

Funcionamiento ecohidrológico de una cuenca con obras secundarias de trasvase Ecohydrological catchment functioning with secondary transfer works

Elda Barbosa-Briones^{1†} , Francisco Javier Peña-de Paz¹  y
Carlos Alfonso Muñoz-Robles² 

¹ El Colegio de San Luis, A. C. Parque de Macul 155, Fraccionamiento Colinas del Parque. 78294 San Luis Potosí, S. L. P., México.

[†] Autora para correspondencia (elda.bb@gmail.com)

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Altair 200, Col. Del Llano. 78377 San Luis Potosí, S. L. P., México.
Editor de Sección: Dr. Fabián Fernández Luqueño

RESUMEN

Para movilizar el agua de una cuenca a otra se han realizado obras hidráulicas como los trasvases que junto con los trabajos asociados a estos han afectado múltiples factores ambientales y sociales, entre otros. En este estudio se evaluaron los efectos de trasvases en la estructura y funcionamiento ecohidrológico de la cuenca de la presa de La Muñeca localizada en el municipio de Tierra Nueva, San Luis Potosí. Se realizaron transectos de 50 m de longitud siguiendo el método Landscape Function Analysis (LFA) para medir características de la estructura del paisaje en parches con diferente cobertura vegetal y se elaboró un mapa de la cobertura del suelo. A partir de simulaciones de lluvia en estos parches e inter-parches se determinó el promedio de escorrentía y la tasa de infiltración final, que fueron mapeadas para modelar la distribución espacial de la acumulación de escorrentía. El modelo de regresión usado para mapear el porcentaje de la cobertura del suelo fue significativo ($P < 0.0001$). Hacia la zona oeste del área de estudio se generó mayor escorrentía por ser un área con menor cobertura del suelo, mientras que en la zona este se presentó la mayor acumulación de escorrentía y sedimentos, por encontrarse una mayor proporción de parches de cobertura densa. En general, los resultados comprueban la viabilidad de utilizar métricas, simulaciones de lluvia y modelado espacial para evaluar el funcionamiento ecohidrológico y así determinar la acumulación de escorrentía a diversas escalas del paisaje.

Palabras clave: *acumulación de escorrentía, inter-parches, parches, simulaciones de lluvia.*

SUMMARY

Moving water from one catchment to the other implies hydraulic works, such as water transfers, which together with the associated infrastructure have affected environmental and social factors, among others. Thus, the present study evaluates the effects of water transfers on structure and ecohydrological functioning in La Muñeca catchment, located in the Municipality of Tierra Nueva, San Luis Potosí. Landscape structure characteristics were measured by 50 m landscape function analysis (LFA); the transects are oriented downslope, where patches with dense, intermediate, and low land cover (inter-patches) were identified. A land cover map was generated using a regression model. Average run-off and final infiltration rates were determined from rainfall simulations in patches and inter-patches and mapped to model the spatial distribution of run-off accumulation. The regression model used to map ground cover was significant ($P < 0.0001$). High run-off was generated towards the western part of the catchment as ground cover was low. In contrast, the eastern part of the study area



Cita recomendada:

Barbosa-Briones, E., Peña-de Paz, F. J., & Muñoz-Robles, C. A. (2023). Funcionamiento ecohidrológico de una cuenca con obras secundarias de trasvase. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-13. e1678. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1678>

Recibido: 4 de enero de 2023.
Aceptado: 26 de abril de 2023.
Artículo. Volumen 41.
Julio de 2023.

had the highest accumulation of run-off and sediment because of a higher proportion of dense cover patches. The results show the feasibility of using landscape metrics, rainfall simulations, and spatial modeling to evaluate ecohydrological functioning and thus determine run-off accumulation at various landscape scales.

Index words: *inter-patches, rainfall simulations, run-off accumulation, patches.*

INTRODUCCIÓN

Los trasvases son dispositivos sociotécnicos para movilizar, transportar, desplazar y relocalizar el agua de una cuenca a otra. Para esto se tienen que vencer los parteaguas de las cuencas. Esto se traduce en cambios importantes en términos políticos, socioculturales, hidrológicos y bióticos, pues implican transformaciones territoriales profundas (Peña y Granados, 2021). Junto con los trasvases, se crean obras secundarias como caminos, acueductos y plantas de tratamiento, que también causan alteraciones en los ecosistemas por ocasionar un cambio de uso del suelo.

Los ecosistemas son dinámicos y sostenidos por los procesos de flujo de recursos genéticos, energía y materia que se llevan a cabo en ellos. Sin embargo, las actividades humanas como la agricultura de riego y temporal, el pastoreo extensivo de ganado y la explotación forestal de productos maderables con varias unidades de producción rural, junto con los cambios en su estructura provocan perturbaciones en los procesos naturales. La condición de la superficie del suelo es un factor que controla el agua que se infiltra y aquella que se desplaza en la superficie por medio de la escorrentía (Chen, Sela, Svoray y Assouline, 2013; Muñoz-Robles, Reid, Tighe, Briggs y Wilson, 2011a, 2011b).

Además, la humedad del suelo es un factor clave para la producción primaria y la mineralización de nutrientes, que a su vez depende de la disponibilidad de agua (Rodríguez-Iturbe y Porporato, 2005). Es decir, los elementos biológicos característicos se asocian de manera espacio-temporal formando unidades estructurales y funcionales (Ledezma y García, 2015). De acuerdo con Tongway y Hindley (2004) es importante evaluar los cambios en la estructura y función de los ecosistemas en zonas áridas y semiáridas, donde la recuperación de la cobertura vegetal es muy lenta. Entre las principales funciones de la vegetación se encuentran proteger el suelo contra la erosión, regular la escorrentía, mantener y restituir la fertilidad de los suelos, procesos útiles en la aportación de materia orgánica y el ciclo de nutrientes (Ledezma y García, 2015).

En zonas áridas y semiáridas, los ecosistemas se estructuran en mosaicos de dos fases, formados por una matriz abierta por la intercalación de la vegetación; una fase consiste en las áreas con poca o nula vegetación (inter-parches) y la otra, con una cobertura vegetal mayor (parches) (Valentin, D'Herbès y Poesen, 1999). En este tipo de ecosistemas, la escorrentía obedece a un sistema fuente-sumidero, donde las fuentes de escorrentía son los inter-parches, que tienen mayor nivel de compactación y menor capacidad de infiltración y los sumideros o parches, que capturan y retienen la escorrentía producida por los inter-parches dada su mayor capacidad de infiltración (Wilcox, Breshears y Allen, 2003).

Así, la escorrentía proveniente de los inter-parches puede seguir su camino por áreas de baja cobertura o dirigirse hacia los parches, en función del arreglo espacial de éstos (Ludwig y Tongway, 1995; Puigdefábregas, 2005). De esta manera, al generarse mayor escorrentía, esta se va acumulando y es especialmente importante para comprender los controles topográficos sobre los flujos de agua, carbono, nutrientes y sedimentos dentro y sobre las cuencas hidrográficas (Do, Limet y Melin, 2011).

Hoy en día existen numerosas herramientas computacionales, tales como el aprendizaje computacional (Machine Learning en inglés) que tienen como objetivo aplicar técnicas, métodos y algoritmos con los que las computadoras aprendan a

reconocer patrones a partir de datos de un modelo de deducción con propósitos predictivos (Alpaydin, 2014). Estos métodos son utilizados cada vez con mayor frecuencia, para el procesamiento de imágenes de satélite en la evaluación de los recursos ecosistémicos.

En este sentido, el procesamiento de imágenes de satélite se ha utilizado para el estudio de la cobertura de suelo, lo cual se realiza mediante la observación visual, utilizando métodos computacionales o bien, la combinación de ambos (Suárez-Londoño, Jiménez, Castro y Cruz, 2017). Gracias a la resolución espacial y espectral de las imágenes de satélite disponibles, se pueden cubrir áreas extensas y estudiar aspectos fenológicos de la cobertura terrestre (Suárez-Londoño *et al.*, 2017). Así, los sistemas de información geográfica, la teledetección y numerosos modelos geomáticos representan herramientas que deben ser integradas en los análisis ambientales, económicos y sociales para evaluar la dinámica espacio-temporal de territorio por ser métodos de mayor exactitud y capaces de crear simulaciones de proyecciones futuras (Camacho-Olmedo, Molero y Paegelow, 2010; Eastman y Toledano, 2018).

Los modelos de distribución espacial son representaciones cartográficas de la idoneidad de un espacio para la presencia de un fenómeno en función de las variables empleadas para generar dicha representación (Mateo, Felicísimo y Muñoz, 2011; Yao *et al.*, 2021), en este caso la escorrentía y la tasa de infiltración final (Zhao, Nearing y Guertin, 2022). Junto con lo anterior, los algoritmos de acumulación de flujo predicen la cantidad de escorrentía aguas arriba con referencia en un punto de interés, con lo que es posible identificar la superficie o superficies donde se presenta una mayor escorrentía (Zhou, Wei y Fu, 2019). La importancia de la aplicación de modelos espacialmente distribuidos permite hacer estimaciones de la escorrentía y por ende en el funcionamiento ecohidrológico.

El objetivo de este estudio fue estimar la acumulación de flujo con un modelo espacial para la identificación de las posibles afectaciones de las obras secundarias de trasvase en la funcionalidad ecohidrológica en la cuenca de la presa de La Muñeca, en el municipio de Tierra Nueva, San Luis Potosí.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio es la cuenca de la presa La Muñeca localizada en el municipio de Tierra Nueva, San Luis Potosí, tiene una extensión de 299.4 km² entre los 21° 24' 22.9" y 21° 39' 27.5" N y los 100° 21' 59.9" y 100° 34' 5.5" O. Fisiográficamente, está localizada en la provincia de la Mesa del Centro y en la subprovincia de Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, con una composición principal de sierras altas escarpadas. El rango de elevación es de 1836 a 2538 m de altitud y la variación de la pendiente es de 1.72° a 90°. Una proporción importante del área de estudio corresponde a rocas de la era del Cenozoico del sistema Neógeno (87.5%), con unidades estratigráficas de clase ígnea extrusiva de tipo ácida. El clima predominante es semiseco templado (BS1kw) en la parte este y oeste y seco templado (BS0kw) en la parte central, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973), con una temperatura promedio anual entre los 18 °C y 28 °C y una precipitación media anual de 40 mm. El tipo de suelo predominante es feozem, que cubre 49.15% del área total, seguido del luvisol (33.35%) y el litosol (16.55%), todos con textura media. El tipo de vegetación presente es de bosque (*Juniperus* y *Quercus spp.*), matorral crassicaule, pastizal inducido y natural y vegetación secundaria de bosque de encino y pastizal natural. Los usos de suelo son agricultura de temporal, extracción de laja y pastoreo (Figura 1), (INEGI, 2021).

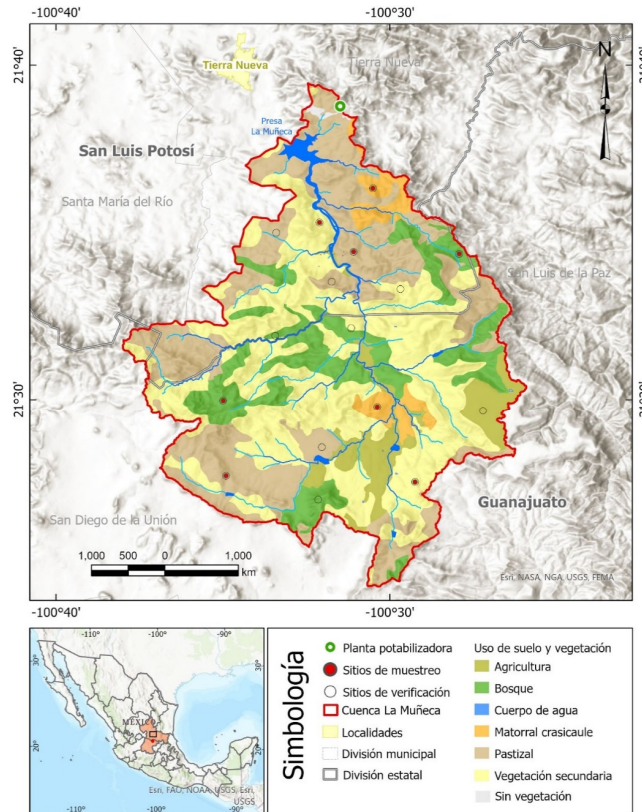


Figura 1. Cuenca de la presa La Muñeca (INEGI, 2021).
Figure 1. La Muñeca dam catchment (INEGI, 2021).

Adquisición de Datos

Para estimar la distribución espacial y cobertura de suelo se usó la banda pancromática de las imágenes de satélite LandSat 8 OLI en formato tiff tomada el 17 de mayo de 2021 con una resolución espacial de 15 m. Las imágenes fueron corregidas geoméricamente usando 45 puntos de control y logrando un valor de 0.36 en la raíz del error cuadrático medio (RMSE). La proyección usada fue UTM (WGS84 Zona 14N). Se realizó la corrección radiométrica y atmosférica para minimizar los errores ocasionados por los efectos de la atmósfera (Muñoz-Robles *et al.*, 2011c), por medio de los parámetros contenidos en el archivo de metadatos de la imagen.

Se usó un Modelo Digital de Elevación (MDE) para ortorectificar la imagen de satélite y estimar la dirección de flujo para el cálculo del flujo acumulado. El MDE del área de estudio fue extraído del Continuo de Elevación Mexicano 3.0 (INEGI, 2013), con una resolución espacial de 15 m. Se realizó el preproceso estándar al MDE para minimizar/eliminar las elevaciones o depresiones con la herramienta Pit Remove de TauDEM 5.3 (Tarboton, 2015a) para obtener el MDE corregido y apto para el análisis hidrológico.

Características de las Propiedades de la Superficie del Suelo y Simulaciones Lluvia

Para determinar las características de la superficie del suelo y realizar las simulaciones de lluvia, se seleccionaron ocho sitios de muestreo (Figura 1) de acuerdo con la proporción del área cubierta por los diferentes tipos de vegetación presentes en el área de estudio. En cada sitio, se identificaron parches de vegetación

con distinta cobertura de plantas vasculares (vivas y muertas), hojarasca y costra biológica utilizando transectos LFA (Landscape Function Analysis) de 50 m de longitud (Tongway y Hindley, 2004). La cobertura se clasificó en tres categorías: inter-parches con menos de 30% de cobertura, parches de cobertura media de 30 a 60% y parches densos con cobertura mayor a 60%, y en cada categoría se evaluaron las respuestas hidrológicas usando simulación de lluvia.

Antes de cada simulación de lluvia, el porcentaje de cobertura total se estimó visualmente dentro de cada una de las parcelas. La rugosidad del suelo se midió por medio del método de la cadena (Saleh, 1993) y la pendiente se midió manualmente con un nivel. Para medir la escorrentía se utilizó un simulador tipo Cornell Sprinkle Infiltrator (Ogden, Van Es y Schindelbeck, 1997), desarrollado por el Soil Health Lab de la Universidad de Cornell, que fue calibrado para una intensidad de lluvia de 75 mm h^{-1} . Cada simulación se realizó durante 30 min con una intensidad promedio de 76.58 mm h^{-1} ($\text{SD} = 8.45 \text{ mm h}^{-1}$). La tasa y duración es similar a los eventos naturales de tormenta con un período de retorno de 10 años en las áreas de estudio (SCT, 2015). Se realizaron tres simulaciones por sitio para medir la escorrentía, una por cada categoría de cobertura de suelo. La parcela del simulador de lluvia constó de un anillo metálico de 24.5 cm de diámetro insertado en el suelo a 7 cm de profundidad y por medio de una salida ubicada al nivel del suelo y en dirección de la pendiente se recolectó el volumen escurrido. Se registró el inicio de la escorrentía y posteriormente se extrajo, midió y registró cada minuto. Para cada parcela se calculó la tasa promedio de escorrentía y la tasa de infiltración final (mm h^{-1}).

Mapa de Cobertura de Suelo

El porcentaje de cobertura de suelo fue determinado de manera visual en parcelas de $2 \times 2 \text{ m}$ con la cantidad de plantas, hojarasca y costra biológica (Muñoz-Robles *et al.*, 2011c). Un total de 100 parcelas distribuidas al azar fueron muestreadas en campo y georreferenciadas con un sistema de geoposicionamiento con una precisión aproximada de 1 m para asegurar la correspondencia con la imagen de satélite.

El 75% de las parcelas de cobertura de suelo georreferenciadas en campo fueron seleccionadas al azar para calibrar el mapa y el 25% restante fueron utilizadas para la validación. A partir de estadística de zonas de ArcGIS Pro (Esri, 2021), se extrajo el promedio de los valores de las tonalidades de la imagen pancromática. Se generó un modelo de regresión con los datos de las parcelas para calibración y la banda pancromática de la imagen de satélite para predecir y generar un mapa continuo de la cobertura de suelo. Este modelo se aplicó con álgebra de mapas en ArcGIS Pro (Esri, 2021). Con el mapa de cobertura de suelo resultado de la aplicación del modelo de regresión, se extrajeron los valores del porcentaje de cobertura de suelo correspondientes a las parcelas restantes para validación y se comparó con el porcentaje de cobertura medido en campo. Posteriormente se calculó la raíz cuadrada media (RMS) entre los valores de cálculo y los de validación y con esto se estimó el promedio de error de predicción de modelo de regresión aplicado.

Distribución Espacial de la Escorrentía y Tasa de Infiltración Final

Los mapas del promedio de escorrentía y la tasa de infiltración final se obtuvieron aplicando modelos de regresión simple para estimar la tasa de infiltración final y la escorrentía promedio obtenidas en las simulaciones de lluvia en función de la cobertura del suelo. Los modelos fueron aplicados con álgebra de mapas en ArcGIS Pro (Esri, 2021).

Acumulación de Escorrentía

Para generar el mapa de la acumulación de escorrentía (la transferencia de escorrentía entre celdas en la imagen de satélite) se aplicó la función Retention Limited Flow Accumulation (Tarboton, 2015b), que utiliza un algoritmo recursivo para la acumulación de flujo en cualquier celda dependiendo del flujo acumulado de celdas adyacentes y de pendiente ascendente y la capacidad de infiltración de cada celda.

Para ejecutar esta función se utilizaron como insumos de entrada el mapa de la dirección de flujo, el cual se obtuvo a partir del MDE con la función D-infinity Flow Directions (Tarboton, 2015a), y los mapas de infiltración final y el promedio de escorrentía. Por lo tanto, la cantidad de escorrentía acumulada en cada celda fue el total del flujo generado por esa celda y el flujo de todas las celdas vecinas contribuyentes, cada una ponderada según la proporción de flujo aportada por la celda, siempre que se excediera la capacidad de infiltración en cada celda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapa de Cobertura de Suelo

El modelo de regresión para estimar el porcentaje de cobertura de suelo de cada pixel fue significativo ($P < 0.0001$) y con una R^2 ajustada de 0.85, al igual que en modelos aplicados por Bauer, Loffelholz y Wilson (2007), Van de Voorde, Vlaeminck y Canters (2008) y Rujoiu-Mare y Mihai (2016). La aplicación del modelo de regresión sirvió para obtener un mapa continuo de porcentajes de vegetación (0-100%), y con este mapa se obtuvo una clasificación del porcentaje de cobertura de suelo en parches e inter-parches, lo que permitió determinar las áreas que retienen, así como las áreas por donde fluye la escorrentía y otros recursos.

Hacia el este de la cuenca de la presa de La Muñeca se muestra mayor cantidad de parches densos, principalmente en áreas de bosque de encino-pino, bosque de táscate, vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino, matorral crassicaule y pastizal inducido, mientras que en el oeste, norte y sur se localizan las áreas con mayor cobertura de inter-parches cubierta por pastizales y agricultura (Figura 2). La cobertura del suelo está estrechamente relacionada con el ciclo hidrológico y el sistema climático a diversas escalas; en el área de estudio, al ser un ecosistema semiárido, el tipo de cobertura y su distribución establecen en gran medida la dinámica de la tasa de infiltración y de la escorrentía (Oki, Blyth, Berbery y Alcaraz-Segura, 2013; Barbosa-Briones, Cardona, Reyes y Muñoz, 2019).

Además, la cobertura del suelo juega un papel importante en muchos estudios científicos y sociales. Por esta razón, en el presente estudio su evaluación es esencial y puede ser de gran utilidad en la gestión de la cuenca ya que está relacionada con la calidad ambiental, los servicios ecosistémicos (p. ej.: hidrológicos), la ocurrencia de fenómenos naturales (p. ej.: incendios de vegetación) (Backoulou, Elliott, Giles y Mirik, 2015; Bokusheva, Kogan, Vitkovskaya, Conradt y Batyrbayeva, 2016; Eisavi, Homayouni, Yazdi y Alimohammadi, 2015; Rodríguez-Galiano, Ghimire, Rogan, Chica y Rigol, 2012). Hoy en día existen muchos modelos de cobertura de suelo disponibles tanto a escala global como nacional; sin embargo, a escalas detalladas no siempre son muy precisos (Rujoiu-Mare y Mihai, 2016) porque las áreas de estudio son muy específicas y muchas veces de tamaños muy pequeños, como el caso del presente estudio.

Por esta razón, fue necesario recurrir a la obtención de datos propios de cobertura, ya que se requería de mayor detalle, y el error obtenido (RMSE = 17.1) fue similar al reportado en otros estudios (Muñoz-Robles, *et al.*, 2011c). Sin embargo, en la actualidad, es posible obtener información con mayor detalle (imágenes de

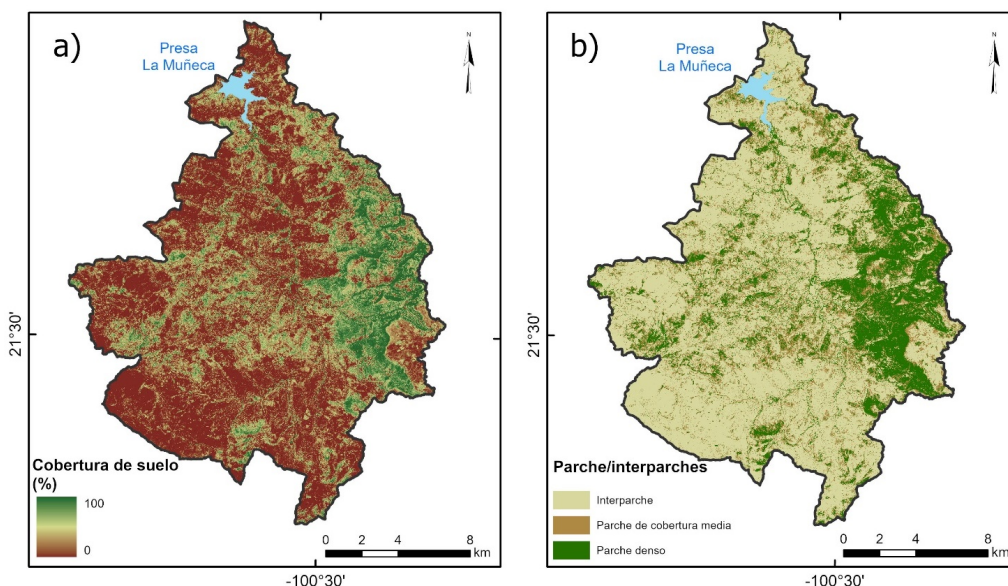


Figura 2. Cobertura de suelo: a) Proporción de cobertura por píxel (%) y b) Cobertura clasificada en categorías de funcionalidad ecohidrológica.

Figure 2. Ground cover (a) Proportion of cover per pixel (%) and (b) Cover classified in ecohydrological functionality categories.

alta resolución), y aunque este tipo de información es más accesible (Cavalli, Crema y Marchi, 2020¹), posee costos elevados que pueden dificultar su obtención para estudios a escala local como el caso presentado en este trabajo.

Las características de la cobertura superficial del suelo (plantas vivas, hojarasca y su distribución espacio-temporal, así como la rugosidad de la superficie) y su respuesta hidrológica son de suma importancia en estudios hidrológicos (Ortiz-Rodríguez, Muñoz, Rodríguez, Osorio y Barbosa, 2022). De esta forma los mapas obtenidos de la cobertura de suelo muestran las áreas que tienen mayor capacidad de retener recursos como agua y sedimentos y las áreas por donde pueden fluir dentro de la cuenca de la presa de La Muñeca. De esta manera, los resultados presentados concuerdan con estudios de la evaluación y distribución del cambio en la cobertura de suelo como el de Vilalta (2005) quien encontró que su distribución espacial es vital para la evaluación de la funcionalidad ecohidrológica. Esto, a su vez, puede considerarse como base para predecir tendencias de degradación del suelo, desertificación, deforestación y pérdida de biodiversidad en la cuenca de estudio (Lambin *et al.*, 2001), que son provocados por factores como el relieve, los socioeconómicos, la tenencia de la tierra y las políticas (Delgado *et al.*, 2017).

Distribución Espacial de la Acumulación de Escorrentía

El mapa de la escorrentía promedio y la tasa de infiltración final que sirvieron de entrada para modelar la acumulación de flujo se muestran en la Figura 3. Los resultados de la aplicación de la herramienta de acumulación de flujo de Tarboton (2015b) mostraron que el área donde hubo mayor acumulación de flujo fue al este y hacia la parte central de la cuenca La Muñeca. La acumulación de flujo fue menor en la parte oeste, donde existen menor tasa de infiltración y mayor escorrentía.

La acumulación de escorrentía está directamente relacionada con la capacidad de infiltración y la generación de escorrentía. En la cuenca de la presa de La Muñeca,

¹ Cavalli, M., Crema, S., & Marchi, L. (2020). Structural sediment connectivity assessment through a geomorphometric approach: review of recent applications. Paper presented at *Geomorphometry 2020 Conference*. Padova, Italy: Research Institute for Geo-Hydrological Protection.

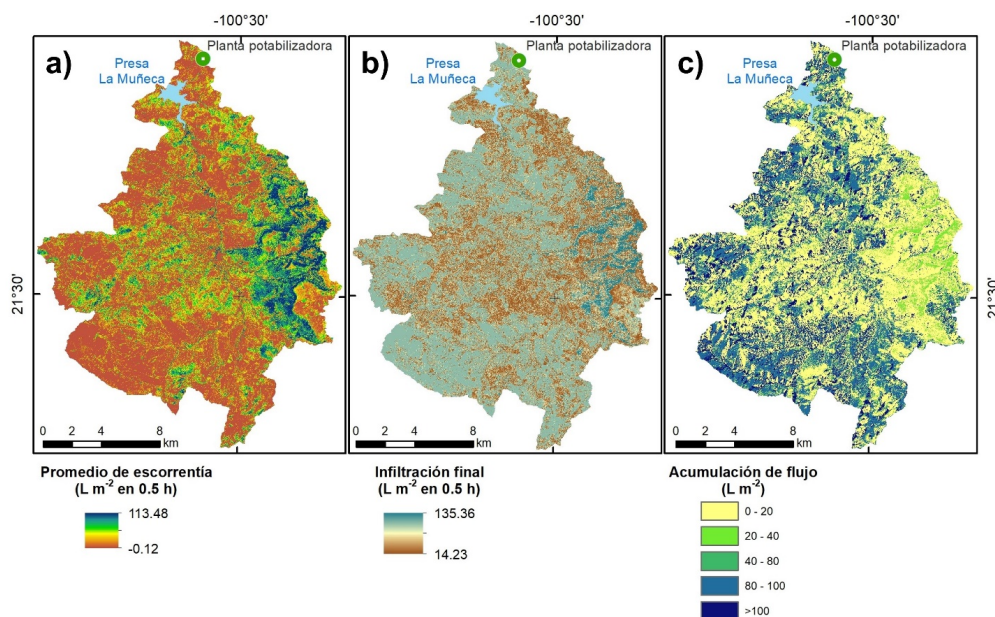


Figura 3. Distribución espacial de a) promedio de escorrentía, b) tasa de infiltración final y c) acumulación de flujo.

Figure 3. Spatial distribution of (a) average run-off; (b) final infiltration rate; and (c) flow accumulation.

dicha acumulación depende de la distribución de los parches que tienen mayor proporción de cobertura; es decir, en parches densos. Aunque el tamaño del parche puede modular el potencial de la vegetación para interceptar la lluvia, proteger el suelo y mejorar el micrositio (Hao *et al.*, 2016; Ludwig, Wiens y Tongway, 2000; Magliano, Whitworth-Hulse, Florio, Aguirre y Blanco, 2019), la cobertura total del parche ejerce un efecto importante sobre estos procesos a través del control de la extensión del área donde pueden tener lugar (Tongway y Hindley, 2004); en algunos casos los parches producen hasta siete veces menos escorrentía que los interparches (Barbosa-Briones *et al.*, 2019). La cobertura y su distribución espacial contribuyen a entender las relaciones ecohidrológicas (vegetación-procesos hidrológicos) en regiones donde la distribución espacial de la vegetación es heterogénea y forma un mosaico de dos fases de parches con vegetación inmersos dentro de una matriz de cobertura baja (Barbosa-Briones *et al.*, 2019). Otros estudios han demostrado que el aumento de la cobertura vegetal y su arreglo espacial, en conjunto con el establecimiento con obras de conservación de suelo pueden reducir la acumulación de flujo en un 68% (Muñoz-Robles *et al.*, 2011d), lo que resalta la importancia de considerar estos aspectos en estudios ecohidrológicos.

Las variaciones en la distribución espacial de las respuestas hidrológicas están determinadas por las coberturas de suelo, atributos topográficos como la pendiente y el área de acumulación (Cataño-Álvarez *et al.*, 2016²). Por ejemplo, en el presente estudio, donde los procesos ecohidrológicos dependen en gran medida de los parches de vegetación que funcionan obstruyendo la escorrentía, son clave para aumentar o mantener su tamaño y determinar las rutas del flujo superficial de agua y con esto proporcionar retroalimentación al sistema en términos de conservación y retención de recursos como agua, sedimentos y nutrientes (Ludwig, Wilcox, Breshears, Tongway y Imeson, 2005; Urgeghe, Mayor, Turrión, Rodríguez y Bautista, 2021).

² Cataño-Álvarez, S., Osorio-Yepesb, S., Montoya-Monsalvec, J. J., Contreras-Trujillo, C. Y., Vargas-Martínez, N. O., Zambrano Nájera, J. C., . . . Vélez-Upegui, J. I. (2016). Modelo de estimación y distribución espacial de tasas medias de producción de sedimento en cuencas tropicales de montaña. *Paper presented at the XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Lima, Perú: Centro de Información, Investigación, Planificación, Proyectos y Consultorías del agua.

Los resultados permiten tener un mayor entendimiento de las relaciones ecohidrológicas entre la cobertura de suelo y la acumulación de flujo de agua hacia el interior de la cuenca de la presa de La Muñeca. Esto facilita la identificación de las áreas más susceptibles a la pérdida de agua, sedimentos, nutrimentos, ubicadas en la parte oeste por ser la zona más desprovista de vegetación. Una aplicación de este tipo de resultados es la creación de escenarios de la distribución de parches de vegetación. En este sentido, la modelación puede servir como herramienta de apoyo para mejorar el diseño de acciones de conservación y restauración del suelo, así como políticas de gestión del agua en zonas áridas y semiáridas (Gupta y Panigrahy, 2008).

Los Trasvases y la Acumulación de Escorrentía

La escorrentía se ve afectada por factores meteorológicos, geológicos, topográficos y de cobertura vegetal, así como por las actividades humanas. Estas actividades son necesarias en la cuenca de estudio, ya que la agricultura y la ganadería son muy importantes en la producción de alimentos para el autoconsumo humano y animal (en algunos casos generan ingresos económicos) y la extracción de productos maderables como la leña que son indispensables en el hogar de muchas familias. Sin embargo, es importante tener en cuenta que generan un impacto negativo en los ecosistemas y que ocasionan modificaciones en los procesos hidrológicos (de la Torre-Robles, Muñoz, Huber y Reyes, 2023).

Los impactos de las obras de trasvase poseen distintos efectos en el ambiente y en la sociedad. A medida que se desarrollan obras de infraestructura, una gran parte del paisaje natural se reemplaza por superficies impermeables, aproximadamente el 12% del área total de la cuenca, como carreteras, caminos, construcción habitacional e industrial, lo que reduce la infiltración y retención de recursos y acelera la escorrentía, lo que ocasiona mayor acumulación (Bell, Tague y McMillan, 2019; Chithra, Harindranathan, Amarnath y Anjana, 2015). Los impactos ambientales de los proyectos que llevan agua de una cuenca a otra se han analizado en múltiples estudios (Shumilova, Tockner, Thieme, Koska y Zarfl, 2018; Zhuang, 2016), y, en general, la magnitud del proyecto está relacionada con la intensidad del impacto ambiental que genera. En el caso del trasvase objeto de este estudio, el volumen de agua se recibe en la planta potabilizadora ($Q = 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) que se encuentra en el norte de la cuenca, justo en el parteaguas de la cuenca la presa de La Muñeca. Una vez que potabiliza este volumen es enviado a través de un acueducto a seis tanques de regulación y distribución que abastecen a una parte de la población de San Luis Potosí. De esta manera, la funcionalidad ecohidrológica de la cuenca podría verse afectada por la reducción del volumen que llegaría por escorrentía superficial en laderas a la presa de La Muñeca y los caminos construidos en el parteaguas específicamente para acceder a la planta potabilizadora interrumpen la conectividad natural de los flujos y modifican la distribución de la cobertura vegetal. Adicionalmente, la obra de trasvase podría ocasionar impactos sociales relacionados con problemas de abastecimiento, mantenimiento adecuado del acueducto que desencadena problemas relacionados con inundaciones en las zonas aledañas a las fallas que este presenta y afectación a la población vecina.

Al igual que en otros casos, la transferencia de agua se da entre regiones hidrológicas muy diferentes; es decir, que puede cambiar la concepción y el uso de la tierra, como se ha demostrado en otros lugares (Sternberg, 2016), donde el agua se obtiene para atender las necesidades de poblaciones distantes (Shumilova *et al.*, 2018). En el caso de la cuenca de estudio se tiene registro de situaciones donde las parcelas se han dividido por el paso del acueducto y un ejemplo de esto es una

parcela donde se tenía ganado y por la división, de un lado quedo el ganado y de otro los abrevaderos y por tal motivo cambio la dinámica y los animales ya no tiene la movilidad que tenía. Lo que refleja el impacto potencial de estas obras en el uso de la tierra. Estas transferencias de agua entre cuencas que afectan el funcionamiento ecohidrológico e impactan a la sociedad deben ser tratadas bajo una perspectiva transdisciplinar como la socio-ecohidrología (Hein *et al.*, 2021; Van Meter, Basu, McLaughlin y Steiff, 2015), que permita la resolución de conflictos sociales derivados del uso y abastecimiento de agua como se ha propuesto en otros estudios (Reyes-Hernández, Silva, Muñoz y Ortiz, 2022).

CONCLUSIONES

Los resultados permiten tener un mayor entendimiento de las relaciones entre la cobertura de suelo y la acumulación de flujo con el fin de conocer el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas, ya que reflejan la dinámica espacial del movimiento y acumulación de los recursos escasos en zonas semi-áridas.

La distribución espacial de la acumulación de escorrentía en la cuenca de la presa La Muñeca puede modificarse por las obras secundarias del trasvase, como los caminos y la planta potabilizadora que modifican la cobertura vegetal, y por lo tanto el funcionamiento ecohidrológico. La localización de las obras secundarias de trasvase en el parteaguas, interfieren con la dinámica natural de la escorrentía ya que se modifica el parteaguas de la cuenca y tiene importantes afectaciones tanto en la cuenca donadora como en la receptora.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: E.B.B., F.J.P.P. y C.A.M.R. Metodología: E.B.B. y C.A.M.R. Software: E.B.B. Validación: E.B.B., F.J.P.P. y C.A.M.R. Análisis formal: E.B.B. Investigación: E.B.B. Recursos: F.J.P.P. y C.A.M.R. Curación de datos: E.B.B. Escritura, preparación del borrador original: E.B.B. Escritura, revisión y edición: E.B.B., F.J.P.P. y C.A.M.R. Administración del proyecto: E.B.B. Adquisición de fondos: F.J.P.P.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado con recursos del proyecto PRONACE-Agua. Los trasvases como dispositivos de desigualdad e inseguridad hídrica. Prácticas colectivas para la Justicia Hídrica. Se otorgó una beca de Estancias Posdoctorales por México Modalidad 3 del CONACYT a E. B. B.

LITERATURA CITADA

- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to machine learning*. Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press. ISBN 978-0-262-02818-9
- Backoulou, G. F., Elliott, N. C., Giles, K. L., & Mirik, M. (2015). Processed multispectral imagery differentiates wheat crop stress caused by greembug from other causes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.008>
- Barbosa-Briones, E., Cardona-Benavides, A., Reyes-Hernández, H., & Muñoz-Robles, C. (2019). Ecohydrological function of vegetation patches in semi-arid shrublands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 168, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.005>
- Bauer, M. E., Löffelholz, B. C., & Wilson, C. (2007). Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of landsat imagery. In Q. Weng (Ed.). *Remote Sensing of Impervious Surfaces* (pp. 1-18). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. ISBN: 978-1-4200-4374-7
- Bell, C. D., Tague, C. L., & McMillan, S. K. (2019). Modeling run-off and nitrogen loads from a watershed at different levels of impervious surface coverage and connectivity to storm water control measures. *Water Resources Research*, 55(4), 2690-2707. <https://doi.org/10.1029/2018WR023006>
- Bokusheva, R., Kogan, F., Vitkovskaya, I., Conradt, S., & Batyrbayeva, M. (2016). Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuring against drought-related yield losses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.066>
- Camacho-Olmedo, M. T., Molero-Melgarejo, E., & Paegelow, M. (2010). Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. In: J. Ojeda, M. F. Pita, & I. Vallejo (Eds.). *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 658-678). Sevilla, España: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- Chen, L., Sela, S., Svoray, T., & Assouline, S. (2013). The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. *Water Resources Research*, 49(9), 1-15. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20360>
- Chithra, S. V., Harindranathan-Nair, M. V., Amarnath, A., & Anjana, N. S. (2015). Impacts of impervious surface on the environment. *International Journal of Engineering Science Invention*, 4(5), 27-31.
- De la Torre-Robles, L., Muñoz-Robles, C., Huber-Sannwald, E., & Reyes-Agüero, J. A. (2023). Functional stability: From soil aggregates to landscape scale in a region severely affected by gully erosion in semi-arid central Mexico. *Catena*, 222, 106864. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106864>
- Delgado, M. L. A., Matteucci, S., Acevedo, M., Valeri, C., Blanca, R., & Márquez, J. (2017). Causas directas que inducen el cambio de uso el suelo y de la cobertura boscosa, a escala de paisaje, en el sur de Venezuela. *Interciencia*, 42(3), 148-156.
- Do, H. T., Limet, S., & Melin, E. (2011). Parallel computing flow accumulation in large digital elevation models. *Procedia Computer Science*, 4, 2277-2286. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.04.248>
- Eastman, J. R., & Toledano, J. (2018). A short presentation of the land change modeler (lcm). In: M. T. Camacho-Olmedo, M. Paegelow, J. F. Mas, & F. Escobar (Eds.). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. (pp. 499-505). Worcester, MA, USA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Eisavi, V., Homayouni, S., Yazdi, A. M., & Alimohammadi, A. (2015). Land covermapping based on random forest classification of multitem -poral spectral and thermal images. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 1-14. <http://doi.org/10.1007/s10661-015-4489-3>
- Esri (2021). *ArcGis User's Guide*. Released 10.8. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute.
- García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen*. Distrito Federal, México: UNAM.
- Gupta, P. K., & Panigrahy, S. (2008). Predicting the spatio-temporal variation of run-off generation in india using remotely sensed input and soil conservation service curve number model. *Current Science*, 95(11), 1580-1587.
- Hao, H. M., Lu, R., Liu, Y., Fang, N. F., Wu, G. L., & Shi, Z. H. (2016). Effects of shrub patch size succession on plant diversity and soil water content in the water-wind erosion crisscross region on the loess plateau. *Catena*, 144, 177-183. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.015>
- Hein, T., Hauer, C., Schmid, M., Stöglehner, G., Stumpp, C., Ertl, T., . . . Wang, C. (2021). The coupled socio-ecohydrological evolution of river systems: Towards an integrative perspective of river systems in the 21st century. *Science of The Total Environment*, 801, 149619. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149619>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (cem 3.0). Consultado el 20 de noviembre, 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). *Geografía y medio ambiente*. Consultado el 15 de noviembre, 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/>
- Lambin, E., Turner, B. L., Geist, H., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., . . . Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Ledezma, J. C., & García-Díaz, M. (2015). *Cambio de cobertura de la tierra en el área de influencia del proyecto de interconexión entre pucallpa y cruzeiro do sul, Perú*. Consultado el 10 de enero de 2022 desde https://www.conservation-strategy.org/sites/default/files/field-files/Complement_to_PUCALLPA_final.pdf
- Ludwig, J. A., Wiens, J. A., & Tongway, D. J. (2000). A scaling rule for landscape patches and how it applies to conserving soil resources in savannas. *Ecosystems*, 3, 84-97. <http://doi.org/10.1007/s100210000012>
- Ludwig, J. A., & Tongway, D. J. (1995). Spatial organisation of landscapes and its function in semi-arid woodlands, Australia. *Landscape Ecology*, 10(1), 51-63. <http://doi.org/10.1007/BF00158553>
- Ludwig, J. A., Wilcox, B. P., Breshears, D. D., Tongway, D. J., & Imeson, A. C. (2005). Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology*, 86(2), 288-297. <http://doi.org/10.1890/03-0569>
- Magliano, P. N., Whitworth-Hulse, J. I., Florio, E. L., Aguirre, E. C., & Blanco, L. J. (2019). Interception loss, throughfall and stemflow by *larrea divaricata*: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes. *Ecological Research*, 34, 753-764. <http://doi.org/10.1111/1440-1703.12036>
- Mateo, R. G., Felicísimo, A. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240. <http://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200008>
- Muñoz-Robles, C., Reid, N., Tighe, M., Briggs, S. V., & Wilson, B. (2011a). Soil hydrological and erosional responses in patches and inter-patches in vegetation states in semi-arid Australia. *Geoderma*, 160(3-4), 524-534. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.10.024>
- Muñoz-Robles, C., Reid, N., Tighe, M., Briggs, S. V., & Wilson, B. (2011b). Soil hydrological and erosional responses in areas of woody encroachment, pasture and woodland in semi-arid Australia. *Journal of Arid Environments*, 75(10), 936-945. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.05.008>
- Muñoz-Robles, C., Frazier, P., Tighe, M., Reid, N., Briggs, S. V., & Wilson, B. (2011c). Assessing ground cover at patch and hillslope scale in semi-arid woody vegetation and pasture using fused Quickbird data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 94-102. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.010>
- Muñoz-Robles, C., Tighe, M., Reid, N., Frazier, P., Briggs, S. V., & Wilson, B. (2011d). A two-step up-scaling method for mapping runoff and sediment production from pasture and woody encroachment on semi-arid hillslopes. *Ecohydrology*, 6(1), 83-93. <http://doi.org/10.1002/eco.283>
- Ogden, C. B., Van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (1997). Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1041-1043. <http://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040008x>
- Oki, T., Blyth, E., Berbery, E. H., & Alcaraz-Segura, D. (2013). Land use and land cover changes and their impacts on hydroclimate, ecosystems and society. In G. R. Asrar, & J. W. Hurrell (Eds.). *Climate science for serving society* (pp. 185-203). Dordrecht, The Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_7
- Ortiz-Rodríguez, A. J., Muñoz-Robles, C., Rodríguez-Herrera, J. G., Osorio-Carmona, V., & Barbosa-Briones, E. (2022). Effect of DEM resolution on assessing hydrological connectivity in tropical and semi-arid basins of central Mexico. *Journal of Hydrology*, 612, 128104. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128104>
- Peña, F., & Granados, L. E. (2021). Archipiélagos urbanos. El trasvase como dispositivo de la desigualdad hídrica persistente en México. *Región y Sociedad*, 33, 1-24. <https://doi.org/10.22198/rys2021/33/1439>
- Puigdefábregas, J. (2005). The role of vegetation patterns in structuring run-off and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(2), 133-147. <https://doi.org/10.1002/esp.1181>
- Reyes, H., Silva-Flores, M., Muñoz-Robles, C. A., & Ortiz-Rodríguez, A. J. (2022). Strengthening Environmental Management and Local Planning in Indigenous Communities Through Hydrological Connectivity Analysis: Experiences from a Tropical Region of Mexico. *Human Ecology*, 50(1), 617-632. <https://doi.org/10.1007/s10745-022-00329-1>
- Rodríguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sánchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Rodríguez-Iturbe, I., & Porporato, A. (2005). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems. Soil Moisture and Plant Dynamics*. New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Rujoiu-Mare, M. R., & Mihai, B. A. (2016). Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: A case study of Prahova subcarpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 244-255. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.029>
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: Chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). (2015). Isoyetas de intensidad de lluvia (mm/h). *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. Consultado el 22 de octubre, 2021, desde <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isojetas/>

- Shumilova, O., Tockner, K., Thieme, M., Koska, A., & Zarfl, C. (2018). Global water transfer megaprojects: A potential solution for the water-food-energy nexus? *Frontiers in Environmental Science*, 6, 1-11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00150>
- Sternberg, T. (2016). Water megaprojects in deserts and drylands. *International Journal of Water Resources Development*, 32, 301-320. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1012660>
- Suárez-Londoño, A., Jiménez-López, A. F., Castro-Franco, M., & Cruz-Roa, A. (2017). Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando redes neuronales convolucionales. *Orinoquia*, 21(1), 64-75. <https://doi.org/10.22579/20112629.432>
- Tarboton, D. (2015a). Taudem: Terrain analysis using digital elevation models (Version 5.3). Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University. Consultado el 12 de enero, 2022, desde <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>
- Tarboton, D. (2015b). Taudem. Retention limited flow accumulation. Consultado el 12 de enero, 2022, desde <https://github.com/dtarb>
- Tongway, D. J., & Hindley, N. (2004). *Landscape function analysis: Procedures for monitoring and assessing landscape*. Canberra, Australia: CSIRO Sustainable Ecosystems. ISBN: 0 9751783 0 X
- Urgeghe, A. M., Mayor, A. G., Turrión, D., Rodríguez, F., & Bautista, S. (2021). Disentangling the independent effects of vegetation cover and pattern on run-off and sediment yield in dryland systems-uncovering processes through mimicked plant patches. *Journal of Arid Environments*, 193, 104585. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104585>
- Valentin, C., D'Herbès, J. M., & Poesen, J. (1999). Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena*, 37(1-2), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00053-3)
- Van de Voorde, T., Vlaeminck, J., & Canters, F. (2008). Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from landsat etm+ data: A case study on brussels. *Sensors*, 8(6), 3880-3902. <https://doi.org/10.3390/s8063880>
- Van Meter, K. J., Basu, N. B., McLaughlin, D. L., & Steiff, M. (2015). The socio-ecohydrology of rainwater harvesting in India: understanding water storage and release dynamics at tank and catchment scales. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(11), 12121-12165. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-12121-2015>
- Vilalta, C. J. (2005). Cómo enseñar auto-correlación espacial. *Economía, Sociedad y Territorio*, 18, 323-333.
- Wilcox, B. P., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2003). Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: Effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, 73(2), 223-239.
- Yao, X., Gao, Y., Zhu, D., Manley, E., Wang, J., & Liu, Y. (2021). Spatial Origin-Destination Flow Imputation Using Graph Convolutional Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(12), 7474. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3003310>
- Zhao, Y., Nearing, M. A., & Guertin, D. P. (2022). Modeling hydrologic responses using multi-site and single-site rainfall generators in a semi-arid watershed. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(2), 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.003>
- Zhou, G., Wei, H., & Fu, S. (2019). A fast and simple algorithm for calculating flow accumulation matrices from raster digital elevation. *Frontiers of Earth Science*, 13(2), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0725-9>
- Zhuang, W. (2016). Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 12867-12879. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6854-3>