de <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.12.008>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Un ambicioso programa de 104 millones de USD aborda la degradación del suelo en países de África y Asia central*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/news/story/es/item/1411476/icode/>
- Forero, C. G. A., Saldarriaga, M. J. P., & Vargas, R. M. (2017). Cambio climático: impactos y perspectivas de investigación desde una visión multidisciplinar. *Tendencias* (2), 122-138. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rtend.171802.80>

- Ffolliott, P. F., Brooks, K. N., Neary, D. G., Tapia, R. P., & Garcia-Chevesich, P. (2013). *Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: Processes and control*. UNESCO Special Technical Publication No. 32. Montevideo, Uruguay: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, International Hydrological Programme, Regional Office for Science for Latin American and the Carribbean. Recuperado de https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2013_ffolliott_p001.pdf
- González, C. G., Estrada, A. J., González, B. J. L., Cueto, W. J. A., Sánchez, C. I., & Castillo, S. G. (2006). Análisis de los factores que afectan la relación precipitación-escurrimiento en una zona semiárida del norte de México. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 337-345. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311103005.pdf>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Miller, W. P. (1987). A selenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Science of America Journal*, 51(3), 832-834. Recuperado de <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030048x>

- Muriel, S. L. A., & Trujillo, A. R. (2013). Evaluación de la erodabilidad de los suelos typic dystrodepts, typic hapludands y andic dystrodepts mediante simulador de lluvia en la microcuenca La Centella (Dagua-Valle del Cauca). *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (12), 49-57. Recuperado de <http://revistaaidenar.univalle.edu.co/revista/ejemplares/12/f.htm>
- Olguín, L. J. L., & Pineda, L. R. (2010). Importancia de la priorización hidrológica en la toma de decisiones de manejo en la subcuenca del río Ayuquila, Jalisco, México. *Ciencia@uaq*, 3(2), 42-51. Recuperado de https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v3-n2/Importancia.pdf
- Pereira, D. D. R., Almeida, A. Q. D., Martínez, M. A., & Rosa, D. R. Q. (2014). Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4), 1350-1358. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400030
- Pérez, A. R., Moreno, P. M. F., & Roldán, C. J. (2016). Comparación de modelos de interceptación de agua de lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. *Ingeniería del Agua*, 20(3), 153-168. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/4713>

- Sánchez, C. I., Velásquez, V. M. A., Esquivel, A. G., Bueno, H. P., & Pedroza, S. A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(2), 185-208. DOI: 10.5154/r.rchsza.2015.07.007
- Sánchez, C. I., Pedroza, S. A., Velásquez, V. M. A., Bueno, H. P., & Esquivel, A. G. (2018). Expresiones analíticas de la erosión de suelo e impacto en su productividad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(6), 1109-1122. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342018000601109&script=sci_arttext
- Sanez, F. J. R., Cantú, J. M. P., Armenta, M. D. L. P. M., & Barreras, G. L. (2017). Uso del rodillo aireador en la restauración de pastizales en Agua Prieta, Sonora. *Biotecnia*, 19(3), 23-28. DOI: 10.18633/biotecnia.v19i3.444
- Sastre, B., Bienes, R., García, D. A., & Cuevas, A. (2016). *Incidencia de las cubiertas vegetales sobre la infiltración del agua de lluvia*. I Congreso Ibérico de Olivicultura / V Jornadas Nacionales del Grupo de Olivicultura de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH), 13-15 de abril de 2016. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Blanca-Sastre/publication/301351776_Incidencia_de_las_cubiertas_vegetales_sobre_la_infiltracion_del_agua_de_lluvia/links/5714d38b08ae6f3b8abe7201/Incidencia-de-las-cubiertas-vegetales-sobre-la-infiltracion-del-agua-de-lluvia.pdf

- Simanton, J. R., Hawkins, R. H., Mohseni, S. M., & Renard, K. G. (1996). Runoff curve number variation with drainage area, Walnut Gulch, Arizona. *Transactions of the ASAE*, 39(4), 1391-1394. DOI: 10.13031/2013.27630
- Valle, M. A. V., Cohen, I. S., Luna, R. G., Villalobos, J. A. M., & Rodríguez, H. M. (2014). Impacto hidrológico del cambio de uso del suelo de un pastizal nativo a praderas de zacate buffel (*Pennisetum ciliare* L.). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 13(2), 47-58. DOI: 10.5154/r.rchsza.2013.10.004
- Vargas, V. T. C., & Rosales, S. C. A. (enero-junio, 2014). Pérdida de la cobertura vegetal y sus repercusiones ambientales y legales. *Geoenseñanza*, 19(1), 61-79. Recuperado de <http://www.revencyt.ula.ve/storage/repo/ArchivoDocumento/geoz a/v19n1/art05.pdf>
- Velásquez, M. A., Esquivel, A. P., Bueno, H. I., Sánchez, C., & Flores, L. (2014). El uso de la lluvia artificial en la investigación en zonas áridas de México. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 14, 83-89.
- Yáñez, C. L. G., Pedroza, S. A., Martínez, S. M., Sánchez, C. I., Echavarría, C. F. G., Velásquez-Valle, M. A., & López, S. A. (2018). Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr. y *Chloris gayana* Kunth. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4), 702-718. Recuperado de <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i4.4333>