

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

CAMBIOS DEL USO DEL SUELO E IMPACTOS EN LA ESCORRENTÍA POTENCIAL DE LA CUENCA CHUVISCAR-SACRAMENTO (CHIHUAHUA, MÉXICO). MODELIZACIÓN CON EL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA

^{1a}LUIS CARLOS BRAVO PEÑA , ^{2b}VÍCTOR MANUEL REYES GÓMEZ , ^{1c}RAMÓN LEOPOLDO MORENO MURRIETA , ^{1d}LUIS CARLOS ALATORRE CEJUDO , ^{1e}MARÍA ELENA TORRES OLAVE , ^{1f}ALFREDO GRANADOS OLIVAS , ^{2g}HUGO ALBERTO FUENTES HERNÁNDEZ 

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

División Multidisciplinaria Cuauhtémoc, km 3.5 Carretera Cuauhtémoc Anáhuac, 31600, Cd. Cuauhtémoc Chihuahua, México.

²Instituto de Ecología A.C.

Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa 91073, Veracruz, México

^alcbravop@gmail.com, ^bvictor.reyes@inecol.mx, ^cramon.moreno@uacj.mx, ^dluis.alatorre@uacj.mx, ^eelena.torres@uacj.mx, ^fagranados@uacj.mx, ^ghugo.fuentes@inecol.mx

RESUMEN

En este trabajo se identifican los cambios de uso del suelo y cubierta vegetal durante el periodo 2000-2017, y sus impactos sobre la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua México). Se generaron mapas de uso del suelo para cada año mediante clasificación espectral y se modelizó el escurrimiento mediante el método de Número de Curva considerando eventos de lluvia de 62 y 88 mm en 24 horas. Los resultados muestran la pérdida de coberturas naturales y su sustitución por coberturas antropizadas, así como un incremento de la escorrentía total en el periodo analizado. También sugieren que los impactos hidrológicos del cambio de coberturas son muy heterogéneos espacialmente, pues se incrementó la escorrentía en ciertas zonas de la cuenca, pero disminuyó en otras. La modelización permite identificar uno de los impactos hidrológicos más relevantes del cambio de uso del suelo en el funcionamiento de la cuenca, facilitando la gestión ambiental de los distintos usos del suelo.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, escorrentía, Número de Curva, Chihuahua.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

IMPACTS OF LAND USE CHANGES ON POTENTIAL RUNOFF OF CHUVISCAR-SACRAMENTO BASIN (CHIHUAHUA MEXICO). MODELIZATION WITH THE CURVE NUMBER METHOD

ABSTRACT

This paper identifies changes in land uses and land covers during the 2000-2017 period and its impacts on potential runoff of the Chuviscar-Sacramento basin (Chihuahua Mexico). Land use maps were generated for each year by spectral classification of remote sensing images and runoff was modeled using the Curve Number method considering rainfall events of 62 and 88 mm/24 hours. The results show the loss of natural coverage and its replacement by anthropized coverage, as well as an increase in total runoff. They also suggest that the hydrological impacts of the change of coverages are spatially heterogeneous, as runoff increased in certain areas of the basin, but decreased in others. This modelization allows identifying one of the most relevant hydrological impacts of coverage changes of the basin and also facilitates the environmental management of the different land uses.

Keywords: land use changes, runoff, Curve Number, Chihuahua.

1. Introducción y antecedentes

Las modificaciones del uso del suelo y la cubierta vegetal (CUSCV) alteran las tasas de escorrentía y percolación (Zhang *et al.*, 2015; Okelo *et al.*, 2008), pudiendo generar impactos significativos en el funcionamiento hidrológico de cuencas (Birhanu *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2009). La modelización de la escorrentía en cuencas bajo diferentes escenarios de uso del suelo permite estimar el impacto de dichas modificaciones (Silva, Santos, & dos Santos, 2018). Es una herramienta útil para la planeación de obras hidráulicas (Rojas Sigala & González Pérez, 2015), y riegos agrícolas (Universidad Autónoma Chapingo & SAGARPA, 2009), y también puede utilizarse para la identificación de los impactos ambientales eco-hidrológicos derivados de las alteraciones a la cubierta vegetal.

La escorrentía, o flujo superficial que se genera a partir de las condiciones específicas de precipitación, cubierta vegetal, uso del suelo, y tipos del suelo en un sitio, representa un parámetro clave en la respuesta hidrológica de una cuenca. Su modelización permite saber de qué forma los cambios de la cubierta vegetal y los usos del suelo, modifican procesos hidrológicos que son bastante importantes en escenarios donde el agua representa un elemento escaso (Gebru *et al.*, 2019), o bien donde las precipitaciones en condiciones de tormenta, generan riesgo a inundación por la ausencia de infraestructura para contener el agua, o por la prevalencia de patrones de ocupación urbano-territorial inadecuados (Mahmoud & Alazba, 2015). Uno de estos escenarios es la cuenca de los ríos Chuviscar-Sacramento, que alberga a la Ciudad de Chihuahua, capital del estado con el mismo nombre en el norte de México.

La ciudad de Chihuahua se fundó en la confluencia de los ríos Chuviscar y Sacramento en el año de 1709. Históricamente ha experimentado un intenso proceso de crecimiento poblacional y

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivares, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

económico (Fuentes, 2007), que la sitúa como una de las metrópolis con mayor dinamismo en el norte del país. Es una ciudad enclavada en un territorio semi-árido, donde lo errático de las lluvias favorece una gran dependencia del agua subterránea (Nájera, 2016), así como patrones de ocupación urbana del espacio que no consideraron los impactos hidrológicos del cambio de uso del suelo. Estos han propiciado graves afectaciones a la infraestructura urbana cuando se han presentado precipitaciones atípicas.

Los cambios de usos del suelo observados en la cuenca, sugieren impactos hidrológicos de diversos tipos. El desarrollo de actividades como agricultura y ganadería, en conjunto con las transformaciones urbanas, han implicado modificaciones a la permeabilidad del suelo, alterando el potencial de escorrentía de la cuenca. La apertura de pastizales ganaderos, por ejemplo, frecuentemente significa condiciones mejoradas de cubierta vegetal y de permeabilidad del suelo frente a los matorrales xerófilos que dominan en la zona (Viramontes-Olivares *et al.*, 2012); mientras que la ampliación de la mancha urbana genera una modificación opuesta, impermeabilizando el suelo e incrementando el potencial de escorrentía frente a un evento de precipitación (Li *et al.*, 2018). Se trata de cambios cuyo impacto debe comprenderse, para mejorar el proceso de planeación urbana, y en general la gestión ambiental de la cuenca de los Ríos Chuviscar-Sacramento, que brinda importantes servicios ambientales a la Ciudad de Chihuahua.

Por las razones anteriores, en este trabajo se busca comprender cuáles han sido las modificaciones a la cubierta vegetal y los usos del suelo en esta cuenca durante el periodo 2000-2017 y qué impactos han tenido estos cambios sobre el potencial de escorrentía. Para ello se generaron cartografías de uso del suelo mediante procesos de clasificación espectral y fotointerpretación, y se modeliza el impacto de los cambios observados sobre la escorrentía generada bajo dos condiciones teóricas de tormenta. El método empleado: Número de Curva (NC), es muy utilizado para la modelización de la escorrentía bajo diferentes escenarios de uso del suelo en entorno de sistemas de información geográfica (Raja, 2015); una ventaja que se añade a su amplio uso internacional para estimar la escorrentía superficial (Lian *et al.*, 2020). Es sencillo, relativamente simple por su demanda de datos, y bastante robusto. Numerosos estudios han encontrado correlaciones superiores a 0.8 entre las escorrentías modeladas en gabinete, y los valores obtenidos en el terreno cuando se aplica correctamente (Kumar, Tiwari, & Pal, 1991; Gonzalez, Temimi, & Khanbilvardi, 2015; Verma, *et al.*, 2018). En este caso, la modelización ayudó a dimensionar cómo se expresan los impactos hidrológicos más relevantes de los CUSCV en el funcionamiento de la cuenca, aportando elementos para la planeación urbana y la gestión ambiental de los distintos usos del suelo

1.1. Area de estudio

La cuenca Chuviscar-Sacramento (Figura 1) se ubica en el centro del nortero estado de Chihuahua (México) y tiene una extensión de 270,402.5 ha. Tiene una altitud mínima de 1269 m y máxima de 2643 m sobre el nivel del mar, representada en el caso de las altitudes mayores, por cordilleras montañosas que corren de noroeste a sureste, conformadas por rocas ígneas cubiertas de suelos rocosos con muy baja permeabilidad; mientras que en el caso de las menores altitudes, se distinguen valles aluviales, conformados por materiales no consolidados, fundamentalmente gravas, limos o arcillas de mayor permeabilidad. En cuanto a usos del suelo y cubierta vegetal, esta

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuiscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

fisiografía distingue la presencia de masas forestales de bosque de encino-pino en las montañas en las regiones más altas, hasta la presencia de matorrales xerófilos y pastizales naturales e inducidos en los piedemontes y zonas más bajas. Todas estas coberturas naturales se han transformado progresivamente desde hace más de cuatro siglos, pues la cuenca alberga a la Ciudad de Chihuahua, capital del estado, fundada en el año de 1709 y que hoy tiene una población de 878 062 habitantes (INEGI, 2015).

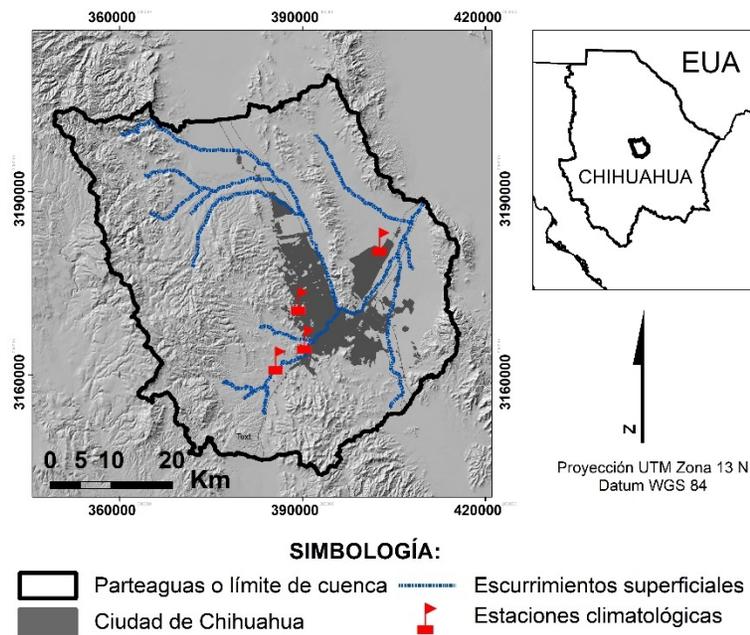


Figura 1. Macrolocalización de la cuenca Chuiscar-Sacramento.

Fte: este trabajo.

La ciudad de Chihuahua presenta un crecimiento poblacional muy importante desde mediados del siglo XX, derivando en los problemas comunes a las ciudades del norte árido de México. En particular, la competencia por el agua entre las actividades agropecuarias y urbanas amenaza el abasto de este líquido para la población local (Nájera, 2016). Casi toda el agua empleada en las distintas actividades humanas se extrae del subsuelo, y su explotación es cada vez más intensa (El Heraldo de México, 2019). El aprovechamiento del agua superficial es muy limitado, y sólo existe capacidad para almacenar el 3.36 % (38.2 millones de m³) del agua total que se escurre anualmente en la cuenca (544.56 millones de m³, IMPLAN, 2009). Sin embargo, aunque esta capacidad es muy baja, el manejo de los escurrimientos a través de los distintos embalses es muy importante, pues no es raro que precipitaciones atípicas originen perjuicios serios en la infraestructura urbana, con implicaciones sociales y económicas muy importantes.

La cuenca tiene una precipitación promedio de 430 mm, con valores mayores hacia el noroeste y menores hacia el este (535 y 339 mm, respectivamente; Téllez *et al.*, 2011). El 95 % de las lluvias ocurren en el verano, mientras que el 5 % restante suele ocurrir en el invierno, durante

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

los meses de noviembre a enero. En la cuenca se localizan cuatro estaciones climatológicas, con registros históricos de precipitación diaria desde el año 1969 hasta el año 2012; con registros máximos de hasta 101 mm de precipitación en periodos de 24 horas.

2. Metodología

Esta se subdividió en dos fases: 1) Evaluación de los cambios en la cubierta vegetal y los usos del suelo, 2) Estimación de la escorrentía en condiciones de tormenta, considerando periodos de retorno de 5 y 10 años.

2.1. Cartografía de los cambios de la cubierta vegetal y uso del suelo.

En esta etapa se identificaron los cambios de uso del suelo y cubierta vegetal en la cuenca, mediante la comparación de coberturas de uso del terreno correspondientes a los años 2000 y 2017. Para este propósito se realizó la clasificación supervisada de imágenes Landsat TM y Landsat 8 (Path Row 32-40), correspondientes a los meses de abril-mayo de 2000 y 2017, mediante el método de Máxima Verosimilitud (Chuvieco, 2008). Se identificaron y clasificaron clases que, de acuerdo a la fotointerpretación mostraban intensa dinámica de cambio de coberturas, o bien se trataban de clases que son importantes desde el punto de vista ecológico, por su rareza o porque son indicadores de degradación extrema de coberturas: particularmente bosque de encino-pino, matorral xerófilo, pastizales, cuerpos de agua, humedales y suelo desnudo. En estos casos se definieron polígonos de entrenamiento por un total de 23,445 ha (8.7 % de la superficie total de la cuenca), a partir de la delimitación de sitios con coberturas reconocibles en imágenes de alta resolución de la zona correspondientes al servidor de imágenes de ArcMap 10.3 y a la plataforma digital de Google Earth, e información de campo de los autores. En todas las clases se digitalizó, como mínimo, un área de entrenamiento equivalente o superior a 10 píxeles por el número de bandas en la imagen a clasificar (Eastman, 2016). Los mapas resultantes de la clasificación espectral fueron evaluados mediante un análisis de validación post-clasificatoria (Congalton y Green, 1999), considerando 318 y 358 puntos en el terreno distribuidos aleatoriamente, para identificar la confiabilidad global y la exactitud de clasificación mediante el índice Kappa.

También es importante mencionar que hubo clases con superficies muy pequeñas respecto al total de la imagen, donde fue necesario definir manualmente puntos específicos de validación, pues debido a la aleatoriedad del muestreo no fueron seleccionadas inicialmente como puntos de verificación. Fue el caso de los humedales y suelo desnudo, donde se incluyó por lo menos el 30 % del área de la clase como área a verificar. Al igual que en el caso de la digitalización de campos de entrenamiento, para la validación se consideraron las plataformas de imágenes satelitales ya descritas, e información de los autores obtenida en recorridos de campo, lo que permitió asociar patrones de tono, textura y color, con las clases a verificar. Este último proceso fue particularmente necesario en el caso de la validación del mapa correspondiente al año 2000, pues las imágenes disponibles para esa época tienen menor resolución espacial que las actuales.

También se realizó la fotointerpretación y digitalización manual de coberturas agrícolas y urbanas para esos años, tomando como base imágenes de alta resolución disponibles en las

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivás, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

plataformas del servidor de imágenes de ArcMap 10.3 (imágenes recientes) y el servicio de Google Earth (imágenes históricas), así como los polígonos correspondientes a estos usos derivados de los mosaicos correspondientes a la plataforma Globeland30 (<http://www.globallandcover.com>). Esta digitalización se realizó por dos razones: 1) Primero por la estacionalidad de los cultivos agrícolas en la zona, pues en la fecha de las imágenes algunos predios están sembrados, mientras que otros están por sembrarse, prestándose a confusión espectral en el último caso, con áreas donde la cobertura vegetal es nula o muy baja (suelo desnudo o matorrales por ejemplo), 2) En segundo lugar, porque los polígonos urbanos, sobre todo aquellos localizados en la periferia de la Ciudad de Chihuahua, tienen baja densidad de edificaciones y ocupación, lo cual puede prestarse a confusión espectral con áreas donde la vegetación se ha degradado por distintas actividades humanas. Las clases urbano y agrícola se sobrepusieron mediante álgebra de mapas a los mapas generados por clasificación espectral, que ya habían sido validados. Estas cartografías finales, de 2000 y 2017, se sobrepusieron entre sí para obtener la matriz de cambio en toda la cuenca, o la tabla que identifica cambios y su proporción, conforme al método descrito por Pontius (2004).

2.2. Modelización del impacto hidrológico del cambio de uso del suelo: aplicación del método Número de Curva.

Para la modelización de la relación lluvia-escorrentía se consideraron los criterios del documento técnico Urban Hydrology for Small Watersheds TR 55 elaborado por Natural Resources Conservation Services de los Estados Unidos (NRCS-USDA, 1986), Brooks et al (2013) y Raja, (2015). De acuerdo a estos, la escorrentía puede modelarse con la ecuación 1:

Ecuación 1:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde Q es la profundidad de la escorrentía (Pulgadas o mm):

P es la lluvia (Pulgadas o mm)

S es el potencial máximo de retención de humedad en el suelo,

S es el potencial máximo de retención de humedad en el suelo, pudiendo estar entre 0.2 y 0.05.

En esta ecuación, S (mm) es igual a (Ecuación 2):

Ecuación 2:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254$$

Se asumió una condición de retención de humedad de 0.05, dadas las recomendaciones de Hawkins et al (2003).

En la ecuación 2, NC corresponde a los valores propuestos por NRCS-USDA (1986), a partir de la combinación de uso del suelo, grupo hidrológico del suelo (con base en su permeabilidad y respuesta hidrológica) y porcentaje de cobertura de suelo cuando la cubierta contiene elementos vegetales. En la variable usos del suelo se incluyen tipos de cubierta en la cuenca a analizar (áreas pavimentadas, sin pavimento, áreas agrícolas, etc.), en la variable respuesta

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

hidrológica del suelo se incorporan los grupos hidrológicos del suelo (GHS) (A,B,C,D) en función de su permeabilidad/impermeabilidad y profundidad efectiva, y en la variable porcentaje de cobertura de suelo se describen la densidad de las cubiertas vegetales cuando estas existen.

En nuestro caso se superpusieron los mapas de cobertura y uso del terreno de los años 2000 y 2017 generados en la fase 1, a un mapa de GHS generado mediante la reclasificación de la cartografía de suelos provista por INEGI (2007) en las cuatro categorías que requiere el método. Estas cuatro categorías van desde GHS tipo A (Que incluye suelos muy permeables), GHS tipo B (Que incluye suelos medianamente permeables), GHS tipo C (Que incluye suelos con limitaciones a la permeabilidad) hasta suelos casi impermeables, incluidos en el GHS tipo D de acuerdo al método. En la práctica estas categorías se vinculan con suelos que van desde una textura gruesa y velocidades de infiltración de entre 7.6 y 11.43 mm/hr (Suelos A), 3.81 a 7.6 mm/hr (Suelos B), y 1.27 mm/hr (Suelos C), hasta suelos de textura muy fina, con alta cantidad de arcillas, y prácticamente impermeables (Suelos D) (Mays, 2012). Para la reclasificación se consideraron los criterios de Gómez & Soriano (2013) y mediciones previas de permeabilidad en los suelos de la zona (CONAGUA, 1991). Sus atributos y cobertura, que se obtuvieron de INEGI (2003) e INEGI (2007) se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de suelo y atributos de permeabilidad considerados para el cálculo de Número de Curva

Tipo de suelo	Atributos de permeabilidad	Tipo Asignado	Área (ha)
Fluvisoles,	Suelos con capacidad de infiltración buena y bajo potencial de generar escorrentía. Poseen elevada porosidad y una profundidad efectiva mayor a 1 m. Tienden a presentar alto contenido de materiales acarreados por el agua, y estructura débil o suelta.	A	7082.46
Xerosoles, Castañozems	Suelos con potencial medio para generar escorrentía, con profundidades efectivas no mayores a un metro y un horizonte petrocálcico cementado o ligeramente cementado en el subsuelo (caliche), este horizonte también puede ser de arcillas.	B	101060.28
Regosoles	Suelos con potencial alto para generar escorrentía. Tienen un reducido contenido de materia orgánica, y muestran profundidades efectivas frecuentemente menores a 25 cm. Les subyace una capa de roca, lo que limita la infiltración y favorece la escorrentía.	C	24035.76
Litsoles	Suelo con potencial muy alto para generar escorrentía. Tiene bajos niveles de infiltración, debido a una reducida porosidad o poca profundidad efectiva del suelo, a menudo menor de 10 cm, limitados por roca o caliche endurecido, limitando la infiltración y favoreciendo la escorrentía.	D	138223.98

Fuentes: INEGI (2003) e INEGI (2007).

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivares, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

En la tabla 2 se muestran los valores de NC sugeridos para cada combinación de uso del suelo y grupo hidrológico del suelo en la cuenca Chviscar-Sacramento.

Tabla 2. Números de Curva por combinación de uso del suelo y grupo hidrológico del suelo.

CLASE DE USO DEL SUELO	VALORES DE NC POR GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
	A	B	C	D
Bosque (Encino, Encino-Pino, Pino)	37	47	57	67
Matorrales (Xerófilos)	68	79	86	89
Pastizales	49	69	79	84
Agrícola (Anuales y Perenes)	72	81	88	91
Humedal	100	100	100	100
Cuerpo de agua	100	100	100	100
Urbano	89	92	94	95
Suelo desnudo	89	92	94	95

Fte: NRCS-USDA (1986), Mays, (2012)

Las imágenes obtenidas en la primera superposición se procesaron mediante calculadora de mapas, para recalcular los valores de NC incorporando las pendientes de la cuenca derivadas de un modelo digital de elevación del terreno (MDE), correspondiente al Continuo de Elevaciones Mexicano descargado del sitio de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>) a 30 metros de resolución (X,Y). Este MDE posee un error medio cuadrático general de 4.8 m en el eje Z, lo cual se consideró apropiado para el área de la cuenca. Para la corrección por pendiente se utilizó la fórmula propuesta por Huang et al (2006), pues ya se ha probado con resultados satisfactorios en cuencas con atributos parecidos a la zona de estudio (Ebrahimian *et al.*, 2012), básicamente por la existencia de pendientes relativamente pronunciadas que pueden modificar el NC; como también es en este caso en las serranías al occidente y al poniente de la ciudad de Chihuahua. La fórmula fue desarrollada para aplicarse en sitios donde la pendiente puede afectar en forma importante el potencial de escurrimiento (Ecuación 3):

Ecuación 3:

$$CN \alpha = CN \frac{322.79 + 15.63 \alpha}{\alpha + 323.52}$$

En la ecuación 3, CN es el valor de NC provisto por NRCS-USDA (1986), CN α es el valor de NC ajustado por pendiente, α es el valor de pendiente (m*m-1), derivado del modelo digital de elevaciones en el Sistema de Información Geográfica. Con esta ecuación se obtuvieron los mapas de NC ajustados por pendiente (CN α).

Además de la pendiente, en la asignación del valor de NC también debe considerarse la humedad precedente (AMC: antecedent moisture condition por sus siglas en inglés) en los cinco

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

días previos a la precipitación que se va incluir en la fórmula (P ecuación 1), pues la saturación de humedad en el suelo y su cubierta determina en forma muy importante el potencial de escurrimiento o NC. En la bibliografía se reportan tres condiciones de humedad precedente (I; II y III, de menor a mayor saturación; Brooks *et al.*, 2013), pero las tablas disponibles presenta valores de NC para la condición II (NRCS-USDA, 1986; Mays, 2012); que corresponden a una lluvia acumulada en el rango de a 35.6 a 53.3 mm durante los cinco días previos al evento de precipitación que se incluye en la fórmula 1. Valores por abajo o por arriba de estos límites deben recalcularse con fórmulas disponibles en la bibliografía (Raja, 2015). En el caso de la zona de estudio, donde la tabla 2 corresponde a NC en AMC II, se determinaron las condiciones de humedad precedente a las lluvias probables con periodos de retorno (PR) de 5 y 10 años, observándose que generalmente se acumulan más de 53.3 mm en los cinco días previos, lo que corresponde a una condición de elevada humedad y alto potencial de escurrimiento, o condición III. Por lo tanto, los valores de CN α , o NC corregidos por pendiente, se actualizaron y escalaron a AMC III con la ecuación 4:

Ecuación 4:

$$CN\ III = \frac{23\ CN\ \alpha}{10 + 0.13\ CN\ \alpha}$$

Donde CN III será el NC a incorporar en la ecuación 2 del modelo. A su vez, las lluvias correspondientes a estos periodos de retorno se determinaron con base en la fórmula de Weibull, provista por Brooks *et al.*, (2013) (Ecuación 5):

Ecuación 5:

$$PR = \frac{n + 1}{m}$$

Donde:

PR = Valor inverso a la probabilidad de excedencia de un evento de lluvia

n = Número total de datos de la serie de registros diarios de lluvia.

m = Numero de orden de la serie arreglada en orden decreciente.

A partir de los procedimientos anteriores se pudo determinar los valores de NC y P, que se utilizarían en las ecuaciones 1 y 2, mediante procedimientos de álgebra de mapas. Todos los cálculos se realizaron en el software Idrisi Versión 17 (Selva). Para este procedimiento se utilizó la extensión CN-Idris, desarrollada por Guzmán, Luna, & Berlanga Robles (2011); misma que realiza los cálculos de forma semi-automatizada. Al final, los valores de Q se expresaron en milímetros, y con ellos se obtuvo el volumen final de agua escurrida, utilizando la siguiente fórmula por pixel (Berlanga-Robles et al, 2011), calculando para cada uno de estos y obteniendo la sumatoria total (Ecuación 6):

Ecuación 6:

$$Qvol = \frac{Qmm * 100}{100,000} * Area$$

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuiscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

3. Resultados

3.1. Cambios de uso del suelo en el periodo 2000-2017.

La confiabilidad de los mapas generados mediante clasificación espectral fue buena, con eficiencias globales de 90 y 88 % para 2000 y 2017 respectivamente, y valores de índice Kappa de 0.78 y 0.77, en el mismo orden, por lo que se consideraron adecuados para hacer inferencias espaciales. El traslape en SIG de estas cartografías permitió identificar la dinámica espacio-temporal de los cambios de la cubierta vegetal y los usos del suelo en toda la zona de estudio (Figura 2). En el traslape fueron evidentes dos procesos: 1) la intensificación los usos del suelo en las zonas bajas a partir de la apertura de polígonos agrícolas o áreas urbanas en zonas que tenían cobertura natural (matorrales) o de uso agropecuario en el año 2000 (pastizal matorrales); y 2) La pérdida de cobertura boscosa en las partes altas, que fueron sustituidas por pastizales o matorral; así como la conversión de matorrales en pastizales para uso ganadero.

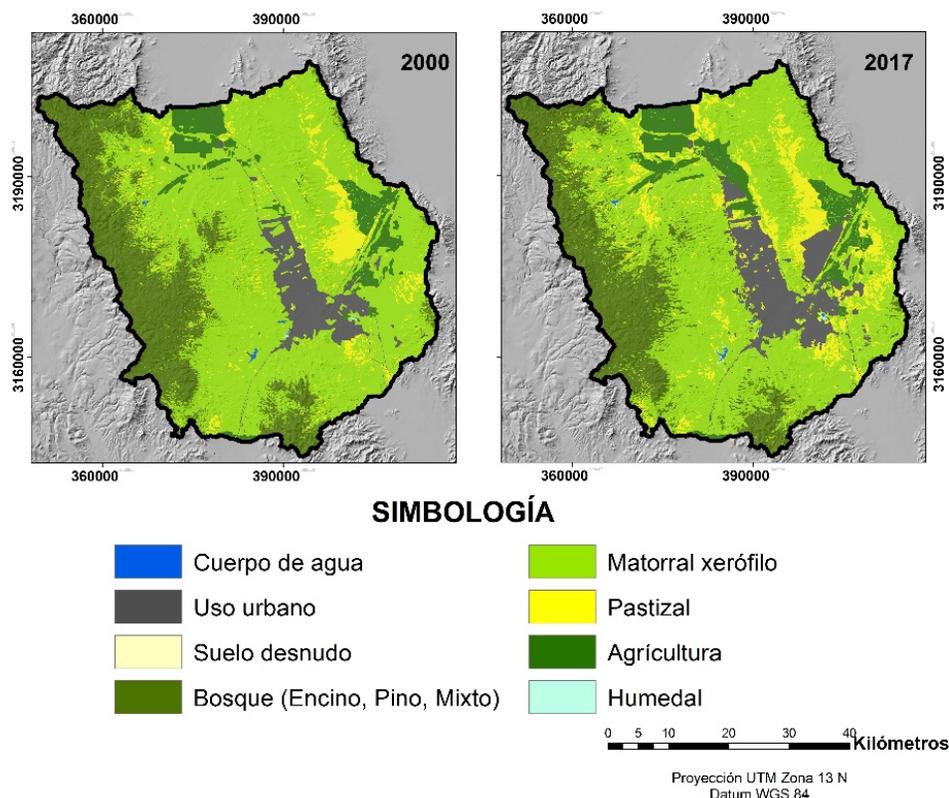


Figura 2. Dinámica de los usos del Suelo y vegetación en el área en los años 2000 y 2017.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuiscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

La dinámica anterior puede observarse con claridad en la matriz de tabulación cruzada (Tabla 3), arreglo tabular que permite identificar que cambió a qué a lo largo del tiempo (Pontius *et al.*, 2004). Esta matriz indica en el último renglón la superficie de cada cobertura en el año 2000, y en la última columna la superficie de las mismas coberturas en 2017. En su diagonal principal se indican las superficies de cada clase que permanecieron sin cambio, mientras que los valores fuera de la diagonal representan los cambios entre 2000 y 2017: pérdidas de una clase a otra si están en los renglones, o ganancias de cada clase si están en las columnas.

Tabla 3. Matriz de tabulación cruzada entre clases de cubierta vegetal y uso del suelo

	AGUA	URBANO	SUELO DESNUDO	BOSQUE	MATORRALES	PASTIZALES	AGRICULTURA	HUMEDAL	TOTAL 2017
AGUA	200.43	0	0	2.88	67.5	2.16	3.42	2.88	279.27
URBANO	0.09	18889.44	4.14	1.08	5808.15	2671.74	466.92	2.34	27843.9
SUELO DESNUDO	0	0	0.18	0	11.97	0.99	0	0	13.14
BOSQUE	0.18	0	0	48720.78	5124.69	154.8	0.54	0	54001.08
MATORRALES	18	0	0	12213.81	126100.26	3804.66	602.37	16.65	142755.75
PASTIZALES	9.81	0	0.18	475.02	18856.62	8826.03	66.69	17.46	28251.81
AGRICULTURA	0	0	0	0.54	5072.22	215.37	14416.47	0	19704.6
HUMEDAL	15.75	0	0	3.87	99.9	10.53	0	38.88	168.93
TOTAL 2000	244.26	18889.44	4.5	61417.98	161141.31	15686.28	15556.41	78.21	273,018.50

durante el periodo 2000-2017 (Unidades en hectáreas).

Fte: este trabajo.

Para entender la matriz se describe la pérdida de superficies boscosas y el incremento de la superficie urbanizada. Por lo que se refiere al primer caso, la superficie de bosque de pino-encino tuvo 61417.98 ha en 2000 y disminuyó hasta 54001.08 ha en 2017. Durante estos 17 años, conservó 48720.78 ha del bosque original, pero perdió importantes superficies que se convirtieron en matorrales (12213.81, probablemente vegetación secundaria), pastizales (475.02 ha), además de otras superficies notablemente menores que se transformaron en cuerpos de agua y humedales (Posiblemente represas ganaderas), áreas agrícolas y de asentamiento humano. Por otro lado, el bosque ganó 5124.69 ha de matorrales (posiblemente vegetación secundaria que se regeneró), 154.8 ha de pastizales que se convirtieron en bosque (Pastizales abandonados), y otras superficies menores de otras clases que se incorporaron a la clase bosque.

Por lo que se refiere a la cobertura urbana, ha incrementado sustancialmente su superficie, al contrario de la clase bosque. Tuvo 18889.44 ha en 2000, pero incrementó a 24936.48 ha al año 2017. Este incremento fue a costa de matorrales, pastizales y agricultura (5808.15, 2671.74, 466.92; respectivamente); y en una proporción notablemente menor, por la desecación de cuerpos de agua y humedales. Otras clases que presentan una dinámica de cambio muy acentuada son los matorrales y los pastizales. Una superficie importante de matorrales (18856.62 ha) se incorporó a la cobertura de pastizal, aunque muchos pastizales se reconvirtieron a matorral (3804.66 ha) probablemente por su baja productividad ganadera. Este último también perdió superficies muy importantes que se convirtieron a uso urbano y agrícola (5808.15 y 5072.22 ha, respectivamente); mientras que los

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

pastizales perdieron otras superficies importantes que se incorporaron al uso urbano, y en menor medida al bosque, agricultura y humedales (2671.74, 154.8, 215.37 y 10.53 ha, respectivamente).

Es importante notar que hubo clases con muy poca cobertura respecto al total de la cuenca, como los humedales o el suelo desnudo. Su superficie es tan pequeña que no alcanza a apreciarse en la figura 3, pero se consideró necesario incluirlas por su relevancia funcional. El suelo desnudo puede ser la fase final de un proceso grave de degradación de la cubierta vegetal, asociado a sobrepastoreo de matorrales o pastizales, o bien deforestación de los bosques; que afortunadamente no parece muy grave en la cuenca. Los humedales por su parte, también son importantes, pues la zona es árida y carece de ellos, por lo que son relevantes desde el punto de vista de su rareza y singularidad ecológica.

Con los mapas anteriores, la distribución espacial de los grupos hidrológicos del suelo y la pendiente (figura 3), se calculó el impacto hidrológico de los cambios de cobertura, que se menciona en la siguiente sección.

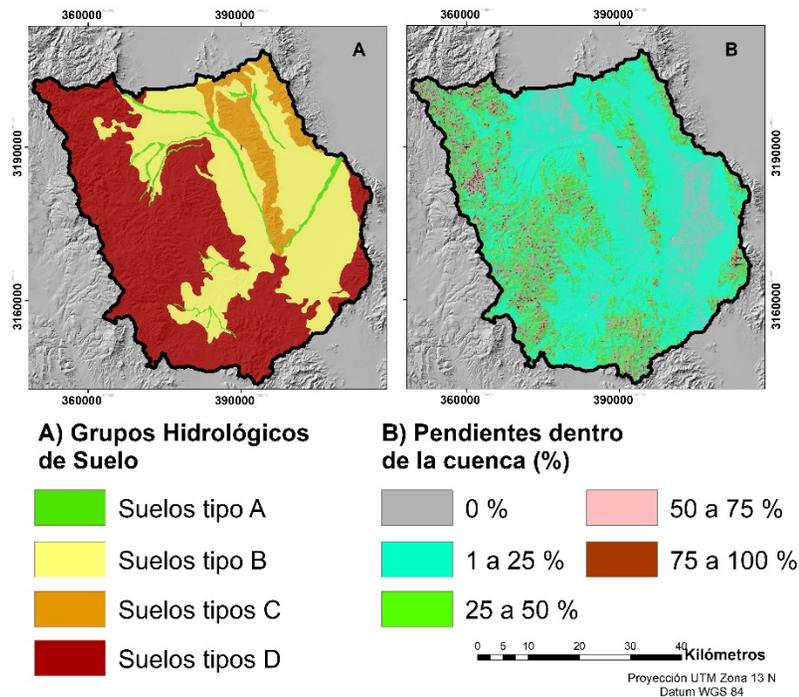


Figura 3. Grupos hidrológicos del suelo y pendientes dentro de la cuenca Chuviscar-Sacramento.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

3.2. Impacto de los CUSCV sobre la escorrentía:

La escorrentía fue modelada con precipitaciones de 62 y 88 mm en 24 horas, que fueron las lluvias correspondientes a eventos con PR de 5 y 10 años, de acuerdo a los PR obtenidos con la Ecuación 5, utilizando los registros pluviométricos locales.

La modelación de la escorrentía mostró cambios de NC, derivados de las modificaciones al uso del suelo y la cubierta vegetal en la cuenca (Figura 4). Los incrementos más notorios se observan en los piedemontes de zonas montañosas al oeste de la cuenca, debido a la pérdida de cobertura de bosques, que es sustituida por matorrales y pastizales; así como a la sustitución de matorrales y pastizales por áreas urbanas, en las zonas bajas de la cuenca. Los decrementos se asocian con la ampliación de la agricultura a costa del matorral, y la conversión de matorrales en pastizales, debido a la ampliación de la frontera agropecuaria.

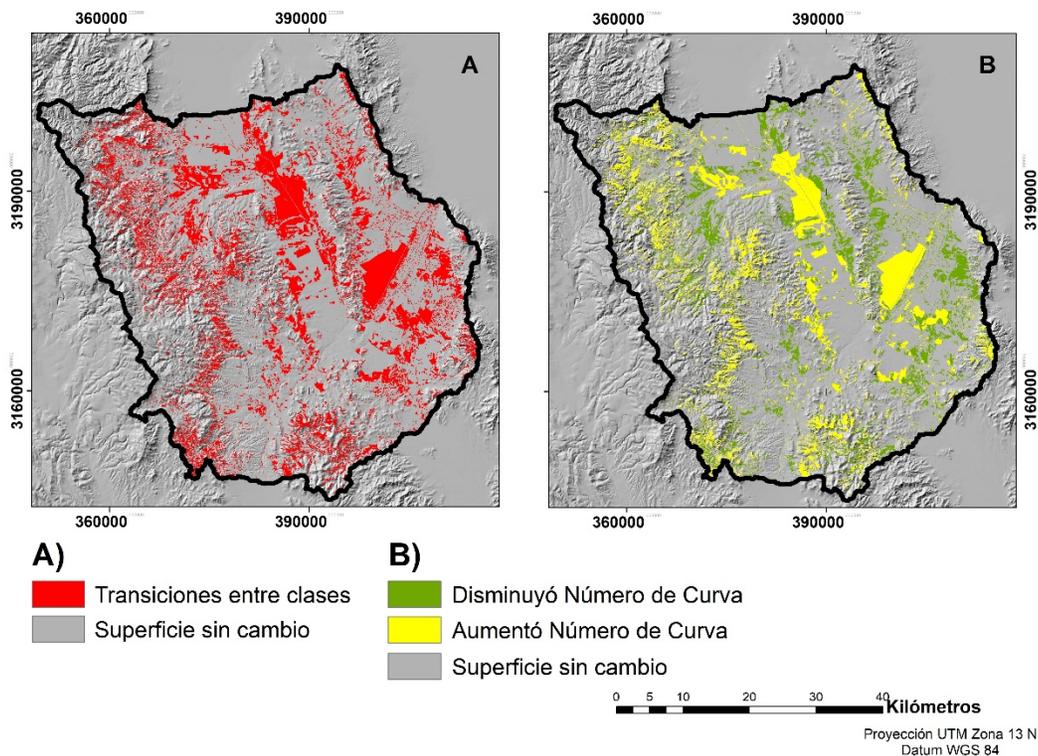


Figura 4. Comportamiento del número de curva en relación a los cambios de uso del suelo y la cubierta vegetal en la cuenca Chuviscar-Sacramento (2000-2017).

Fuente: este trabajo

En la tabla 4 se observan las superficies con incremento, decremento y sin cambios para Número de Curva.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivares, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

Tabla 4. Cambio del Número de Curva en Superficie (ha) 2000-2017.

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Sin Cambio NC	226,583.99	82.99
Incrementó NC	22,779.36	8.34
Disminuyó NC	23,655.15	8.66
Total	273,018.50	100

Fuente: este trabajo.

En términos generales se observa que el 17.01 % de la cuenca experimentó cambios significativos de NC (incremento o decremento), siendo ligeramente mayor la superficie que experimentó un decremento respecto a las zonas donde el valor de NC incrementó. Cabe referir que la magnitud del cambio en el valor de NC también se vio influenciada por la localización del sitio donde ocurrió la modificación en los usos del suelo, principalmente en las zonas de alta pendiente. Así, por ejemplo, cambios de pastizal a matorral xerófilo incrementan el número de curva, pero este incremento es mayor si el pastizal se encuentra en una zona de elevada pendiente. También pueden mencionarse las sustituciones de matorral xerófilo o zona boscosa por zona urbana, con efectos más fuertes en el cambio de NC (incremento) conforme la pendiente se incrementa.

Los cambios anteriores se reflejaron en la profundidad de la escorrentía en diferentes condiciones de cobertura vegetal, suponiendo las tormentas correspondientes a periodos de retorno de 5 y 10 años (Figura 5).

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

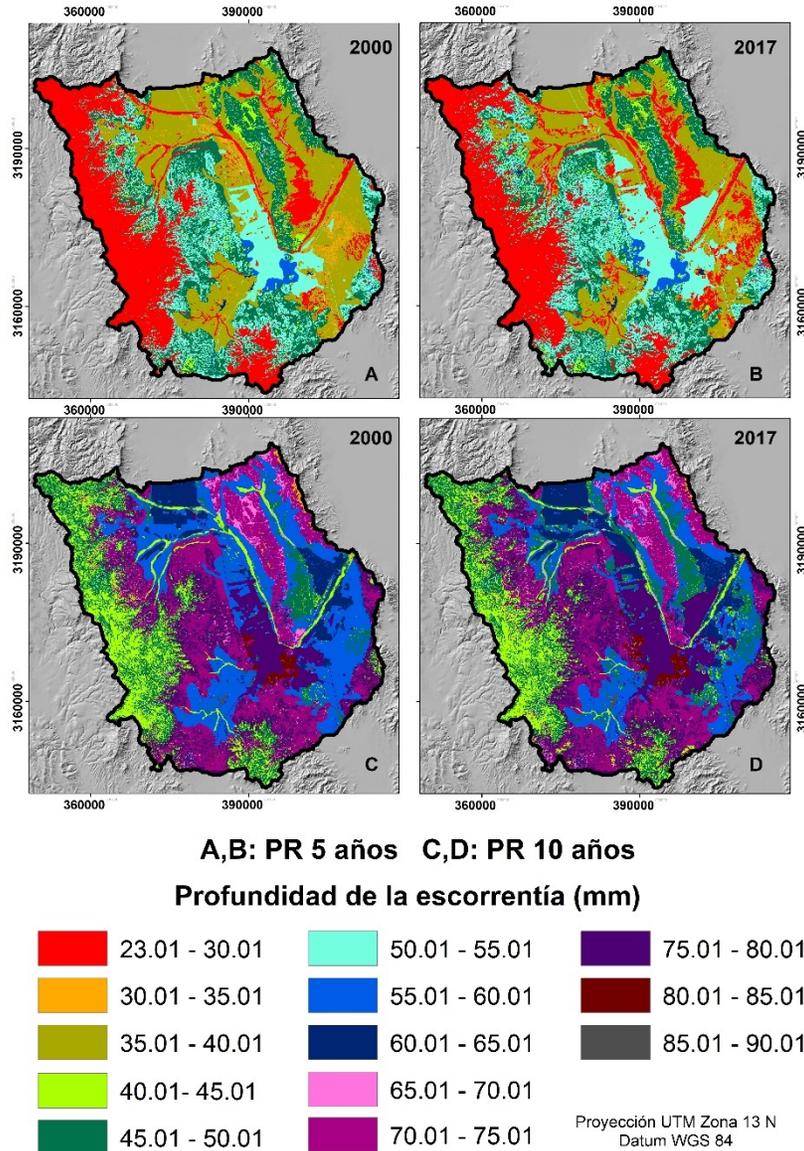


Figura 5. Q por pixel (mm) en la Cuenca Chuviscar-Sacramento (2000-2017) según el método del Número de Curva, para tormentas con periodos de retorno de 5 y 10 años (62 y 88 mm en 24 horas, respectivamente).

Fuente: este trabajo.

Tabla 5. Volumen de escorrentía acumulada total para toda la cuenca Chuviscar-Sacramento (Método de Número de Curva).

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

En ambos casos se observó que los incrementos más importantes en la profundidad de la escorrentía ocurren donde hubo pérdida de cobertura boscosa o de matorrales xerófilos, hacia el oeste, centro y este de la cuenca, pues en estas zonas el bosque se transformó en matorrales y pastizales; así como en zonas donde estas dos últimas clases se transformaron en nuevas zonas urbanas o zonas agrícolas (centro y norte de la cuenca). Los decrementos por su parte se observan claramente al noreste, y en menor medida al suroeste, donde los matorrales se transformaron en áreas de pastizal ganadero. Aunque en términos generales se observó que las superficies donde el NC disminuyó fueron superiores a las superficies donde el NC incrementó, la escorrentía en toda la cuenca tuvo un comportamiento inverso, pues en 2017 es ligeramente mayor a lo observado en 2000, consistentemente para tormentas con PR de 5 y 10 años (Tabla 5):

Tabla 5. Volumen de escorrentía acumulada total para toda la cuenca Chuviscar-Sacramento (Método de Número de Curva).

Fecha del mapa de uso del suelo	Volumen en millones de metros cúbicos.	
	PR 5 AÑOS (62 mm lluvia)	PR 10 AÑOS (88 mm lluvia)
2000	105.22	167.68
2017	107.26	170.01

Fte: este trabajo.

Esto se debe a que los cambios de uso del suelo que favorecen la escorrentía ocurren de forma importante en zonas de alta pendiente, y los incrementos absolutos en el potencial de escurrimiento son mayores a los decrementos absolutos cuando el NC se reduce, aunque la cobertura espacial o superficie donde ocurrieron las reducciones haya sido ligeramente mayor. Es decir, aunque hay zonas importantes donde NC se reduce, la magnitud de los cambios donde NC ha incrementado, aumenta la escorrentía para toda la cuenca.

4. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos indican que la cuenca Chuviscar-Sacramento experimenta una dinámica importante de cambio de uso del suelo. Esta dinámica se caracteriza por dos procesos: 1) La intensificación de los usos del suelo en las partes bajas de la cuenca, vinculada predominantemente a la ampliación de zonas urbanas, el desarrollo de la agricultura, y la apertura de pastizales; y 2) La ampliación de la frontera agropecuaria en las partes altas y de elevada pendiente cercanas al parteaguas. Los impactos de estos cambios se traducen en modificaciones del potencial de escurrimiento, reduciéndolo en ciertas zonas de la cuenca, pero incrementándolo en

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivás, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

términos totales durante el periodo abordado en este trabajo (2000-2017); de ahí el incremento en el volumen escurrido total.

Como pudo verse en la sección de resultados, estos procesos originan cambios del potencial de escorrentía muy heterogéneos espacialmente, reflejados en los incrementos y decrementos del número de curva. En términos generales predomina un incremento en zonas que son muy importantes para la hidro-funcionalidad de la cuenca, donde se ha perdido bosque por su conversión en matorral, o bien donde se han perdido pastizales y matorrales por la ampliación de la frontera urbana. Por otro lado, también se observan áreas donde el potencial de escorrentía se ha reducido debido a la ampliación de coberturas que protegen al suelo de la fuerza de la lluvia. Es el caso de la apertura de pastizales en zonas que inicialmente estuvieron cubiertas por matorrales xerófilos, pues los matorrales se caracterizan en la zona por un alto grado de deterioro asociado con inadecuadas prácticas de manejo ganadero y cambios desordenados de uso del suelo (Conabio-Gobierno de Chihuahua, 2015).

Los resultados obtenidos en la modelización hidrológica sugieren que la escorrentía en condiciones de tormenta es bastante importante. Aunque los incrementos en el volumen escurrido total de una condición de uso del suelo a otra (2000-2017) no parecen mayúsculos, evidencian un proceso de cambio espacial en la cuenca que está alterando sus condiciones actuales de balance hidrológico. El resultado de los cálculos demuestra mayor escurrimiento, pero también puede inferirse menor infiltración, y un incremento de la demanda de agua por la ampliación de la mancha urbana, y usos del suelo vinculados a la ampliación de pastizales, como la ganadería, que incorporan al agua como un insumo productivo. Este es también el caso de la agricultura que se está ampliando espacialmente al norte de la cuenca, por lo que de continuar con esta tendencia en el futuro, es previsible que los impactos sobre su balance hidrológico sean también mayores.

Es muy importante destacar que los cálculos se realizaron pixel por pixel, para ser sumados posteriormente en un valor agregado de escorrentía por condición de tormenta. Realizar el cálculo pixel por pixel, atiende al hecho de que el valor de parámetros que infieren el potencial de escurrimiento son muy sensibles al efecto de escala, y disminuyen conforme se incrementa el tamaño de la cuenca (Goodrich *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2004), esto debido, presumiblemente, al sesgo estadístico asociado con la obtención de valores promedio. En este sentido, no se obtuvo un valor de número de curva ponderado para toda la cuenca, como se observa en otros trabajos parecidos. En este caso se buscó reducir el efecto de escala, y obtener valores de NC lo más cercanos posibles a lo que se obtendría en un lote individual a la resolución de las imágenes de donde se obtuvo el uso del suelo (30 m por 30 m). Esta fue la razón de mayor peso para calcular NC a nivel pixel.

Debe destacarse que los datos aquí presentados se han generado mediante un modelo teórico que deberá validarse con mediciones y calibraciones in situ. Al momento de elaboración de este trabajo, no había mediciones hidrométricas diarias en la cuenca para tormentas con los periodos de retorno simulados, y en caso de haberlos, es posible que existieran diferencias con los datos reales. Se trata del riesgo inherente a toda modelación, aunque, como se mencionó previamente, en numerosos estudios se han encontrado correlaciones superiores a 0.8 entre las escorrentías modeladas en gabinete, y los valores obtenidos en el terreno cuando se aplica el método de número

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivias, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

de curva (Kumar, Tiwari, & Pal, 1991; Gonzalez, Temimi, & Khanbilvardi, 2015; Verma, et al, 2018).

Como se señala por diversos autores, la precisión depende de asignar correctamente parámetros clave como la abstracción inicial (o capacidad de retención de agua de la cuenca) (Yuan *et al.*, 2014), la condición de humedad antecedente (Lal, Mishra, & Kumar, 2019, Silveira, Charbonnier, & Genta, 2000), el factor de escorrentía en campo o NC (Gonzalez *et al.*, 2015), o de efectuar el ajuste por la pendiente del terreno (Verma *et al.*, 2018). En el caso de los primeros dos factores, sus valores se asignaron mediante una revisión exhaustiva de las estadísticas pluviométricas en la cuenca. Para la humedad antecedente, por ejemplo, se revisaron los eventos históricos de precipitación atípica, y se encontró que estos generalmente son precedidos por días de lluvia superior a la media, acumulando en todos los casos más de 55 mm; por lo que se eligió una humedad precedente de III. Consecuentemente con esto, también se definió una abstracción inicial de 0.05, considerando que bajo esas condiciones de humedad antecedente, las posibilidades de retención de agua son muy bajas dado que el suelo se encuentra saturado de humedad. En este último caso, también se consideraron los referentes de otros autores, que han mencionan esta cifra como el valor más apropiado al momento de modelizar el escurrimiento (Shi *et al.*, 2009).

Por lo que se refiere a la elección de los valores de número de curva por cada combinación de uso del suelo y tipo de suelo, se consultaron las tablas provistas en distintos textos de hidrología de superficie (NRCS-USDA 1986; Mays, 2012), pero también trabajos generados localmente donde se explora el impacto del cambio de coberturas de uso del suelo sobre procesos como la infiltración y la escorrentía (Viramontes-Olivias *et al.*, 2012). Finalmente, por lo que se refiere a pendiente, en este trabajo se ajustó el NC aplicando el algoritmo mencionado por Huang et al (2006).

Los cálculos presentados se sustentan en un procedimiento sólido que ha mostrado su utilidad en numerosos trabajos previos y de amplia aceptación internacional (Lian et al, 2020). De cualquier manera, es importante iniciar la medición periódica de caudales en los ríos Chuviscar y Sacramento, para calibrar el modelo con datos experimentales. La incertidumbre en estos modelos puede reducirse mediante mediciones directas de la escorrentía y la infiltración en campo (Rojas Sigala & González Pérez, 2015). Otra medida deseable, es mejorar la calidad del mapa de suelos, pues este se reclasificó en grupos hidrológicos (A,B,C,D) a partir de la cartografía edafológica de INEGI con resolución de 1:250000. Una cartografía del suelo con mayor resolución, permitirá cálculos del escurrimiento más aproximados a la realidad (Mednick, 2010), y una estimación más fiable del impacto hidrológico de los cambios de uso del suelo.

También es importante notar, que los cambios de uso del suelo generan impactos indirectos no cuantificados en este trabajo. Mayor cobertura de pastizales implica que la cuenca se está transformando al uso ganadero, lo que seguramente demanda mayor cantidad de agua del subsuelo respecto a la condición original (Rubio & Perez, 2012). En sentido inverso puede mencionarse el caso de las transformaciones urbanas, pues aunque generalmente implican la impermeabilización del suelo (Li *et al.*, 2018), pueden tener impactos positivos sobre la escorrentía, si se acompañan de la construcción de infraestructura que retenga los escurrimientos (embalses urbanos, obras de recarga en zonas urbanas, colectores de drenaje pluvial, etc.); pudiendo ser el mismo caso, si se implementan medidas para reducir escurrimientos en las zonas naturales deforestadas.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivares, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuvistar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

Lo anterior justifica que los trabajos subsecuentes sean cada vez más detallados y completos. Además de las mediciones hidrométricas, se requieren levantamientos edafológicos en campo, y mapeos de la vegetación que permitan apreciar diferencias regionales dentro de la cuenca. Esto requiere mucho trabajo de campo, pues su representación cartográfica en mapas con mayor nivel de detalle podría mejorar la asignación de valores de número de curva por clase. Este trabajo es el segundo trabajo conocido en la región orientado a medir el impacto hidrológico de las modificaciones a las coberturas del terreno (El primero fue realizado por IMPLAN, 2009), por lo que es importante incorporar procedimientos y metodologías que permitan una comprensión más profunda y detallada de dichos impactos.

5. Conclusiones

Como se observó en el trabajo, en la cuenca Chuvistar-Sacramento se observa una dinámica intensa de cambios de uso del suelo y modificaciones de la cubierta vegetal. Dichos cambios denotan un proceso de intensificación de los usos del suelo en las partes bajas (urbano, agrícola y pastizales), y de ampliación de la frontera agropecuaria en las partes altas de la cuenca. Dichos cambios han incrementado la escorrentía en condiciones de tormenta, y afectan probablemente el balance hidrológico actual. La conversión e intensificación de coberturas ha elevado el NC a nivel global, mientras que la intensificación de los usos del suelo seguramente incrementa la demanda de agua. Si la tendencia persiste, es de suponerse una presión creciente sobre el recurso hídrico, y condiciones más desfavorables para captarlo de forma natural.

Los resultados muestran que la escorrentía rebasa con mucho la capacidad de captación local de agua, incluso en tormentas que pueden ocurrir en periodos de retorno relativamente cortos, de 5 y 10 años. En la zona de estudio sólo hay capacidad para almacenar 38.2 millones de m³ del agua que escurre, por lo que resolver la problemática hídrica de la región requiere incrementar la capacidad instalada en presas y embalses. El manejo adecuado del agua pluvial puede representar un alivio a la problemática que experimenta la ciudad de Chihuahua y su entorno circundante. Con base en lo anterior, puede decirse que los resultados de este trabajo constituyen una contribución valiosa para la planeación urbana de la Ciudad de Chihuahua, pues ponen en perspectiva la insuficiencia de la infraestructura construida para captar los escurrimientos superficiales. El manejo local del agua pluvial ha sido muy deficiente, mientras el agua del subsuelo no alcanza para satisfacer la demanda urbana y rural de la cuenca.

Los objetivos planteados al inicio del trabajo: 1) comprender cuales han sido las modificaciones a la cubierta vegetal y los usos del suelo en esta cuenca durante el periodo 2000-2017 y 2) entender que impactos han tenido estos cambios sobre el potencial de escorrentía se cumplieron. Mediciones hidrométricas diarias de caudales (no existen), levantamientos de campo en información de suelo, y mapas de uso del suelo más detallados, pueden mejorar la asignación de número de curva por clase, y volver más precisa la modelización de un proceso como la escorrentía, estrechamente asociada a los cambios espaciales y temporales del uso del suelo en cuencas.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

8. Referencias bibliográficas

Berlanga-Robles, C., Ruiz-Luna, A., Covarrubias-Legaspi, H., & Hernández-Guzman, O. (2011). Patrones de escurrimiento en la Cuenca LechuguillaOhuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el modelo del número de curva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 39-52.

Bewket, W., & Sterk, G. (2005). Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, 19, 445-458. <https://doi.org/10.1002/hyp.5542>

Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyssen, J., & Cai, X. (2019). Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 112, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006>

Brooks, K., Ffolliot, P., & Magner, J. (2013). *Hydrology and the Management of Watersheds* (Fourth). Wiley-Blackbell.

Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona. Editorial Ariel, 397-427 pp.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), y Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Gobierno del Estado de Chihuahua. (2015). Estrategia para la Conservación y el Uso Sustentable de la Biodiversidad del Estado de Chihuahua. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 25 pp.

CONAGUA. (1991). Actualización del estudio geohidrológico, políticas de operación y proyecto de manejo del acuífero del Valle de Cuauhtémoc Chihuahua. Comisión Nacional del Agua. Contrato CNA-GRN-90-009, 186 Pp.

Congalton R., & Green, K. (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and Practices*. Florida, USA. Lewis Publishers, 105-119 pp.

Congalton, R. (2004). *Putting the Map Back in Map Accuracy Assesment*. En Lunetta, Ross, y Lyon, John (Eds). Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment. CRC Press. 1-15 pp.

Eastman, R. (2016). Terrset Geospatial Monitoring and Modelling System. Tutorial. Worcester MA. USA. Clark University, 468 pp.

Ebrahimian, M., Ainuddin, A., Mohd Soom, M., Mohd Sood, A., & Ju Neng, L. (2012). Runoff estimation in steep slope watershed with standard and slope adjusted Curve Number Methods. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(5), 1191-1202.

Gómez, V., & Soriano, R. (2013). Asignación de Grupo de Suelo a partir de clasificaciones edáficas de base morfométrica. En: Sociedad Española de Ciencias Forestales (Ed), Memorias VI Congreso Forestal Español, (1-11). Vitoria-Gasteiz, España.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuiscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

Gonzalez, A., Temimi, M., & Khanbilvardi, R. (2015). Adjustment to the curve number (NRCS-CN) to account for the vegetation effect on hydrological processes. *Hydrological Sciences Journal*, 60(4), 591-605. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.898119>

Guzmán, R. H., Luna, A. R., & Berlanga Robles, C. A. (2011). CN-Idris: An Idrisi tool for generating curve number maps and estimating direct runoff. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1764-1766. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.006>

IMPLAN. (2009). Plan Sectorial de Agua Pluvial en la Ciudad de Chihuahua. Instituto Municipal de Planeación. Chihuahua, Chih. 150 pp.

INEGI. (2003). Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes México. 145 pp.

INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico H13-10 y H13-11. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

Lal, M., Mishra, S. K., & Kumar, M. (2019). Reverification of antecedent moisture condition dependent runoff curve number formulae using experimental data of Indian watersheds. *CATENA*, 173, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.002>

Li, C., Liu, M., Hu, Y., Shi, T., Zong, M., & Walter, M. T. (2018). Assessing the Impact of Urbanization on Direct Runoff Using Improved Composite CN Method in a Large Urban Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph15040775>

Lian, H., Yen, H., Huang, J.-C., Feng, Q., Qin, L., Bashir, M. A., Wu, S., Zhu, A.-X., Luo, J., Di, H., Lei, Q., & Liu, H. (2020). CN-China: Revised runoff curve number by using rainfall-runoff events data in China. *Water Research*, 177, 115767. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115767>

Ma, X., Xu, J., Luo, Y., Prasad Aggarwal, S., & Li, J. (2009). Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China. *Hydrological Processes*, 23, 1179-1191. <https://doi.org/10.1002/hyp.7233>

Mahmoud, S., & Alazba, P. (2015). Hydrological Response to Land Cover Changes and Human Activities in Arid Regions Using a Geographic Information System and Remote Sensing. *PLoS one*, 10, e0125805. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125805>

Mays, L. W. (2012). *Ground and Surface Water Hydrology* (First Ed). John Wiley & Sons.

Mednick, A. C. (2010). Does soil data resolution matter? State Soil Geographic database versus Soil Survey Geographic database in rainfall-runoff modeling across Wisconsin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(3), 190-199. <https://doi.org/10.2489/jswc.65.3.190>

Nájera, H. (2016). “Variación estacional de la calidad del agua en los Acuíferos de TabaopaAldama y Aldama-San Diego, en Chihuahua, México”. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

NRCS-USDA. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55). Natural Resources Conservation Services-United States Department of Agriculture. Washington D.C. 164.

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuvíscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101, 251-268.

Raja, V. (2015). Gis Based SCS - CN Method For Estimating Runoff In Kundahpalam Watershed, Nilgries District, Tamilnadu. *Earth Sciences Research Journal*, 19(1), 59-64. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n1.44714>

Rojas Sigala, D., & González Pérez, M. G. (2015). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 69-83.

Rubio, E., & Perez, E. (2012). *Desarrollo de la ganadería en el estado de Chihuahua 2000-2011: Líneas de trabajo para un estudio del impacto ambiental*. En Chihuahua Hoy: Vol. IX (pp. 271-292).

Shi, Z.-H., Chen, L.-D., Fang, N.-F., Qin, D.-F., & Cai, C.-F. (2009). Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *CATENA*, 77(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.006>

Silva, R. M., Santos, C. A. G., & dos Santos, J. Y. G. (2018). Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, 33(2), 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.04.005>

Silveira, L., Charbonnier, F., & Genta, J. L. (2000). The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. *Hydrological Sciences Journal*, 45(1), 3-12. <https://doi.org/10.1080/02626660009492302>

Universidad Autónoma Chapingo, & SAGARPA. (2009). Estudio de factibilidad de alternativas de riego por medio de una presa en el municipio de Tetela de Ocampo en el estado de Puebla. SAGARPA.

Verma, S., Singh, A., Mishra, S. K., Singh, P. K., & Verma, R. K. (2018). Efficacy of slope-adjusted curve number models with varying initial abstraction coefficient for runoff estimation. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 8(4), 317. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2018.095534>

Viramontes-Olivas, O. A., Reyes-Gómez, V. M., Rangel-Rodriguez, A., Ortega-Ochoa, C., Soto-Cruz, A., Camarillo-Acosta, J., & Lebgue-Keleng, T. (2012). Papel hidrológico-ambiental de pastizales nativos e introducidos en la cuenca alta del río Chuvíscar, Chihuahua, México. *TECNOCENCIA*, 6(3), 181-193.

Wang, G., Liu, J., Kubota, J., & Chen, L. (2007). Effects of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China. *Hydrological Processes*, 21, 1370-1382. <https://doi.org/10.1002/hyp.6308>

Yuan, Y., Nie, W., McCutcheon, S. C., & Taguas, E. V. (2014). Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in Southeastern Arizona. *Hydrological Processes*, 28(3), 774-783. <https://doi.org/10.1002/hyp.9592>

Bravo Peña, LC., Reyes Gómez, VM., Moreno Murrieta, RL., Alatorre Cejudo, LC., Torres Olave, ME., Granados Olivas, A., Fuentes Hernández, HA. (2020) Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuvistar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>

Zhang, X., Drake, N. A., and Wainwright, J. 2004. Scaling issues in environmental modeling. In Wainwright, J. and Mulligan, M. (eds.), *Environmental Modeling: Finding Simplicity in Complexity*, John Wiley and Sons, Chichester, 319-334.

