

Restauración hidrológica de pastizales degradados en comunidades áridas y semiáridas

Hydrological restoration of degraded grasslands in arid and semi-arid communities

VAN D. CLOTHIER

Stream Dynamics, Inc.

ANA CÓRDOVA

El Colegio de la Frontera Norte

Recibido: 02 de abril de 2018. Aceptado: 20 de mayo de 2019.

RESUMEN

Vivimos en el Antropoceno. La superficie completa de la tierra ha sido impactada por la actividad humana y nuestro uso del suelo. En este contexto, la mayoría de los pastizales en zonas áridas y semiáridas tienen procesos de degradación. Este trabajo describe los cambios provocados por la antropización del paisaje en pastizales del norte de México y Suroeste de Estados Unidos, y la forma como se comporta la hidrología de ellos ante diferentes intensidades de precipitación típicas de estas regiones. Se explican algunas causas principales del deterioro de pastizales en zonas semiáridas, se identifican estrategias sistémicas de atención a esas causas, y se presentan varias técnicas concretas de intervención en el paisaje que ayudan a la restauración de estos ecosistemas. Estas técnicas incluyen la restauración de trayectorias de flujo históricas, el drenaje de caminos con bordos de desvío, la colocación de hileras de postes para restaurar riberas erosionadas y de represas de una roca para la restauración de pequeños tributarios con procesos erosivos. Se documenta fotográficamente los efectos de estas intervenciones en el paisaje. Las intervenciones y pautas de manejo que se presentan permiten mejorar la hidrología de los pastizales y conservar el recurso suelo, reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades a sequías e inundaciones.

Palabras clave: pastizales desérticos, manejo de agua pluvial

ABSTRACT

We live in the Anthropocene. The entire surface of the earth has been impacted by human activity and land management decisions. In this context, most of the grasslands in arid and semi-arid regions have degradation processes. This work describes the changes caused by the anthropization of the landscape in grasslands of northern Mexico and the Southwest United States and how their hydrology behaves when faced with different rainfall intensities typical of these regions. It explains some main causes of the deterioration of grasslands in semi-arid zones, identifies systemic strategies to address these causes, and presents several concrete landscape intervention techniques that can help the restoration of these ecosystems. These include the restoration of historical flow paths, road drainage with rolling dips, post vanes to restore eroded stream banks and one rock dams for the restoration of small tributaries with erosive processes. The effects of these landscape interventions are documented photographically. The interventions and management guidelines presented in this paper can improve grassland hydrology and conserve soil

resources, reducing the vulnerability of communities to droughts and floods.

Key words: desert grasslands, rainwater management

INTRODUCCIÓN

En la época precolombina, la mayor parte de lo que ahora es el Noroeste de México y el Suroeste de Estados Unidos era un vasto pastizal con alto porcentaje de cobertura de pastos perennes, suelo no compactado y muy poco suelo descubierto. Muchos escritos de los primeros colonizadores europeos en estas tierras describen el pasto a la altura del vientre de los caballos (Knopf, 1994; Melville, 1994). Las praderas estaban mayormente intactas y los arroyos estaban en equilibrio con generosas llanuras de inundación. Había relativamente pocos caminos, muy pocos pozos y algunos pequeños desvíos de agua superficial a campos agrícolas (Melville, 1994). Llamemos a esto el *pastizal precolonial* (fig. 1).

Durante los últimos 500 años los humanos hemos alterado el paisaje en esta región a tasas exponencialmente crecientes: hay ganadería, caminos y desvíos de agua por todas partes (Dobyns, 1981). El pastizal semidesértico se ha convertido en un paisaje invadido por arbustos con significativamente menos pasto, mucha maleza anual y mucho suelo compactado (Van Auken,

2000). La mayoría de las cabeceras de cuenca tienen cárcavas, la mayoría de los arroyos están en desequilibrio, sea erosionados, sea llenos de sedimento. En Arizona y Nuevo México hay decenas de miles de kilómetros (United States Department of Transportation [DOT], 2017). Una revisión de mapas topográficos en estos estados muestra aproximadamente un presón por cada 250 hectáreas y muchos miles de pozos. Llamemos a esto el *pastizal moderno* (fig. 2).

Esta antropización del paisaje ha generado grave erosión del suelo y fuertes cambios hidrológicos en el territorio, con consecuentes ciclos de sequía e inundación que solo se intensificarán con las perspectivas de cambio climático. La sustentabilidad de las comunidades en zonas áridas y semiáridas (tanto urbanas como rurales) se reduce ante la pérdida de servicios ecosistémicos de suelos y cuencas sanas. El nivel de los mantos freáticos, la disponibilidad de agua, la calidad del agua superficial, la vulnerabilidad a inundaciones y la productividad del suelo se relacionan directamente con el estado de salud de las cuencas.

El objetivo de este trabajo es demostrar la aplicación de intervenciones en el paisaje para la solución de problemas de deterioro en pastizales de zonas áridas y semiáridas y mostrar las consecuencias de estas técnicas sobre el comportamiento de algunos componentes del ciclo hidrológico. Las pautas de manejo y transformaciones del uso de suelo que se presentan permi-

FIGURA 1. Pastizal *precolonial*.



Fuente: Van Clothier.

FIGURA 2. Pastizal *moderno*.



Fuente: Van Clothier.

ten a la sociedad mejorar la salud de cuencas, conservar el recurso suelo y aprovechar mejor el agua disponible.

Se trata de una aportación de investigación empírica, basada en el marco conceptual y la praxis aportados por Dave Rosgen (1996) con el Diseño de Canales Naturales (*Natural Channel Design*), así como con los desarrollos conceptuales y empíricos de Bill Zeedyk y Van Clothier (Zeedyk, 1996; Zeedyk y Clothier, 2009). Estos trabajos se basan en la interpretación del paisaje y la comprensión de la dinámica de erosión, transporte y deposición de sedimento en sistemas fluviales, modulados por la vegetación nativa. El propósito es diseñar proyectos de restauración no solo para soportar las inundaciones históricas, sino también para transportar sedimento durante las avenidas anuales más pequeñas, con el fin de facilitar el desarrollo de llanuras de inundación y promover la recolonización de la vegetación riparia nativa (Rosgen, 1996). Asimismo, a través del moldeado del terreno para la captación pasiva de agua pluvial y el restablecimiento de los flujos naturales se facilita que “el agua haga el trabajo” de la restauración (Zeedyk y Clothier, 2009).

La exposición se inicia con antecedentes de la problemática actual. Se describen los cambios hidrológicos provocados por la antropización del paisaje, así como las diferentes formas en que el pastizal *precolonial* y el pastizal *moderno* se comportan durante eventos de precipitación típicos de las zonas áridas y semiáridas. Posteriormente, se continúa con una exposición de soluciones a dicha problemática; primero con una descripción de estrategias generales, y enseguida con la presentación de cuatro técnicas específicas de intervención en el paisaje. En esta sección se ofrece una explicación esquemática de cada técnica (metodología), seguida de la demostración de resultados de su aplicación en campo. Sigue una sección de discusión y se cierra con las conclusiones.

ANTECEDENTES DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL

CAMBIOS HIDROLÓGICOS ENTRE EL PASTIZAL PRECOLONIAL Y EL PASTIZAL MODERNO

EL PASTOREO DE GANADO

El ganado en el pastizal semidesértico ha generado un cambio de tipo de suelo de pastizal a matorral (Brunelle *et al.*, 2013). El sobrepastoreo de los pastos perennes merma drásticamente a la mayoría de ellos, y la vegetación que el ganado no consume, como gobernadora, mezquite y tás-cate, rápidamente se extiende sobre el paisaje. La superficie restante queda dominada por malezas anuales y suelo descubierto (Brunelle *et al.*, 2013).

Por otro lado, el pisoteo del ganado compacta el suelo (Nash *et al.*, 1999, Brunelle *et al.*, 2013). Esto, sumado a la remoción de vegetación comestible y las tramas de veredas que genera con su movimiento, redonda en mucho suelo descubierto (Nash *et al.*, 1999). En muchos casos las veredas suben y bajan por los valles, frecuentemente iniciando cárcavas. Estos problemas se refuerzan mutuamente y se combinan para drenar rápidamente el agua del territorio, y empeoran las condiciones hidrológicas cada vez que hay una fuerte precipitación (Thurow, 2000). En las zonas áridas, al ganado le gusta concentrarse en las áreas donde hay agua, tales como praderas húmedas, manantiales y zonas ribereñas (Thurow, 1991). Remueven la vegetación que protege las riberas de la erosión. Esto causa inestabilidad durante flujos altos, lo que resulta en un ciclo creciente de erosión (Leopold, 1949). Por otro lado, los ganaderos, históricamente, han suprimido los incendios naturales que queman los postes de sus cercos (Sayre, 2007). En combinación con el sobrepastoreo de la vegetación nativa mencionado arriba, esto ha suscitado el cambio de tipo de suelo de pastizal a matorral (Melville, 1994). El control de depredadores, como lobos, pumas, coyotes y zorras, ha resultado en poblaciones inestables de herbívoros nativos, desde alces y venados hasta liebres, que a su vez pueden poner presión de pastoreo adicional a un ecosistema

ya de por sí inestable (Berger, 2006). Todos estos problemas del pastoreo de ganado en zonas áridas se combinan para tener un impacto extremadamente alto en el flujo de arroyos, la recarga de acuíferos y la permanencia de manantiales.

CAMINOS, CAMINOS Y MÁS CAMINOS

Actualmente, miles de kilómetros de caminos se extienden a casi cada rincón del paisaje. Los caminos alteran el flujo del agua sobre el terreno (Duniway, 2013). Una hectárea de superficie impermeable de caminos puede generar hasta 100,000 litros de escurrimiento de agua a partir de una precipitación de 1 cm. El peor impacto de los caminos es su drenaje. Típicamente, en ciertos tramos, los caminos interceptan escurrimientos de la pendiente y los atrapan en una zanja lateral o en el mismo lecho del camino erosionado (Jones *et al.*, 2000). La distancia media entre estructuras de drenado en caminos del Servicio Forestal de EEUU es de 330 metros (Zeedyk, 2002, comunicación personal), que es la longitud promedio de un tributario de primer orden. Esto significa que hemos generado una red de drenaje adicional a la red natural de drenaje que creó nuestros valles. La figura 3 muestra un nuevo desarrollo habitacional en Silver City, NM, que generó una red de caminos que se añaden a la red histórica de drenaje.

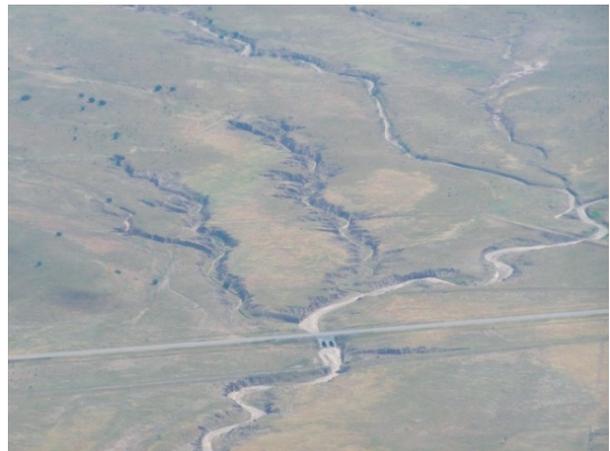
FIGURA 3. Red de caminos que se añade a la red natural de drenaje. Silver City, NM.



Fuente: Van Clothier.

Por otro lado, los caminos cruzan cauces de agua. Los cruces de puentes constriñen la planicie de inundación de los arroyos y pueden causar incisión e inestabilidad (Zeedyk y Clothier, 2009). Muchos caminos suben por los valles y sus constructores mueven el arroyo hacia un lado para hacer espacio para el camino; esto también causa incisión e inestabilidad (Zeedyk y Clothier, 2009). Es común que en los cruces de ductos de drenaje bajo los caminos se instale la tubería de traspaso con demasiada profundidad, lo cual genera una cárcava en la red de drenaje aguas arriba, lo que seca la cuenca. La figura 4 muestra el efecto de un ducto de drenaje en la carretera 180 al oeste de Silver City, NM, construido a demasiada profundidad y que empeora la erosión de la cuenca.

FIGURA 4. Ducto de drenaje demasiado profundo genera erosión aguas arriba.



Fuente: Van Clothier.

Finalmente, el escurrimiento de los caminos es una fuente principal de contaminación no puntal (Jones *et al.*, 2000). El sedimento de los caminos y las cárcavas formadas por ellos son causas primarias de la turbidez de cuerpos de agua superficial (Jones *et al.*, 2000).

DESVÍOS DE AGUA

En los EEUU hay miles de pequeños desvíos de agua para estanques ganaderos, a los que llaman presones. Estos presones son construidos por

los ganaderos para capturar el escurrimiento de los tributarios de primer orden. Están diseñados para no infiltrar el agua para que así esté disponible para que el ganado beba. Mucha de esa agua se pierde en evaporación. El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de EEUU estima que la evaporación de los presones ganaderos suma tres metros al año (Decker, 2008 comunicación personal) y representa el 64% del agua perdida anualmente por estas estructuras —solo el 3% es consumido por el ganado (Duesterhaus, 2008).

DESEMPEÑO HIDROLÓGICO DEL PAISAJE

Desafortunadamente, muchos elementos se combinan para reducir drásticamente el desempeño hidrológico del *pastizal moderno*. Debido a los factores antes expuestos, el coeficiente general de escurrimiento es significativamente mayor que el del *pastizal precolonial*. Los efectos se magnifican a escala de la cuenca. Suelo descubierto, compactado, cárcavas y falta de vegetación estabilizadora se combinan para producir flujos de agua y de sedimentos mucho mayores en el *pastizal moderno*. Redes completas de drenaje están ahora erosionadas y se han profundizado en el terreno (Zeedyk y Clothier, 2009). Llanuras de inundación, como los depósitos aluviales y las riberas de ríos, que servían como formas naturales del terreno para la acumulación de agua, quedan elevadas y secas por estas incisiones (Zeedyk y Clothier, 2009). Sobre grandes extensiones queda reducida la infiltración, y gran parte de lo que logra infiltrarse es consumida por matorrales de raíces profundas antes de que llegue al acuífero. Actualmente, la infiltración a escala estatal de Nuevo México se calcula en 2 mm/año (Hendricks, 2012, comunicación personal). Esto representa cerca de 1/50 parte de la precipitación anual.

El ciclo de escurrimiento se ha convertido en una dinámica de exceso y escasez, con escurrimiento erosivo inmediatamente después de las tormentas, que dejan los cauces secos en días (Zeedyk y Clothier, 2009). Como resultado de

esto, caen los niveles freáticos, están desapareciendo los manantiales y las corrientes perennes se están convirtiendo en efímeras (Zeedyk y Clothier, 2009). En el pastizal, los efectos del cambio climático causados por las malas prácticas de manejo del territorio exceden por mucho lo que se genera a consecuencia de los cambios globales en temperatura y precipitación (Beschta *et al.*, 2013). De ahí la importancia de abordar las prácticas de manejo.

A continuación describimos el comportamiento de este paisaje deteriorado ante diversas condiciones de precipitación típicos en esos ecosistemas: la lluvia ligera, la lluvia intensa y el año húmedo ocasional.

LA LLUVIA LIGERA

Las temperaturas elevadas del suelo en el *pastizal moderno* causan un aumento en la evaporación de suelos húmedos después de una lluvia ligera (NRCS, 2016; McGinty *et al.*, 2000). La compactación del suelo causa la formación de charcos en la superficie y evaporación en áreas sin vegetación, reduciendo así fuertemente la infiltración. En zonas de suelo descubierto, el escurrimiento alcanza hasta el 75% de la precipitación (McGinty *et al.*, 2000). Donde hay doseles densos de árboles, arbustos y matorrales, las hojas y ramas interceptan la precipitación, donde hasta el 7% de la precipitación anual se evapora (vs. 0.5% de intercepción por pastos) (McGinty *et al.*, 2000). Gran parte de la pérdida evaporativa se da después de las lluvias ligeras, sobre todo en presencia de altas temperaturas y viento (McGinty *et al.*, 2000). El resultado de todo esto es que en el *pastizal moderno* hay reducida infiltración al suelo y muy poca percolación al nivel freático después de las lluvias ligeras.

LA LLUVIA INTENSA

En el *pastizal moderno* la gran superficie de suelo compactado y descubierto causa una percolación menor y un coeficiente de escorrentía mucho mayor que en *pastizal precolonial*. Los eventos de precipitación fuerte generan un flujo laminar muy alto y una consecuente abrasión de la su-

perficie. Se forman nuevos surcos; las cárcavas se profundizan, crecen y generan nuevos ramales, lo cual produce enormes cantidades de sedimentos¹ que se transportan con el torrente.

Los presones se llenan y los vertederos se desbordan, y con frecuencia revientan (Jacobs, 1991). Los cauces tienen alta erosión de riberas (Leopold, 1949), lo que agrega un volumen considerable al flujo que corre aguas abajo. Consecuentemente, los ríos tienen grandes inundaciones y causan daños a las comunidades. Cada vez que hay un evento de precipitación grande empeora la salud de la cuenca. La figura 5 muestra el efecto de una inundación récord, facilitada por el sobrepastoreo y que mató a dieciséis reses en 2005 cerca de Douglas, Arizona. Las cuencas sanas, como las que habría en el *pastizal precolonial*, son capaces de asimilar una lluvia torrencial sin sufrir mucho daño, y cualquier daño causado a las orillas de los cauces comienza a repararse por la vegetación riparia nativa en eventos subsiguientes más pequeños (Zeedyk y Clothier, 2009).

FIGURA 5. Res muerta en inundación facilitada por sobrepastoreo en Arizona, 2005.



Fuente: Van Clothier.

1. Rauzl y colaboradores (1968, citado por McGinty *et al.*, 2000) estiman que en los llanos centrales de EEUU, un suelo con cobertura de pastos y mezquite puede generar 1400 kg/ha de sedimento y un suelo descubierto puede generar 23,326 kg/ha de sedimento, mientras que una cobertura de pastos genera 249 kg/ha de sedimento.

EL AÑO HÚMEDO OCASIONAL

En las zonas áridas la precipitación puede ser muy variable de un año a otro (Williams y Albertson, 2006). En estas tierras con tendencias naturales a la sequía hay ocasionalmente una temporada de monzón muy húmeda cuando muchas lluvias generosas saturan el suelo de humedad y lo mantienen saturado durante semanas (Stahle *et al.*, 2016). Es posible que esto no vuelva a ocurrir nuevamente por otros diez a veinte años, pero cuando sucede hay una oportunidad para recargar el acuífero —esto es, si la cuenca está en buenas condiciones.

En el *pastizal precolonial* hay una tasa de percolación muy alta porque la precipitación es canalizada por las hojas del pasto hacia las raíces que la conducen directamente al suelo, saturándolo profundamente. Pastos abundantes cubren la mayor parte del suelo, reduciendo la velocidad del agua y liberándola lentamente a los cauces de forma que los pulsos de inundación se modulan. La cobertura del suelo también protege la superficie de la erosión, de manera que muy poco sedimento es movilizado durante grandes tormentas (McGinty *et al.*, 2000). Una vez que el suelo se satura debajo de la zona de raíces del pasto, el agua entra a la zona vadosa en su largo camino hacia el manto freático (Puigdefábregas, 1999; Sandwig y Philips, 2006). El sistema pluvial decenal que se infiltra más allá de las raíces de los pastos es un evento de recarga del acuífero.

En el *pastizal moderno* hay mucha menor percolación y una tasa de escorrentía mucho mayor (McGinty *et al.*, 2000; Eldridge *et al.*, 2015). El suelo se satura a una profundidad menor. Mucha del agua que baja por la zona vadosa con el tiempo será consumida por las raíces muy profundas del matorral (Stephens, 1995; Sandwig y Philips, 2006). No ocurre recarga significativa del acuífero.

Las cuencas en pastizales de zonas áridas han sido alteradas en una gran superficie del planeta (Metcalf *et al.*, 1991). La recarga de los acuíferos ha sido virtualmente eliminada de todas las áreas, excepto los abanicos aluviales no degradados y fondos de los arroyos (Stephens, 1995). Manan-

tiales que nunca se habían secado se están secando. Corrientes perennes se están convirtiendo en efímeras (Lake, 2003). Los ríos tienen picos de inundación más altos y flujos base más bajos. Se están muriendo nuestras cuencas.

SOLUCIONES PARA LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS PASTIZALES DEGRADADOS

La solución a la problemática descrita es compleja y multidimensional. Si bien en el resto de este documento nos enfocamos en intervenciones de restauración hidrológica en el paisaje, no queremos dejar de apuntar algunos aspectos controvertidos de manejo, económicos y sociales, que requieren reflexión y discusión para realmente abordar de forma integral la restauración de la salud de las cuencas.

1. Un gran número de problemas ambientales, incluyendo la hidrología de pastizales semi-desérticos, se multiplica por el número de humanos que los causan (Crist *et al.*, 2017; Ripple *et al.*, 2017). Además de los cambios que podamos hacer en el manejo de pastizales, hay que abordar el tamaño de la población humana y sus patrones de consumo —la cantidad de recursos consumidos *per capita* y el impacto de las tecnologías o formas de consumo (Miller, 1996; Ripple *et al.*, 2017).
2. La ganadería en pastizales semidesérticos causa directamente muchos de los problemas en la hidrología de estos (Steinfeld *et al.*, 2006), y es necesario reflexionar sobre la reducción drástica de hatos ganaderos bovinos y ovinos en estos ecosistemas (Beschta *et al.*, 2013; Ripple *et al.*, 2014). Se pueden explorar alternativas económicas, como el pago por servicios ambientales, la transición a cacería o la ganadería con especies nativas, como el bisonte que tiene un comportamiento diferente en el ecosistema (Jacobs, 1991; Steinfeld *et al.*, 2006; Ripple *et al.*, 2014).
3. La supresión de incendios naturales impide que el pastizal se aclare periódicamente

de los matorrales invasivos (McPhearson y Weltzin, 2000). Al eliminar su supresión, los incendios naturales reconvertirán gradualmente los matorrales a pastizales (McPhearson y Weltzin, 2000). Si esto se hace simultáneamente con una reducción drástica en los hatos ganaderos el efecto será mayor y más rápido.

4. Los depredadores superiores, como los lobos, mantienen el equilibrio de los ecosistemas y son especies clave que el ecosistema necesita para optimizar la hidrología de las cuencas (Dutcher y Dutcher, 2013; Beschta *et al.*, 2013). Es imperativo que estos animales se reintroduzcan para proveer servicios ecosistémicos importantes antes de que se cause mayor daño a nuestros ecosistemas (Dutcher y Dutcher, 2013; Beschta *et al.*, 2013).

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE CAUCES Y MOLDEADO DEL TERRENO PARA CAPTAR AGUA DE LLUVIA

Aunque muchos de los elementos hidrológicos comenzarán a restaurarse por sí solos una vez que los procesos naturales arriba descritos se hayan restablecido, mucho del daño a nuestras cuencas no se reparará naturalmente en la escala de tiempo de nuestra civilización. Así, pues, es procedente hacer reparaciones a las praderas degradadas para redistribuir los flujos concentrados por los caminos y ayudar a los arroyos en su autorregeneración empleando los poderosos procesos naturales de las inundaciones (avenidas) y el crecimiento de la vegetación. Una nueva ciencia, denominada Diseño de Canales Naturales (*Natural Channel Design*), ha sido desarrollada por el doctor Dave Rosgen y otros (Rosgen, 1996). Este trabajo se basa en la interpretación del paisaje y la comprensión de la dinámica de erosión, transporte y deposición de sedimento en sistemas fluviales, modulados por la vegetación nativa. No es un procedimiento de gabinete. Es crítico para este enfoque poder determinar en campo la elevación del cauce activo lleno (*bank-full elevation*) —la elevación máxima de agua en una inundación de tiempo de retorno de 1-2

años—, y reconocer la importancia de los rasgos naturales del paisaje (Zeedyk y Clothier, 2009). Los proyectos deben diseñarse no solo para soportar las avenidas históricas, sino también para transportar sedimento durante las inundaciones anuales más pequeñas, con el fin de facilitar el desarrollo de llanuras de inundación y promover la recolonización de vegetación riparia nativa (Rosgen, 1996). Este enfoque promueve que los procesos naturales se lleven a cabo de forma que las redes de drenaje puedan nuevamente ser mantenidas por la naturaleza, sin ningún costo para nosotros (Rosgen, 1996). Para tener éxito con estas técnicas es importante tener el entrenamiento adecuado. El enfoque de ingeniería convencional de usar hormigón, desmontar vegetación y rectificar cauces es completamente contraproducente, y de hecho es una fuerza desestabilizadora en cuencas en toda nuestra región (Rosgen, 1996). A continuación presentamos cuatro técnicas que, en conjunto, definen un nuevo enfoque a la restauración de cuencas. Dos de estas técnicas se aplican sobre caminos que han desviado o interceptado flujos naturales de agua y dos se aplican a cárcavas o cauces erosionados.

I. RESTAURACIÓN DE TRAYECTORIAS DE FLUJO HISTÓRICAS

En 2001, *Stream Dynamics* realizó un proyecto de restauración en el Parque Nacional Valles Caldera, en el norte de Nuevo México. Primero se llevó a cabo una evaluación aérea de la zona de estudio y después se verificaron en campo las áreas problemáticas identificadas desde el aire. Posteriormente, se seleccionaron los puntos problemáticos que se consideró no podrían resolverse por sí solos con los procesos naturales. Se realizaron más de 50 intervenciones con el objeto de restaurar la función natural de la cuenca.

A continuación exponemos un ejemplo de corrección de trayectoria de flujo desviada sobre un camino en desuso que había estado drenando un ecosistema de pradera húmeda. La cuenca en cuestión tiene una superficie de 120 hectáreas que reciben escurrimientos de montañas de 3,100 msnm hacia un valle de 2,500 msnm. Cuando se

restauraron las trayectorias de flujo originales, se recuperaron 2.2 hectáreas de pradera húmeda histórica, que volvieron a irrigarse naturalmente.

La figura 6 muestra el trabajo realizado en un punto. En la figura 6a, la flecha roja muestra el curso del agua al pie de una pendiente que había sido captado por un antiguo camino (identificado por dos líneas punteadas cafés). La flecha azul muestra el curso histórico del agua antes del desvío por el camino. La figura 6b muestra el trabajo con retroexcavadora para bloquear el paso del agua por el viejo camino. La figura 6c muestra bloques de pasto (rectángulo punteado) que se conservan al hacer la excavación, para su posterior aplicación en la cubierta de la intervención finalizada. En la figura 6d el dique se ha recubierto con las capas de pasto recuperado (rectángulo punteado) y la flecha azul muestra la trayectoria histórica de flujo restaurada.

A través de imágenes de Google Earth se puede observar la superficie de humedal que fue restaurado, en menos de un año, con este proyecto (figura 7). La figura 7a muestra una trayectoria de agua capturada por un camino viejo (flecha roja), y el trayecto de flujo histórico (flecha azul). La figura 7b muestra la trayectoria de flujo restaurada, así como el área de humedal restaurado.

II. DRENAJE DE CAMINOS CON CAPTACIÓN DE AGUA

Como se señaló con anterioridad, los caminos suelen concentrar los escurrimientos de agua y conducirlos a alta velocidad y con sedimento hacia los cuerpos naturales de agua. Afortunadamente, hay una solución sencilla a esto. Los bordos de desvío u hondonadas rodantes (*Rolling Dips*) son inversiones de pendiente que se construyen en los caminos para sacar agua de ellos y dirigirla hacia una zona lateral deseada —algún punto donde el escurrimiento de la ladera capturada por el camino, además del escurrimiento del camino mismo, pueda infiltrarse en el suelo antes de que llegue a un cuerpo superficial de agua (Zeedyk, 2006). La figura 8 muestra las dimensiones aproximadas que debe tener la intervención en el camino de terracería.

FIGURA 6. Corrección de trayectoria de flujo desviada por camino en desuso.

FIGURA 6A

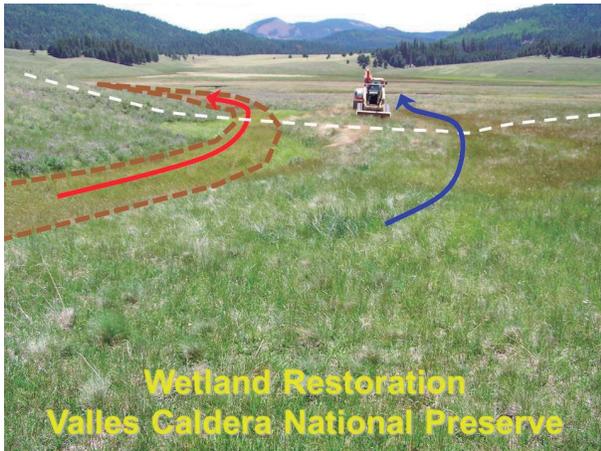


FIGURA 6B



FIGURA 6C



FIGURA 6D



Fuente: Van Clothier.

FIGURA 7. Restauración de trayectorias de flujo en Valles Caldera, Nuevo México.

FIGURA 7A. Julio 4, 2011.



FIGURA 7B. Mayo 4, 2012.

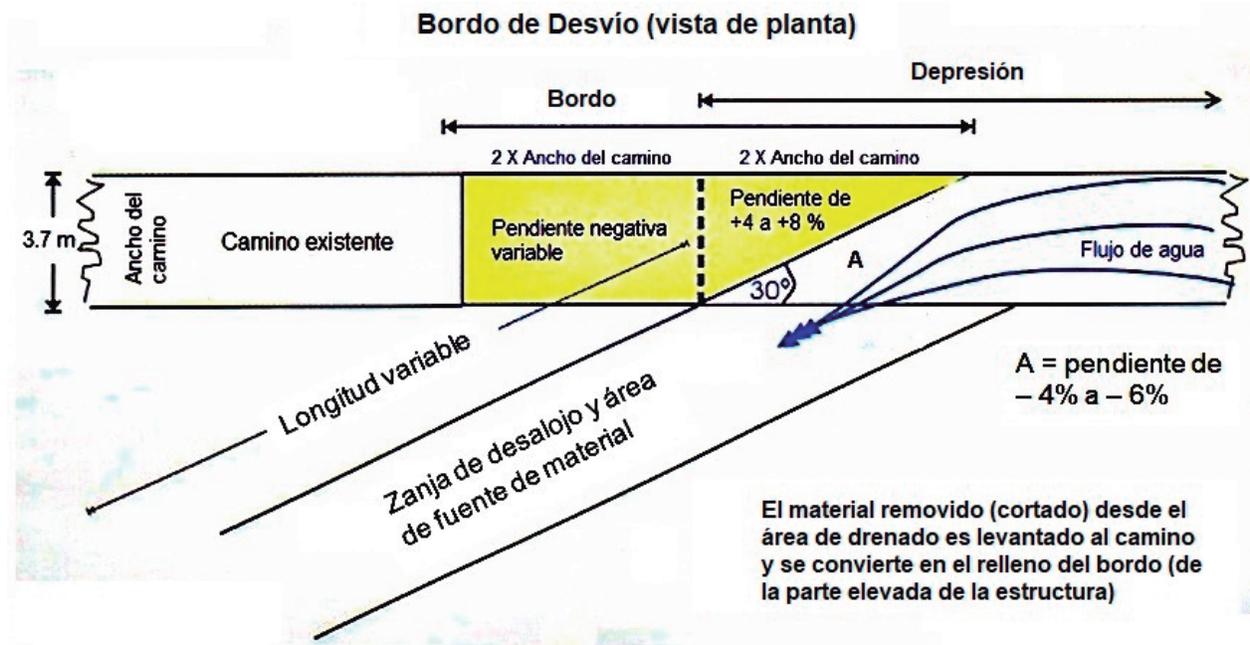


Fuente: Google Earth.

Un adecuado drenaje hace que la infraestructura de caminos sea prácticamente transparente al funcionamiento de la cuenca (Zeedyk 2006a). También resulta en mucho menor mantenimiento,

hace el tránsito por los caminos más seguro, y tiene el beneficio adicional de brindar humedad suplementaria a zonas adyacentes al camino, favoreciendo a la vegetación con este recur-

FIGURA 8. Esquema de un Bordo de desvío.



Fuente: Zeedyk, 2006a (traducción propia).

so valioso (Zeedyk 2006a). Esta técnica se está aplicando ya extensivamente en Nuevo México y Arizona. En la figura 9 se muestra el antes y el después de una intervención con bordo de desvío. En la figura 9a la flecha roja representa el escurrimiento del agua por el lado del camino, creando una cárcava y transporte de sedimento a cuerpos superficiales de agua. En la figura 9b se ha generado un pequeño bordo con pendiente muy moderada (no se trata de un tope de veloci-

dad) que desvía el agua fuera del camino hacia un cuenco donde se infiltra el agua y se capta sedimento antes de que este pueda ser transportado a alguna corriente superficial.

III. RESTAURACIÓN DE RIBERAS Y CAUCES EN EROSIÓN

Hay miles de kilómetros de riberas erosionándose en Nuevo México, y lo mismo aplica a los estados colindantes en México. Se han desarrollado

FIGURA 9. Desvío y captación de agua en zona lateral de camino.



Fuente: Van Clothier

FIGURA 9A. Antes



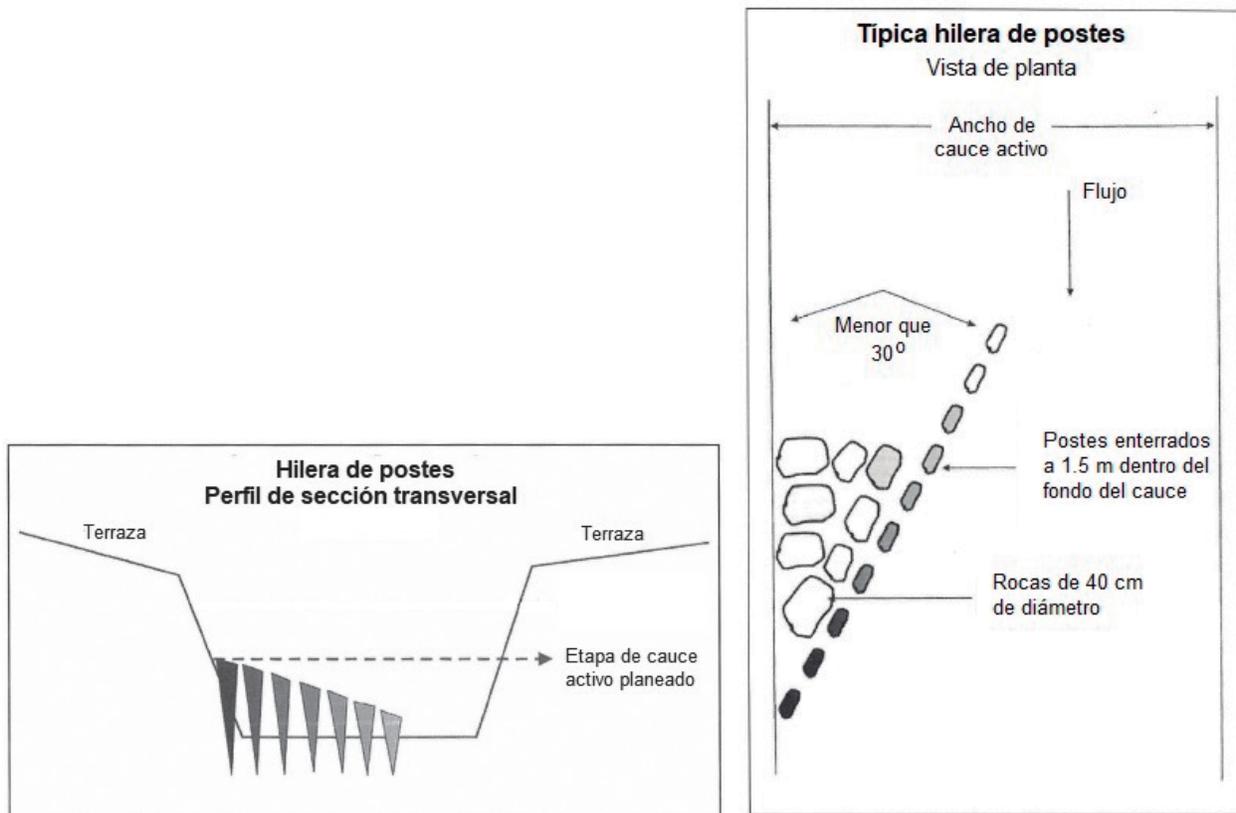
FIGURA 9B. Después

nuevas tecnologías de bajo impacto para promover el restablecimiento de la vegetación nativa, atrapar sedimentos y proteger las riberas de la erosión (Zeedyk y Clothier, 2009). En la figura 10 se muestra el esquema de una hilera de postes (*post vane*) —frecuentemente de táscate— en el fondo del arroyo en forma de una barrera porosa apuntando aguas arriba. La hilera se instala a un ángulo hacia la corriente, de forma de poder atrapar las partículas más grandes de sedimento. La estructura solo se instala hasta la mitad del cauce; se dejan espacios entre los postes, y los postes solo sobresalen a la altura del cauce activo (la elevación máxima de agua en una inundación de un intervalo de uno a dos años de retorno). El propósito de la estructura no es bloquear el flujo del agua, sino sobre todo reducir su velocidad ligeramente para provocar que las partículas más grandes de sedimento se detengan y depositen.

La figura 11a muestra una hilera de postes que se instaló para proteger la erosión de la ribera

de un arroyo en Burro Ciénega, Nuevo México. Una retroexcavadora instaló la hilera de postes en el fondo del arroyo, en forma de una lengüeta apuntando aguas arriba —extendiéndose hacia el centro del cauce a un ángulo con la ribera—. La dirección de la corriente en la imagen es de izquierda a derecha. Cuando se rellenó la zanja, los postes fueron recortados a solo 30 cm por encima de la superficie. Esto está diseñado para reducir ligeramente el flujo del agua del lado de la ribera en erosión, causando la deposición del sedimento. Con el paso del tiempo, este sedimento es recolonizado con vegetación riparia nativa. La figura 11b muestra el efecto en esta corriente efímera después de cinco años de eventos de inundación. El cauce del arroyo se ha alejado de la ribera que se estaba erosionando y el sitio se ve natural. Para que esto funcione, debe diseñarse la intervención tomando en cuenta el patrón de meandros del cauce en particular con el que se está trabajando.

FIGURA 10. Esquema de una hilera de postes.



Fuente: Adaptado de Zeedyk, 2006b (traducción propia).

FIGURA 11. Hilera de postes para restaurar una ribera erosionada.
Burro Ciénega, Nuevo México. (Vane 3, Station 6300).

FIGURA 11A. Octubre 13, 2005.



Fuente: Van Clothier.

Esta técnica utiliza el poder de un arroyo en inundación para sanar sus propias riberas al depositar sedimentos en las ubicaciones deseadas. La estructura se mantiene por sí misma gracias a la vegetación que crece sobre el sedimento depositado al lado de la hilera de postes. Es importante excluir al ganado de las orillas del arroyo para que la vegetación se pueda establecer. Con el tiempo, no solo se detiene la erosión del cauce, sino también crece la ribera hacia la corriente, y la alejando permanentemente de la orilla que antes se estaba erosionando.

FIGURA 11B. Agosto 8, 2010.



En la figura 12 se observa la deposición de sedimento creada en un periodo de cuatro años y medio por otra hilera de postes y el crecimiento de vegetación que protege la ribera. La corriente se mueve en la dirección de derecha a izquierda. Obsérvese la gran cantidad de roca y grava que se depositó por las inundaciones naturales y cómo la vegetación comienza a estabilizar la deposición. Con un entendimiento de la naturaleza de los procesos de los cauces de arroyos podemos dejar que el agua haga el trabajo de restaurar los arroyos.

FIGURA 12. Hilera de postes para restaurar ribera erosionada en Burro Ciénega, NM (Vane 2, Station 5900).



FIGURA 12A. Marzo 24, 2006.

Fuente: Van Clothier.



FIGURA 12B. Agosto 28, 2010.

La comprensión de los procesos de cauces es indispensable para que funcione esta técnica. Un arroyo sano se mueve en meandros con una longitud de onda a escala con la superficie de la cuenca, de tal manera que los postes deben colocarse con el espaciado correcto para ser efectivos. Y una precaución: proteger ambas riberas en un mismo punto causaría una incisión del cauce, aumentando la erosión y dañando más el recurso. Esta técnica fue desarrollada por Bill Zeedyk y Van Clothier en Nuevo México, y se describe en detalle en su libro *Let the Water do the Work, Induced Meandering, an Evolving Method for Restoring Incised Channels* (Zeedyk y Clothier, 2009).

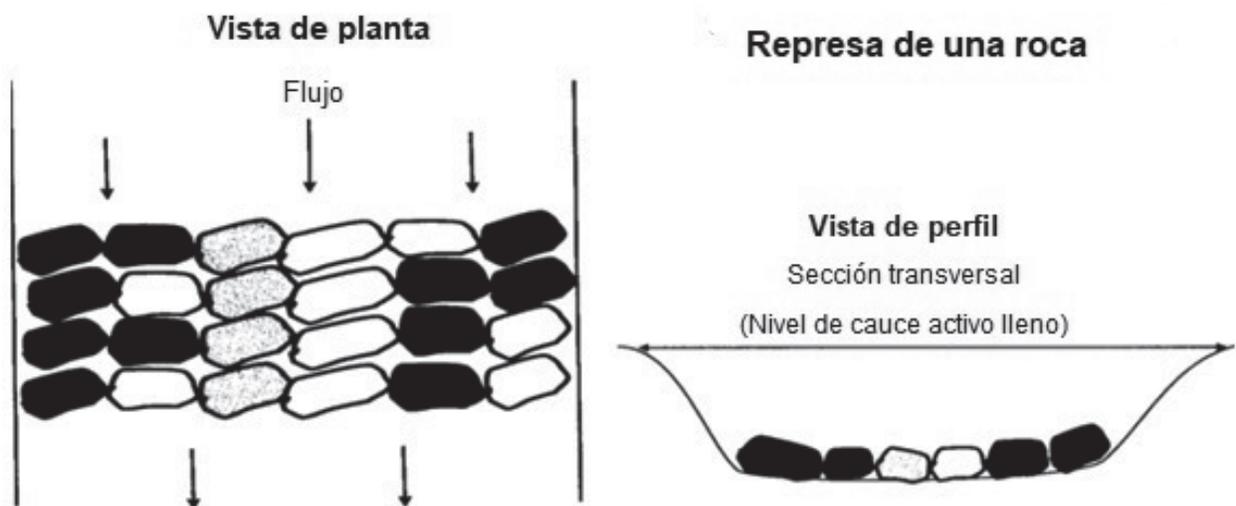
IV. REPRESAS DE UNA ROCA

Muchos miles de kilómetros de tributarios de primer y segundo orden están erosionados debido a 150 años de pastoreo de ganado, y se están haciendo más profundos con cada tormenta que cae sobre el *pastizal moderno*. Una técnica de restauración llamada represa de una roca (*One Rock Dam*) ha sido muy exitosa en Arizona, Nuevo México, y el norte de Sonora. Como se muestra en la figura 13, estas represas solo tienen la altura de una roca y cubren el fondo del arroyo.

El propósito es detener el corte en el cauce y proveer espacio para que se colecte el sedimento con el fin de que crezca la vegetación en su fon-

do y comience la sanación. Los resultados varían según el régimen de escorrentía, así como la calidad del diseño y la construcción. En los casos exitosos, una serie larga de represas de una roca puede restaurar la cubierta vegetal al fondo de un cauce, revirtiendo el ciclo de erosión y permitiendo que el cauce se llene gradualmente con el tiempo. Una represa de una roca no debe ser más alta que 15 cm-30 cm, para que no genere caídas que aumenten la velocidad del agua y comiencen a degradar el cauce. Se inicia escarbando una zanja somera perpendicular al cauce en el extremo aguas abajo de la estructura. Después se acomoda una hilera de rocas pesadas en esta zanja y, construyendo en sentido aguas arriba, se colocan cuidadosamente por lo menos cinco hileras de roca en acomodo plano sobre el fondo del cauce. Cada hilera debe colocarse firmemente contra la hilera anterior. Deben usarse piedras pesadas que no se las lleve la corriente en una crecida. Para un cauce de 30 cm se recomienda de 10 kg a 20 kg de rocas para la hilera de aguas abajo. Piedras más pequeñas pueden usarse si se apilan cuidadosamente de manera de que la estructura se mantenga durante una avenida. Los eventos de escorrentía llenarán los huecos entre las rocas con sedimento fino, materia orgánica y semillas que comenzarán a crecer.

FIGURA 13. Esquema de una represa de una roca.



Fuente: Zeedyk y Clothier, 2009. Traducción propia.

Pequeños surcos o zanjas y tributarios de primer orden pueden revegetarse completamente y comenzar el largo y lento proceso de rellenado. La exclusión del ganado de los cauces es indispensable para obtener resultados óptimos. El propósito de las rocas es dar un impulso al proceso de sanación por medio de la vegetación. Si no se excluye al ganado, puede haber algún crecimiento vegetal, pero el ganado consumirá todo el nuevo crecimiento, pateará las piedras y habrá que iniciar de nuevo desde cero. La figura 14 muestra el antes y el después de la instalación de una represa de una roca en un tributario del río Mimbres, NM, y la figura 15 una en el rancho Glenn, de Arizona.

DISCUSIÓN

Las cuatro técnicas propuestas han tenido mucho éxito en Nuevo México, Arizona, y en algunas partes donde se han implementado en Sonora, Chihuahua y Baja California Sur. Se esperaría un éxito similar en su aplicación a otras zonas de pastizal árido y semiárido en México. Se trata de técnicas relativamente sencillas con mucho potencial para ayudar a la recuperación de la hidrología y la conservación del recurso suelo en estos ecosistemas. Aunque algunos de los ejemplos mostrados se realizaron con maquinaria pesada, también es posible hacer estas intervenciones con herramien-

FIGURA 14. Represa de una roca en Ancheta Creek, tributario del río Mimbres, NM.

FIGURA 14A. Septiembre 18, 2004.



Fuente: Van Clothier.

FIGURA 14B. Mayo 23, 2008.



FIGURA 15. Represa de una roca en el rancho Glenn, Douglas, Arizona.

FIGURA 15A. Julio 2, 2003.



Fuente: Van Clothier.

FIGURA 15B. Septiembre 8, 2003.



ta sencilla (picos, palas) y trabajo manual. Las intervenciones en caminos de terracería, tanto en uso como en desuso, son poco problemáticas, pues no necesariamente requieren un cambio o ajuste en las prácticas de uso del suelo. En esencia brindan beneficios inmediatos sin grandes obstáculos. Las intervenciones para reducir erosión en surcos, cárcavas, pequeños tributarios y en las riberas de los ríos y arroyos sí requieren de la exclusión del ganado, por lo menos de esas áreas, y en ese sentido tienen un grado de complejidad mayor, pues es necesario lograr y mantener acuerdos con los propietarios del ganado.

En lo que se refiere a las propuestas más sistémicas que se hacen en este documento para una atención integral al problema del deterioro de pastizales en zonas áridas y semiáridas —reducir las tasas de fertilidad humana y los impactos de su consumo (Ripple *et al.*, 2017), reconocer socialmente y atender el impacto que tiene la ganadería actualmente en los sistemas naturales (Steinfeld *et al.*, 2006; Beschta *et al.*, 2013), permitir los regímenes naturales de incendio (McPhearson y Weltzin, 2000) y reintroducir depredadores superiores en estos ecosistemas Beschta *et al.*, 2013)—, somos conscientes de que son temas multidimensionales con causas multifactoriales, que requieren discusión y reflexión colectivas muy serias, que se salen del alcance del presente escrito. Sin embargo, es imprescindible comenzar estas conversaciones entre actores públicos, privados, sociales y académicos y, en su momento, apoyar las transiciones elegidas con políticas públicas efectivas, comunicación, sensibilización, capacitación (a productores y consumidores) y mucho monitoreo, seguimiento y adaptación de las estrategias.

CONCLUSIONES

La introducción de caminos y grandes hatos ganaderos en los pastizales semidesérticos del norte de México y suroeste de Estados Unidos han generado cambios profundos en la hidrología de estos ecosistemas. Esto ha llevado a un tras-

torno en el funcionamiento de la cuenca, tanto en condiciones de baja precipitación como en años de precipitación abundante, y causa ciclos repetitivos de erosión, sequía e inundación. En este artículo se presentaron estrategias de intervención en el paisaje que pueden tener un gran impacto en el restablecimiento del adecuado funcionamiento hidrológico de la cuenca en estos ecosistemas.

Los caminos suelen concentrar las escorrentías hacia los cuerpos superficiales de agua y con ello transportar rápidamente grandes cargas de sedimento que contaminan estas cuerpos naturales. Hay técnicas que pueden aplicarse a los caminos para revertir estos efectos. En el caso de caminos rurales en desuso, se pueden restaurar las trayectorias de flujo históricas para irrigar naturalmente zonas que se vieron drenadas por el trazo carretero. En el caso de caminos de terracería en uso, se pueden construir hondonadas rodantes o bordos de desvío del escurrimiento que permiten capturar el agua de lluvia en terrenos adyacentes a los caminos, generando mayor humedad —recurso muy valioso en zonas semiáridas—, al mismo tiempo que se protege la integridad de los caminos y la calidad del agua superficial.

Para el control de erosión en cauces de ríos y arroyos, se pueden proteger y restaurar las riberas erosionadas con la técnica de hileras de postes colocadas contra corriente. Finalmente, para corregir la erosión en pequeñas cárcavas y tributarios de primer y segundo orden, se pueden utilizar las represas de una roca, que utilizadas en serie son muy efectivas para detener la erosión, atrapar sedimento y regenerar la cubierta vegetal.

Estas técnicas de intervención en el paisaje que restauran física y biológicamente el deterioro de las cuencas semidesérticas deben asociarse a otras políticas y prácticas para lograr integralmente su cometido. Entre las estrategias sistémicas que es necesario promover se incluye la reducción o eliminación de hatos ganaderos, la reintroducción de depredadores naturales, el abandono de la práctica de supresión de incendios y, más generalmente, la reducción del cre-

ciente impacto global de la población humana. Si se complementan entre sí las técnicas y estrategias expuestas en este escrito, pueden ayudar a restablecer la salud de las cuencas en áreas de pastizal en zonas áridas y semiáridas.

El buen funcionamiento de las cuencas redundará en comunidades sustentables, al aumentar el nivel de los mantos freáticos, reducir la erosión y el deterioro del recurso suelo, así como reducir la vulnerabilidad de las poblaciones aguas abajo a grandes eventos de inundación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a El Colegio de la Frontera Norte por apoyo brindado para la presentación inicial de este trabajo en el Primer Congreso Nacional de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (UdG, noviembre de 2017). Asimismo agradecemos a C. Weber por apoyo en la búsqueda de literatura y a G. Lizárraga por la organización de las referencias y la edición de figuras en español.

Finalmente agradecemos a los dictaminadores anónimos por sus observaciones y recomendaciones para mejorar la calidad del artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Berger, K. M. (2006), "Carnivore-livestock Conflicts: Effects of Subsidized Predator Control and Economic Correlates on the Sheep Industry", *Conservation Biology* 20(3), pp. 751-761.
- Beschta, R. L.; Donahue, D. L.; Della Sala, D. A.; Rhodes, J. J.; Karr, J. R.; O'Brien, M. H.; Fleischner, T. L. y C. Deacon-Williams (2013), "Adapting to Climate Change on Western Public Lands: Addressing the Ecological Effects of Domestic, Wild and Feral Ungulates", *Environmental Management*, 51, pp. 474-491. Disponible en: DOI 10.1007/s00267-012-9964-9. Consultado: 26 de abril de 2019.
- Brunelle, A.; Minckley, T. A.; Delgadillo, J. y S. Blissett, (2013), "A Long-Term Perspective on Woody Plant Encroachment in the Desert Southwest, New Mexico, USA", *Journal of Vegetation Science*, 25 (3), pp. 829-838.
- Crist, E.; Mora, C. y R. Engelman (2017), "The Interaction of Human Population, Food Production, and Biodiversity Protection", *Science* 356, pp. 260-264.
- Decker, D. (2008), "Douglas Arizona Natural Resource Conservation Service", comunicación personal con V. Clothier.
- Dobyns, H. F. (1981), *From Fire to Flood: Historic Human Destruction of Sonoran Riverine Oases*, Socorro, New Mexico, USA, Ballena Press.
- Duesterhaus, J. L.; Ham, J. M.; Owensby, C. E. y J. T. Murphy, (2008), "Water Balance of a Stock-Watering Pond in the Flint Hills of Kansas", *Rangeland Ecology and Management* (61), pp. 329-338.
- Duniway, M. C.; Herrick, J. E.; Pyke, D. A. y P. D. Toledo (2010), "Assessing Transportation Infrastructure Impacts on Rangelands: Test of a Standard Rangeland Assessment Protocol", *Rangeland Ecology and Management*, 63(5), pp. 524-536.
- Dutcher, J.; Dutcher, J. (realizadores); Manfull, J., Redford, R. (presentadores) y J. Manfull (2013), *The Hidden Life of Wolves*, Washington, D.C., National Geographic Society.
- Eldridge, D.; Wang, L. y M. Ruiz-Colmenero (2015), "Shrub Encroachment Alters the Spatial Patterns of Infiltration", *Ecohydrology*, 8, pp. 83-93.
- Hendricks, J. (2012), "Profesor de hidrología de la zona vadosa", New Mexico Institute of Mining and Technology, comunicación personal con V. Clothier.
- Jacobs, L. (1991), *Waste of the West. Public Lands Ranching*, Tucson, Arizona, Arizona Lithographers.
- Jones, J. A., Swanson, F. J., Wemple, B. C. y Snyder K. U. (2000), "Effects of Roads on Hydrology, Geomorphology and Disturbance Patches in Stream Networks", *Conservation Biology*, 14(1), pp. 76-85.
- Knopf, F. L. (1994), "Avian Assemblages on Altered Grasslands", *Studies in Avian Biology*, 15, pp. 247-257.
- Lake, P. S. (2003), "Ecological Effects of Perturbation by Drought in Flowing Waters", *Freshwater Biology*, 48, pp. 1161-1172. Disponible en: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x>. Consultado: 30 de abril 2019.
- Leopold, S. (1949), "Adios Gavilán", *Pacific Discovery*, enero-febrero, pp. 4-13.

- McGinty, A.; Thurow, T. L. y C. A. Taylor (2000), "Improving Rainfall Effectiveness on Rangeland. AgriLife Extension. Texas A&M System E155". Disponible en: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/87677>. Consultado: 22 de febrero de 2019.
- McPherson, G. R. y Weltzin, J. F. (2000), "Disturbance and Climate Change in United States/Mexico Borderland Plant Communities: A State-of-the-Knowledge Review", *Gen. Tech. Rep.*, RMRS-GTR-50, Fort Collins, CO, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Disponible en: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-50>. Consultado: 30 de abril 2019.
- Melville, E. (1994), *A Plague of Sheep: Environmental Consequences of the Conquest of Mexico*, New York, Cambridge University Press.
- Metcalf, S. E.; Street-Perrott, F. A.; Perrott, R. A. y D. D. Harkness (1991), "Palaeolimnology of the Upper Lerma Basin, Central Mexico: A Record of Climatic Change and Anthropogenic Disturbance since 11 600 yr BP", *Journal of Paleolimnology*, 5, pp. 197-218. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00200345>. Consultado 30 de abril de 2019.
- Miller, G. T. (1996), *Living in the Environment: Principles, Connections, and Solutions*, 9th ed., Belmont, CA, Adsworth Publishing Company.
- Nash, M. S.; Whitford, W. G.; de Soyza, A. G.; Van Zee, J. W. y K. M. Havstad (1999), "Livestock Activity and Chihuahuan Desert Annual-Plant Communities: Boundary Analysis of Disturbance Gradients", *Ecological Applications*, 9, pp. 814-823.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2016), *Grazing Management and Soil Health: Keys to Better Soil, Plant, Animal, and Financial Health*, United States of America, USDA.
- Okin, G.; Sala, O.; Vivoni, E.; Zhang, J. y A. Bhattachan (2018), "The Interactive Role of Wind and Water in Functioning of Drylands: What does the Future Hold?" *BioScience*, 68, pp. 670-677. Disponible en: [doi:10.1093/biosci/biy067](https://doi.org/10.1093/biosci/biy067). Consultado: 26 de abril de 2019.
- Puigdefábregas, J. (1998), "Ecological Impacts of Global Change on Drylands and Their Implications for Desertification", *Land Degradation and Development*, 9, pp. 393-406. Disponible en: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199809/10\)9:5%3C393::AID-LDR301%3E3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199809/10)9:5%3C393::AID-LDR301%3E3.0.CO;2-F). Consultado: 30 de abril 2019.
- Rauzi, F.; Fly, C. L. y E. J. Dyksterhuis (1968), *Water Intake on Mid-Continental Rangelands as Influenced by Soil and Plant Cover*, USDA Tech., B-1390.
- Ripple, W. J.; Wolf, C.; Newsome, T. M.; Galetti, M.; Alamgir, M.; Crist, E.; Mahmoud, M. I. y W. F. Laurance (2017), "World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice", *BioScience*, 67(12), pp. 1026-1028. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix125>. Consultado: 26 de abril de 2019.
- Ripple, W. J.; Smith, P.; Haberl, H.; Montzka, S. A.; McAlpine, C. y D. H. Boucher (2014), "Ruminants, Climate Change and Climate Policy", *Nature Climate Change*, 4, pp. 2-5. Disponible en: DOI:10.1038/nclimate2081. Consultado : 26 de abril de 2019.
- Rosgen, D. (1996), *Applied River Morphology*, 2^a ed., Wildland Hydrology.
- Sandvig, R. M. y F. M. Phillips (2006), "Ecohydrological Controls on Soil Moisture Fluxes in Arid to Semiarid Vadose Zones", *Water Resour. Res.*, 42, W08422, Disponible en: [doi:10.1029/2005WR004644](https://doi.org/10.1029/2005WR004644). Consultado: 30 de abril de 2019.
- Sayre, N. F. (2007), "A History of Working Landscapes: The Altar Valley, Arizona, USA", *Rangelands*, 29(3), pp. 41-45.
- Stahle, D. W.; Cook, E. R.; Burnette, D. J.; Villanueva, J.; Cerano, J.; Burns, J. N.; Griffin, D.; Cook, B. I.; Acuña, R.; Torbenson, M. C. A.; Paul Szejner, P. e I. M. Howarda (2016), "The Mexican Drought Atlas: Tree-ring Reconstructions of the Soil Moisture Balance during the Late Prehispanic, Colonial, and Modern Eras", *Quaternary Sciences Reviews*, vol. 149, 1, octubre, pp. 34-60. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>. Consultado: 30 de abril de 2019.
- Steinfeld, H. et al., (2006), *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*, Food and Agriculture Organization (FAO) of United Nations.
- Stephens, D. B. (1995), *Vadose Zone Hydrology*, Boca Raton, CRC Press. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9780203734490>. Consultado: 30 de abril de 2019.

- Thurrow, T. L. (1991), "Hydrology and Erosion", en R. K. Heitschmidt y J. W. Stuth (Ed.), *Grazing Management: An Ecological Perspective*, Portland, Timber Press, pp. 141-160.
- (2000), "Hydrologic Effects on Rangeland Degradation and Restoration Processes", en O. Arnalds y S. Archer (Ed.), *Rangeland Desertification. Advances in Vegetation Science*, vol 19, Dordrecht, Springer, pp. 53-66.
- United States Department of Transportation (USDOT) (2017), *Public Road Length, Miles by Ownership*, Bureau of Transportation Statistics. Disponible en: <https://www.bts.gov/content/public-road-length-miles-ownership>. Consultado: 7 de mayo de 2019.
- Van Auken, O. W. (2000), "Shrub Invasions of North American Semiarid Grasslands", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, p. 197-215.
- Williams, W. A. y Albertson, J. D. (2006), "Dynamical Effects of the Statistical Structure of Annual Rainfall on Dryland Vegetation", *Global Change Biology*, 12(5), pp. 777-792. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01111.x>. Consultado: 26 de abril de 2019.
- Zeedyk, B. (2002), "Experto en restauración de ríos de Nuevo México", comunicación personal con V. Clothier.
- (2006a), *Water Harvesting from Low Standard Rural Roads*, The Quivira Coalition, Zeedyk Ecological Consulting LLC, The Rio Puerco Management Committee -Watershed Initiative, and the New Mexico Environment Department -Surface Water Quality Bureau. Disponible en: <http://roadsforwater.org/wp-content/uploads/2013/10/waterharvesting-from-roads.pdf>. Consultado: 25 de abril de 2019.
- (2006b), *An Introduction to Induced Meandering: A Method for Restoring Stability to Incised Stream Channels*, USA, Earth Works Institute, The Quivira Coalition, Zeedyk Ecological Consulting.
- y V. Clothier (2009), *Let the Water do the Work. Induced Meandering, an Evolving Method for Restoring Incised Channels*, Chelsea Green Press.
- Zeedyk, W. (1996), *Managing Roads for Wet Meadow Ecosystem Recovery*, US Department of Agriculture, Forest Service, report no. FHWA-FLP-96-016.