



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA
CUENCA SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

AZUCELLI MAYTHE MAURICIO PÉREZ

Bajo la supervisión de:

Ph.D. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN



Mayo, 2022
Bermejillo, Durango, México.



APROBADA

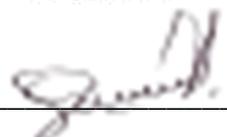


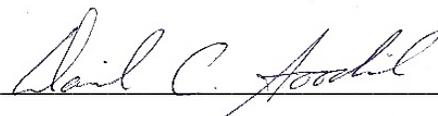
**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

Tesis realizada por **Azucelli Maythe Mauricio Pérez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

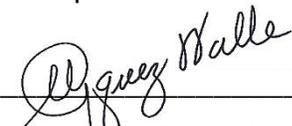
**DOCTOR EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR: 
Ph.D. Ignacio Sánchez Cohen

CO-DIRECTOR: 
Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

ASESOR: 
Ph.D. David Goodrich

ASESOR: 
Ph.D. Philip Heilman

ASESOR: 
Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

LECTOR EXTERNO: 
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1 Cuenca hidrográfica.....	7
3.2 Modelación hidrológica.....	8
3.3 Modelos hidrológicos distribuidos	10
3.4 Modelo SAWT.....	11
3.5 Calibración y validación de modelos hidrológicos.....	15
III. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.....	16
3.1 Impacto del uso del rodillo aireador para la siembra de pasto en el proceso hidrológico de una cuenca con lluvia natural y en condiciones de lluvia simulada.....	17
3.2 Predicción hidrológica en tierras áridas con modelos digitales de elevación de alta y baja resolución.....	41

3.3 Modelación hidrológica en zonas áridas en AGWA para una cuenca semi-instrumentada en zonas áridas de México	64
IV. CONCLUSIONES	79
V. LITERATURA CITADA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del balance de agua en una cuenca.	12
Figura 2. Secuencia general para el cómputo de parámetros de la ecuación de balance.	13

DEDICATORIA

Ditze Xhon

Kate uzolüa dzini, küi gokdhe tsí ba nüalé, aga uzálatsa záleno nhede xt kate bayots dzinhi, goljo nha blalenho tzon kil lhene tap lalj gramos, nha yelemban chanha btsan. Ná banezde bixanha chendhe che yelembanha. Lhene yoguelho dha chònen nake nho nake, chakdhe lé nha döte gakde lé. Yichjlatsedaüa, küat gak chuplo dha üak gak gonho nha benen di lí.

Xt dholo yel chakde che bicha Edi Poblano Mauricio.

Ditze Xtil

Comencé este proyecto sin imaginar que estarías acompañándome al final, llegaste con tus tres kilos ochenta gramos y, mi vida cambió. Ahora sé lo que quiero de la vida. Con todo lo que me hace ser quien soy te amo y siempre lo haré. Amor de mi vida, nunca dudes de lo que eres capaz y hazlo realidad.

Con profundo amor para mi hijo Edi Poblano Mauricio

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que fue indispensable para llevar a cabo las actividades académicas durante mi estancia en el posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de doctorado.

Al Dr. Ignacio Sánchez Cohen, que con su acertada dirección, sugerencias y motivación hizo posible la culminación de este trabajo.

A los Dres. Aurelio Pedroza Sandoval y Miguel Agustín Velásquez Valle, por sus sugerencias, experiencia y el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A los Dres. Philip Heilman y David Goodrich, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A las personas de San Luis del Cordero, por el apoyo en la fase de campo de este trabajo y el espacio en sus hogares.

A mis amigas Carolina y Georgina por aportar felicidad, diversión y conocimiento a mi vida. Éxito amigas.

A ti Dios por la paz en mi corazón ¡Gracias!

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

Nació el 12 de enero de 1989 en la comunidad de Guadalupe Grijalva perteneciente al municipio de Frontera Comalapa, Chiapas. Realizó sus estudios de educación básica en la primaria “José Emilio Grajales” y en la telesecundaria No. 110 en la misma comunidad de nacimiento.

En el año 2005 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo para cursar la preparatoria agrícola y una vez concluida ingresa al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola donde termina sus estudios de licenciatura obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola por mérito académico en el año 2012.

Del 2012-2014 cursó la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, en la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el grado Maestra en Ingeniería en 2015.

Durante el año 2015 laboró en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en el área de ingeniería de riego realizando investigación sobre aplicaciones de los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs) y Sistemas de Información Geográfica en la ingeniería hidroagrícola y de Riego.

RESUMEN GENERAL

Modelación hidrológica distribuida en una cuenca semi-instrumentada en zonas áridas Distributed hydrological modeling of a semi-instrumented arid watershed

Mauricio-Pérez Azucelli Maythe¹, Sánchez-Cohen Ignacio², Pedroza-Sandoval Aurelio²

RESUMEN

En México, el 30% de la población depende de los ecosistemas frágiles de las zonas áridas, las cuales están en proceso de degradación del suelo causada principalmente por erosión hídrica. Por lo anterior, son necesario los estudios de la relación precipitación pluvial y el funcionamiento hídrico superficial. La investigación se realizó en la cuenca San Luis del Cordero, que es parte de la Región Hidrológica 36. El objetivo fue contribuir al conocimiento sobre el manejo del suelo y el agua en la cuenca. Se realizó la cuantificación del impacto del uso de Rodillo Aireador (RA) mediante simulador de lluvia y la modelación hidrológica de la cuenca mediante las herramientas de modelado QSWAT y AGWA. Se realizó la instalación de 3 pluviómetros y un aforador en la cuenca, además se emplearon un simulador de lluvia Miller modificado, modelos digitales de alta y baja resolución, mapa de edafología y uso de suelo y datos de precipitación y temperatura del periodo 1979-2014. El uso de RA provocó un retraso en el inicio del escurrimiento, una menor producción de escurrimiento ($4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y una mayor producción de sedimentos (833 mg l^{-1}) en comparación de lo producido en condiciones naturales. Durante la modelación, se obtuvo que la resolución de los DEMs influye de manera significativa en la producción de sedimento, no así en el escurrimiento y la relación sedimento-escurrimiento donde se obtuvo un ajuste de $R^2=0.9$ para todas las resoluciones. El paso del RA permitió la captura de la lluvia en el suelo, esto redujo la escorrentía y aumentó la infiltración de agua en la cuenca. La cuenca es sensible a los cambios en los regímenes de precipitación y la cubierta vegetal. La modelación hidrológica permitió identificar las variaciones de la respuesta hidrológica, las áreas de mayor y menor impacto del escurrimiento y erosión en cuenca.

Palabras clave: Suelo, agua, rodillo aireador, simulador de lluvia, modelación hidrológica, QSWAT, AGWA.

Tesis de Doctorado en Ciencias, RNMAZA Universidad Autónoma Chapingo

¹Tesista

²Director/Co-Director

ABSTRACT

In Mexico, 30% of the population depends on the fragile ecosystems of the arid lands, which are in process of soil degradation caused mainly by water erosion. Therefore, studies of the relationship between rainfall and surface water functioning are necessary. The research was carried out in the San Luis del Cordero watershed, part of Hydrological Region 36. The objective was to contribute to the knowledge about soil and water management in the watershed. The impact of using the Land Imprinter (LI) was quantified using a rainfall simulator and hydrological modeling of the watershed using the QSWAT and AGWA modeling tools was carried out. The installation of 3 pluviometers and a gauge in the watershed was carried out, in addition, a modified Miller rain simulator, high and low-resolution digital models, edaphology and land use map, and precipitation and temperature data for the period 1979-2014 were used. The use of LI caused a delay in the start of runoff, a lower runoff production ($4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and a higher sediment production (833 mg l^{-1}) compared to that produced under natural conditions. During modeling, it was found that the resolution of the DEMs significantly influences sediment production, but not runoff and the sediment-runoff relationship, where an adjustment of $R^2=0.9$ was obtained for all resolutions. The use of the LI allowed the capture of rain in the soil, this reduced runoff and increased water infiltration in the watershed. The watershed is sensitive to changes in precipitation regimes and vegetation cover. The hydrological modeling allowed to identify the variations of the hydrological response, and the areas of greater and lesser impact of runoff and erosion in the watershed.

Keywords: Soil, water, land imprinter, rain simulator, hydrological modeling, QSWAT, AGWA.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

**Doctorado en ciencias en recursos naturales y medio ambiente en zonas
áridas**

Las zonas áridas y semiáridas ocupan el 43% de la superficie terrestre (Medrano, 2012). En México se estima que aproximadamente el 65% de su superficie corresponde a tierras secas (CONAFOR, SEMARNAT & UACH, 2013), distribuida en zonas semiáridas, áridas, subhúmedas secas e hiperáridas en un 34.7%, 18.9%, 10.8% y 0.7% respectivamente (SEMARNAT, 2016). De acuerdo con INEGI (2011), es en estas zonas donde habita el 30% de la población del país, esto hace necesario el estudio de las zonas áridas.

La desertificación en México forma parte de un problema de orden nacional, tal es así que actualmente el 64% de los suelos del país presenta problemas de degradación debido a cambios de uso del suelo, principalmente de actividades forestales a actividades agropecuarias en un 51.3% (SEMARNAT-CP, 2003). En México, los principales tipos de degradación del suelo son: erosión hídrica (37%), erosión eólica (14.9%) y degradación química, siendo la erosión hídrica el proceso más importante de degradación del suelo (Bolaños *et al.*, 2016).

La superficie nacional afectada por erosión hídrica asciende a 66 %, del cual el 6% es erosión fuerte, 24% es moderada, 36% leve y el restante 34% se considera suelo estable (INEGI 2015a; INEGI 2015b). González *et al.* (2006) y Esquivel *et al.* (2015), hacen referencia a la fragilidad de los ecosistemas existentes en las zonas áridas y semiáridas, destacando la importancia de los estudios que consideren la relación entre la precipitación pluvial y el funcionamiento hídrico superficial, la comprensión de los procesos ambientales y edáficos que pueden ayudar a conocer la presión que ejercen los diferentes sistemas productivos.

Aunado a lo anterior, el aumento de la población y el cambio climático ejercen aún más presión sobre los recursos hídricos (Wigginton, 2011). La Comisión Nacional Forestal (2007) y Esquivel *et al.* (2015) menciona que el estudio de cuencas hidrológicas permite entender como es la interacción del hombre con el medio ambiente.

Se reporta la existencia de estudios que demuestran que el equilibrio hídrico de las cuencas puede ser alterado por factores como el clima, la geología, la hidrografía, la topografía y el tipo de suelo y vegetación (Pereira *et al.*, 2014; Alvez *et al.*, 2017). Todo lo que sucede dentro de los límites de la cuenca es relevante ya que la disponibilidad, calidad y permanencia de sus recursos naturales dependen del uso y manejo que se les brinde dentro de ella.

El hecho de tomar a la cuenca hidrológica como una unidad fundamental de planeación y acción en estudios de geomorfología, fisiografía y procesos erosivos, obedece a que cualquier cadena productiva se da en ese entorno, apoyándose de los recursos naturales (Ávalos & López, 2008; Benavides *et al.*, 2009). La cuenca tiene como principal entrada la precipitación y como salidas el caudal, la evapotranspiración, el flujo subsuperficial y la percolación que son importantes en la relación de flujo base y en la implementación de modelos de simulación (Fattorelli & Fernández, 2011).

Para la predicción de flujos de agua en una cuenca es necesario el uso de modelos, los cuales deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales climáticas, topográficas, de suelos y cobertura vegetal (Ocampo & Vélez, 2014). Los modelos empleados en el estudio de las cuencas hidrológicas pueden ser mediante métodos cuantitativos y cualitativos (Esquivel *et al.*, 2015).

El uso de modelos numéricos comenzó mucho tiempo atrás con la difusión de los ordenadores portátiles, su introducción en hidrogeología puede considerarse que comienza con el seminario de la UNESCO en Urbana (Cruces & Martínez, 2006). Estos modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de

generación de la escorrentía superficial y la recarga a los acuíferos subterráneos a partir de la precipitación y la evapotranspiración (Ocampo & Vélez, 2014).

La modelación hidrológica es la evaluación del escurrimiento por métodos indirectos basados en las características físicas de la cuenca para determinar la tasa y tipo de ocurrencia de los procesos hidrológicos (Trucios *et al.*, 2007). Los modelos hidrológicos integrados con Sistemas de Información Geográfica (SIG) simulan la hidrología de una cuenca en forma detallada y dan acceso a bases de datos que producen resultados de fácil interpretación y uso (Fattorelli & Fernández, 2011).

Los modelos hidrológicos pueden ser agregados y distribuidos. Los modelos agregados promedian las variaciones de las propiedades de las subcuencas y se recomienda para un bajo número de subcuencas; mientras que los modelos distribuidos permiten el análisis de distintos elementos que influyen en la respuesta hidrológica como la vegetación y el uso del suelo, además, permiten obtener de forma simultánea los caudales en diferentes puntos de la cuenca (Méndez *et al.*, 2014).

De tal modo que los modelos hidrológicos son una herramienta de gran utilidad en la gestión y manejo de los recursos hídricos, en la valoración de impactos ambientales, así como en la protección y planificación frente a eventos extraordinarios de lluvia que son causantes de inundaciones que muchas veces conllevan importantes pérdidas económicas y el deterioro de las zonas ribereñas de los cauces (Loizu *et al.*, 2015).

En la actualidad los modelos hidrológicos son usados en la práctica internacional a razón de que han evolucionado las metodologías de investigación hidrológica, haciendo posible la solución de problemas de inundaciones relacionadas con el cambio climático, y, además, realizan pronósticos y modelado de escenarios futuros (Estrada & Pacheco, 2012).

En el caso particular del modelo SWAT, este constituye una herramienta valiosa para estudiar el impacto de cambios climáticos, uso de tierras, como también el impacto de cambios en prácticas de manejo y uso de fertilizantes y agroquímicos sobre la calidad y cantidad de fuentes de agua, en cuencas agrícolas (Feler *et al.*, 2014).

La modelación de procesos hidrológicos es clave en la toma de decisiones para manejo sustentable de las cuencas hidrológicas mediante el planteamiento de escenarios futuros teniendo como variables de respuesta la erosión del suelo y el escurrimiento. La presente investigación pretende contribuir al conocimiento sobre el mejor manejo del suelo y el agua en la cuenca hidrológica media del Nazas-Aguanaval de Coahuila y Durango situada en San Luis del Cordero del Estado de Durango, México.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

II. REVISIÓN DE LITERATURA

**Doctorado en ciencias en recursos naturales y medio ambiente en zonas
áridas**

3.1 Cuenca hidrográfica

Desde el punto de vista de su funcionamiento, una cuenca hidrográfica puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo, la cobertura vegetal y uso del suelo (Gaspari et al, 2009). Gaspari et al. (2009; Gómez et al., 2017) menciona que hidrológicamente, la cuenca funciona como un colector que recibe la precipitación y convierte, parte de ésta, dependiendo de sus condiciones climáticas y de las características físicas particulares en escurrimiento. Hott y colaboradores (2007) definen a la cuenca hidrográfica como unidad territorial ideal para el planeamiento integrado del manejo de los recursos naturales.

Por otro lado, Aglanu (2014) describe a la cuenca como una unidad hidrológica básica, donde el agua del exterior no puede ingresar a la cuenca y la de dentro la deja en un punto bien definido, por lo tanto, las cuencas son unidades naturales efectivas para analizar aspectos físicos, químicos y biológicos esenciales. Otro tipo de estudios que se pueden hacer en la cuenca son geomorfología, fisiografía y procesos erosivos (Benavides et al., 2009).

Algunos de los elementos de esta entidad hidrológica son el agua de lluvia, el escurrimiento, el deshielo y el agua subterránea, las características del ecosistema (clima, tipo de suelo y vegetación) y la influencia humana (uso del suelo) afectan la calidad y cantidad de agua dentro de la cuenca, por lo que la gestión de una cuenca incluye análisis, protección, reparación, utilización y mantenimiento para un control y conservación óptimos del agua (Aglanu, 2014).

Garrido et al. (2010) reconocen, en función de la dinámica hidrológica de una cuenca, tres zonas funcionales:

1. La zona de captación, de cabecera o cuenca alta. Son áreas aledañas a la divisoria de aguas o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. En esta zona se forman los primeros escurrimientos (arroyos) luego que los suelos han absorbido y retenido toda el agua según su capacidad.
2. La zona de almacenamiento, de transición o cuenca media. Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales constituyen aportando diferentes caudales cuyas concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica diferirán en función de las actividades que se realizan en cada subcuenca; es un área de transporte y erosión.
3. La zona de descarga, de emisión o cuenca baja. Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. Se caracteriza por ser una zona de importantes ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros (ver de esta misma colección Los humedales de México. Oportunidades para la sociedad), además de muy productiva para el uso agrícola y donde se acumulan los impactos de toda la cuenca.

Las cuencas hidrográficas son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socioecológicos están íntimamente ligados entre sí. En ellas, el manejo se entiende como un proceso de planeación, implementación y evaluación de acciones mediante la participación organizada e informada de la población (López & Patrón, 2013).

3.2 Modelación hidrológica

En la actualidad, uno de los más importantes retos para la ingeniería yace en modelar el comportamiento futuro de fenómenos hidrometeorológicos extremos, cuando al parecer la información del pasado ya no es suficiente frente a los cambios que se observan (Sedano, 2017).

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de obras hidráulicas y hasta mediados del siglo XX se limitó a expresiones matemáticas simples para representar mecanismos individuales involucrados en los procesos del ciclo hidrológico (Jorquera et al., 2012).

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas, el uso de esta herramienta se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones (Estrada & Pacheco, 2012).

Xu & Singh, 2004, (Ocampo & Vélez, 2014) manifiestan que la predicción de flujos de agua en una cuenca requiere el uso de modelos, los cuales deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal). Los modelos hidrológicos buscan capturar los mecanismos físicos de generación de la escorrentía superficial y la recarga a los acuíferos subterráneos a partir de la precipitación y la evapotranspiración.

La selección objetiva del modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas hidrográficas (Clark et al., 2008). Para un análisis de caso en particular, el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores que determinan la selección (Xu & Singh, 2004).

Una disponibilidad mayor de datos distribuidos provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de la modelación hidrológica (Jorquera et al., 2012).

Los SIG y la hidrología se basan en principios fundamentales muy diferentes; sin embargo, existe un vínculo entre los dos. Los SIG describen el medio ambiente, mientras la hidrología describe cómo el ambiente afecta el flujo de agua del ciclo hidrológico. Un objetivo fundamental en la hidrología espacial es el uso de los

datos espaciales y funciones de los SIG, a fin de ayudar a generar nuevas ideas y estrategias para solucionar problemas dentro de la hidrología (Caciano et al., 2007).

Rankinen y colaboradores (2006; Zambrano, 2010) afirman que la reciente y creciente mejora de los recursos computacionales ha hecho factible el desarrollo y aplicación de complejos modelos numéricos, espacialmente distribuidos, para evaluar diversos procesos a varias escalas incluyendo la de cuenca hidrográfica.

3.3 Modelos hidrológicos distribuidos

Los modelos hidrológicos distribuidos han sido ampliamente desarrollados en las dos últimas décadas, en cambio, los datos meteorológicos siguen siendo una limitante por insuficiencia de estaciones de medición. La precipitación es la entrada principal de un modelo hidrológico, por ello la distribución espacial de la precipitación representa la variable principal de estudios sobre hidrología, climatología y agricultura (Vilchis et al., 2015).

Dentro de los modelos distribuidos, los parámetros poseen un inherente sentido físico, representan el centro de investigación de la modelación hidrológica, en el tanto en que estos modelos son menos dependientes de procesos de calibración, lo cual los hace particularmente útiles en cuencas no instrumentadas. Además, la interpretación de los parámetros físicos arroja una idea clara del comportamiento hidrológico de una cuenca (Maneta et al., 2007).

Domínguez (2010; Sánchez, 2017) plantea que, para escoger el mejor conjunto de modelos a utilizar, lo primero que se debe definir es el objetivo de la modelación, con esto se establece que tipo de modelo es el más apropiado, con cual precisión se requiere trabajar. Posteriormente se deberá definir la información existente y la complejidad de los procesos a modelar, cuales se modelan, cuales se consideran en su totalidad o pueden simplificarse en gran medida. Finalmente queda definir si se va a utilizar un modelo ya programado previamente o si por el contrario es necesario desarrollar un código propio.

Actualmente existen varios modelos hidrológicos, el que se empleara para el desarrollo de esta investigación es el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT, Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua en español). A continuación, se presenta una breve descripción de dicho modelo para tener una mejor comprensión de su funcionamiento.

3.4 Modelo SWAT

Algunos modelos de simulación hidrológica para el estudio de erosión hídrica, es SWAT, SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo. SWAT es un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado.

El SWAT requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y uso de suelo que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc., son modelados directamente por SWAT (Uribe, 2010). SWAT requiere como dato de entrada la intensidad de lluvia máxima mensual en 30 minutos, este dato se obtiene preferentemente a partir de pluviógrafos o de una estación meteorológica automática (Ramírez et al., 2015).

Neitsch, Arnold, Kiniry & Williams (2011; Sánchez et al., 2017) plantean que, para la modelación, SWAT divide a la cuenca en subcuencas y estas a su vez en unidades de respuesta hidrológica (URH) definidas como áreas homogéneas de acuerdo al tipo de suelo, cobertura vegetal y pendiente del terreno, establecidas por el usuario.

Además, Neitsch y colaboradores (2011; Sánchez et al., 2017) mencionan que la escorrentía es predicha separadamente para cada URH y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua. Sin embargo, el nivel de detalle para la

definición de las URH no es claro y puede conducir a una pérdida considerable de información sobre el paisaje, ya que existe un efecto significativo del tamaño de las URH en simulaciones de sedimentos y carga de nutrientes (Her et al., 2015).

El modelo SWAT resuelve la ecuación de balance para la cuenca bajo estudio como lo señala la Ecuación 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial de humedad en el suelo R_{day} es la precipitación en un día determinado, E_a es la evapotranspiración en el intervalo de tiempo considerado, w_{seep} es la cantidad de agua en la zona vadosa, Q_{surf} es el escurrimiento superficial en el mismo intervalo y Q_{gw} es la cantidad del flujo de retorno.

La representación esquemática a la que aplica la ecuación 1 se puntualiza en la Figura 1. La Figura 2 señala la secuencia de los procesos en general utilizados por el modelo SWAT para modelar el componente superficial del ciclo hidrológico.

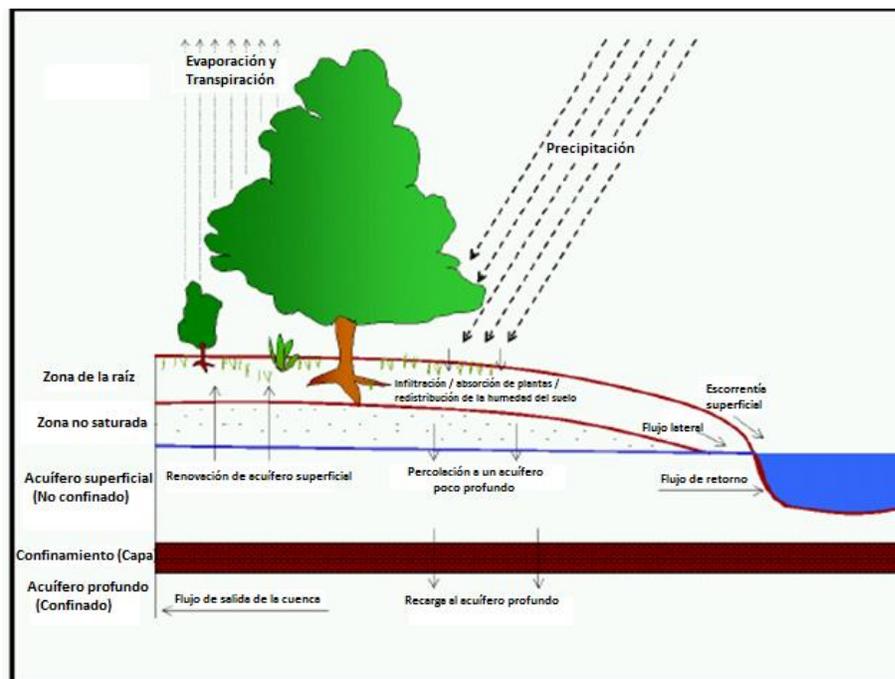


Figura 1. Representación del balance de agua en una cuenca.

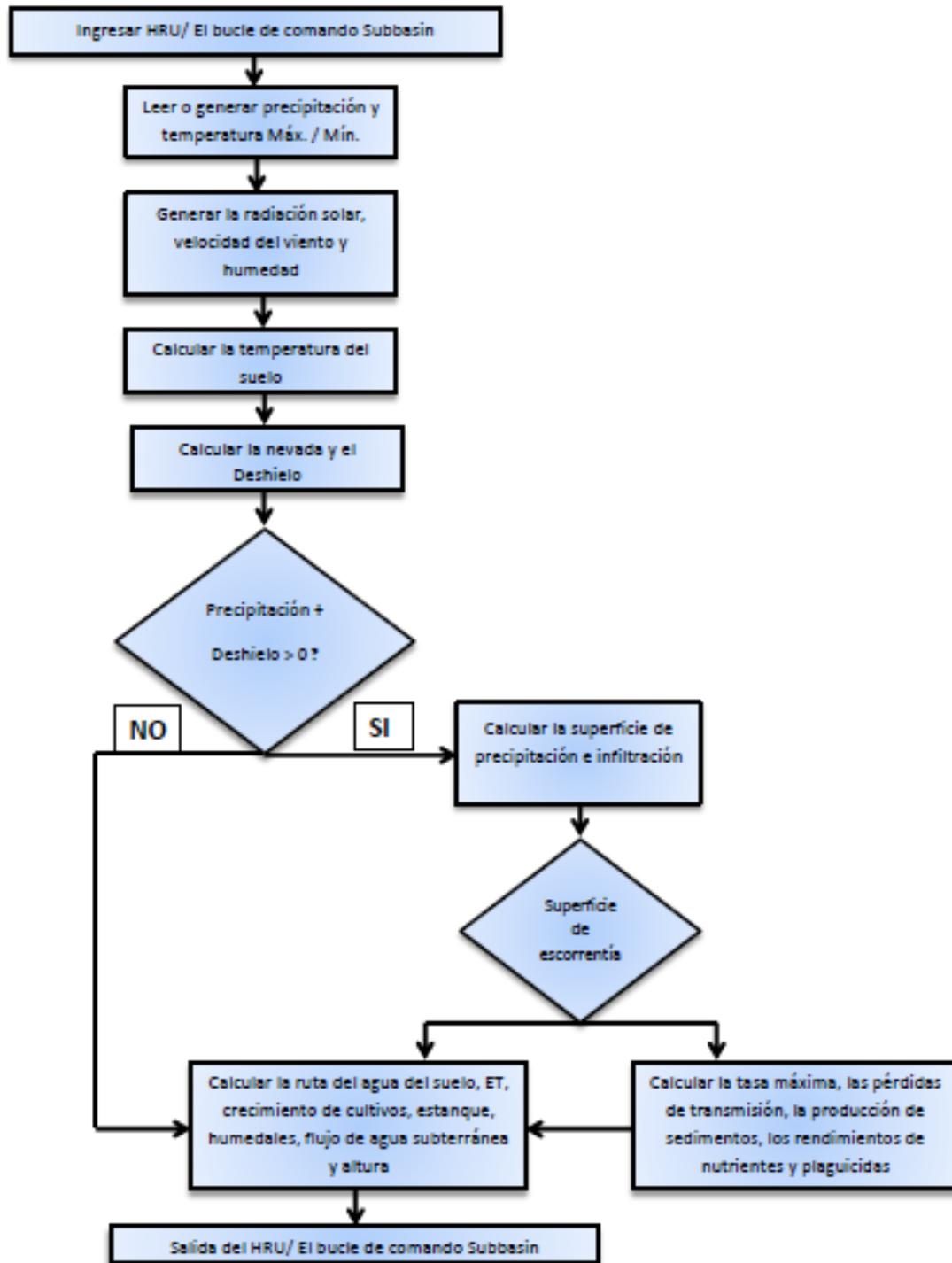


Figura 2. Secuencia general para el cómputo de parámetros de la ecuación de balance.

El modelo calcula los parámetros de la ecuación del balance en cada sub cuenca o HRU para posteriormente mostrar en forma aditiva los resultados. Este apartado es de suma importancia para conocer la sensibilidad de la cuenca a los cambios en el uso del suelo en términos de las variables respuesta erosión y escurrimiento.

Actualmente el modelo SWAT es usado internacionalmente para diversos fines, un trabajo que se han hecho con este modelo es la investigación de Khalid y colaboradores (2016), ellos realizaron una investigación de la aplicación del modelo hidrológico SWAT en Malasia teniendo como resultado una visión general de la aplicación de modelos hidrológicos en dicho sitio, destacando la aplicación del modelo SWAT en términos de rendimiento del modelo y cobertura de varias cuencas fluviales.

Zettam (2017) evaluó la contribución de la cuenca del río Tafna en Argelia a las aguas superficiales y el impacto en el almacenamiento de agua y sedimentos, el modelo hidrológico tuvo un buen ajuste a los datos observados (Nash entre 0.42 y 0.75 y R^2 entre 0.25 y 0.84); además se encontró que una gran proporción del agua superficial provino de escorrentía superficial (59%) y flujo lateral (40%), mientras que la contribución del agua subterránea fue insignificante (1%).

En el estudio realizado por Fadil et al. (2011) sobre modelización hidrológica de la cuenca Bouregreg (Marruecos) usando la interfaz de ArcSWAT, indica que el modelo SWAT tuvo un buen rendimiento tanto para los períodos de calibración como de validación en la Cuenca. De hecho, el modelo mostró una buena correlación entre la descarga promedio mensual observada y simulada del río con coeficiente de R^2 y Nash de aproximadamente 0.8. Los componentes del balance hídrico se calcularon correctamente, estos resultados revelaron que, si se calibra adecuadamente, el modelo SWAT se puede usarse de manera eficiente en regiones semiáridas para respaldar las políticas de gestión del agua.

3.5 Calibración y validación de modelos hidrológicos

La calibración es la estimación de los parámetros del modelo, mediante la comparación de las predicciones para un conjunto determinado de condiciones, con los datos observados (Moriasi et al., 2007). La calibración busca mejorar el ajuste entre las observaciones y las simulaciones de la variable de salida de interés, al variar reiterativamente los parámetros del modelo (Ocampo & Vélez, 2014). El ajuste del modelo dependerá en gran medida de la calidad de los datos disponibles.

Con una calibración adecuada, los modelos distribuidos permiten estimar el cambio en la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación extrema (Méndez et al., 2014). Por otro lado, la validación de modelos hidrológicos es un proceso complicado de análisis y toma de decisiones (Alcántara, 2014). La validación de los modelos del proceso de lluvia–escorrentía está fundamentada en el estudio de los parámetros característicos de una cuenca, para fijar un rango específico de los mismos y mediante estos estimar crecidas periódicas con el fin de prevenir de esta manera a los habitantes de una determinada comunidad (Vega et al., 2015).

Arnold y colaboradores (2012) proponen como primer paso dentro de la calibración y validación del modelo SWAT determinar la sensibilidad de los parámetros a calibrar. En el caso del modelo SWAT este ha sido calibrado y validado en investigaciones como el desarrollado por Feler et al (2014) para la cuenca del Rio Quequén Grande (935.5 has) en el sudeste bonaerense, SWAT fue calibrado y validado para escorrentía superficial teniendo como resultado una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.37 y predijo un cambio significativo en los caudales que aumentaron de $16.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, durante el periodo calibración, a $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en el periodo de validación.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

III. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

**Doctorado en ciencias en recursos naturales y medio ambiente en zonas
áridas**

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

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

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

Azucelli Maythe Mauricio Pérez¹; Ignacio Sánchez Cohen^{2*}, Aurelio Pedroza Sandoval¹, Miguel Agustín Velásquez Valle³

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Km. 40 Carretera Gómez Palacio-Chihuahua, Bermejillo, Durango, México. C.P. 35230.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. C.P. 35140.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigaciones Noreste. Carretera Saltillo-Zacatecas km 8.5, col. Hacienda, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C. P. 25315.

Resumen

La investigación se realizó en la Región Hidrológica 36 (Ríos Nazas-Aguanaval), zona árida del norte de México. En 2017, parte de la cuenca fue alterada durante el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) con Rodillo Aireador (RA). El objetivo de esta investigación fue proponer un marco metodológico para integrar y analizar la información experimental de una cuenca de zonas áridas. El impacto del RA se cuantificó mediante el uso de simulador de lluvia *in situ* en el área de la cuenca. Los resultados indican que el uso de RA provoca un retraso en el inicio del escurrimiento. De igual manera, la producción de escurrimiento fue menor en la parcela donde se usó el RA, con una producción media de $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que la producción media de escurrimiento en las parcelas bajo condiciones naturales (testigo) fue de $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Adicionalmente, la producción de sedimentos en la parcela con paso de RA fue significativamente mayor en la producción de sedimentos con un valor medio de 833 mg l^{-1} , en tanto que la parcela experimental bajo condiciones naturales, la producción media de sedimentos fue de 470 mg l^{-1} . Se infiere que las micro depresiones causadas por el RA capturaron el agua de lluvia ejerciendo una mayor retención del líquido en el suelo, lo

cual redujo la escorrentía y aumentó la infiltración de agua en la cuenca. Los hallazgos muestran que, debido al tamaño, la cuenca (158.87 ha) es muy sensible a los cambios en los regímenes de precipitación y la cubierta vegetal.

Palabras clave: Cobertura vegetal, rodillo aireador, micro depresiones, simulador de lluvia, escurrimiento, sedimentos.

Abstract

The research was carried out in Hydrological Region 36 (Nazas-Aguanaval Rivers), arid land in northern Mexico. In 2017, part of the watershed was altered during the establishment of buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) with the Aerator Roller (AR). The objective of this research was to propose a methodological framework to integrate and analyze the experimental information of a watershed in arid lands. The impact of the AR was measured by using an in situ rainfall simulator in the watershed area. As a result, the use of AR caused a delay in the onset of runoff. The production of runoff was lower in the plot under conditions of passage in the soil of the AR, with an average production of $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, while the average production of runoff in the plots under natural conditions (control) was $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Additionally, the production of sediments in the plot with AR passage was significantly higher in the production of sediments with an average value of 833 mg l^{-1} , while in the experimental plot under natural conditions, the average production of sediments was 470 mg l^{-1} . It is inferred that the microdepressions captured the rainwater exerting greater retention of the liquid in the soil, which reduced the runoff and increased the infiltration of water in the watershed. The results show that, due to its size, the watershed (158.87 ha) is very sensitive to changes in precipitation regimes and vegetation cover.

Keywords: Vegetation cover, aerator roller, micro depressions, rainfall simulator, runoff, sediments.

1. Introducción

En México, los principales tipos de degradación del suelo son la erosión hídrica, eólica y química, siendo la erosión hídrica la más importante (Bolaños *et al.*, 2016). Algunos problemas de degradación del suelo son la pérdida de estructura del suelo, disminución de materia orgánica y nutrientes del suelo, reducción de la disponibilidad de agua en el suelo, y también aumento de sedimentos en la red de drenaje de las cuencas

hidrográficas que reducen la capacidad de transporte y calidad del agua (Ffolliot *et al.*, 2013).

Las zonas áridas y semiáridas son ecosistemas frágiles donde se incrementa la necesidad de estudios sobre el funcionamiento de las aguas pluviales y superficiales en relación a la presión que ejercen los diferentes sistemas productivos (Esquivel *et al.*, 2015). La fragilidad de estos ecosistemas tiene su origen de la escasa y errática precipitación pluvial, baja cobertura vegetal, altos índices de erosión del suelo y baja diversidad biológica, entre otros (FAO, 2021). El impacto en la degradación de los recursos naturales de estas regiones de alta vulnerabilidad, se ha agudizado debido a la explotación intensiva de estos recursos por cuestiones antrópicas y naturales, estas últimas derivadas del impacto ambiental por efecto del cambio climático (Forero *et al.*, 2017). Lo anterior, hace necesario la aplicación sistemática de estrategias de planeación, uso y manejo integral de los recursos naturales con visión de cuenca hidrológica, como unidad de estudio (Cloter *et al.*, 2013).

La importancia de la caracterización de la cuenca radica en que el balance hídrico de la cuenca puede verse alterado por factores como el clima, la geología, la hidrografía, la topografía, el tipo de suelo y vegetación y las actividades agrícolas (Pereira *et al.*, 2014; Alvez *et al.*, 2017).

A partir de la caracterización de cuencas hidrográficas y el análisis de la información, Sánchez y colaboradores (2015) demostraron que la estimación cuantitativa del balance hídrico debe desarrollarse en cuencas hidrográficas experimentales donde se puedan controlar variables "modificables". Por otro lado, un método para revertir la degradación de suelo es mediante la reducción del escurrimiento del agua y la mejora en la infiltración del agua en el suelo, esto es posible con el aumento de la cubierta vegetal de la superficie del suelo (Sastre *et al.*, 2016).

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

En áreas de pastizal, una de las maneras de cómo se puede alterar el balance hidrológico es a través de la manipulación de la vegetación nativa. En la actualidad, con el propósito de incrementar la disponibilidad de forraje en las zonas semiáridas y áridas se ha considerado el uso del rodillo aireador para el establecimiento de zacates y la rehabilitación de los pastizales deteriorados (Berlanga *et al.*, 2009). El objetivo de este estudio es proponer un marco metodológico para integrar y analizar la

información experimental de una cuenca de zonas áridas, referente al impacto del manejo de sus recursos naturales sobre la respuesta hidrológica y la producción de sedimentos.

2. Materiales y métodos

2.1 Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio es una cuenca experimental dentro del municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango, en México. Se ubica en la Región Hidrológica 36 (Ríos Nazas-Aguanaval) entre las coordenadas 25°15'00" a 25°31'00" de latitud norte y 104° 07'00" a 104°33'00" de longitud oeste, a una altura de 1508 msnm (Esquivel *et al.*, 2015; Yáñez *et al.* 2018).

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

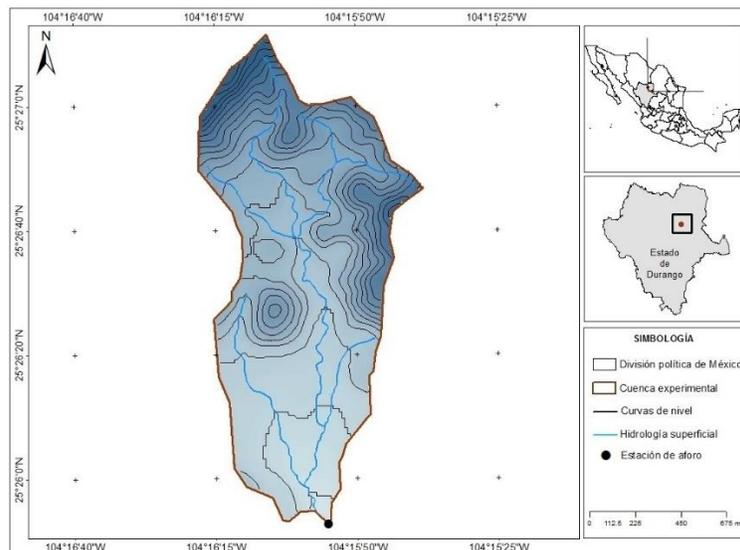


Figura 1. Cuenca experimental San Luis del Cordero en la región hidrológica No36 en el estado de Durango.

El clima predominante es de semiseco a semicálido seco, con altitudes que oscilan entre 1300 y 1900 msnm con una precipitación media anual

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

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

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



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

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

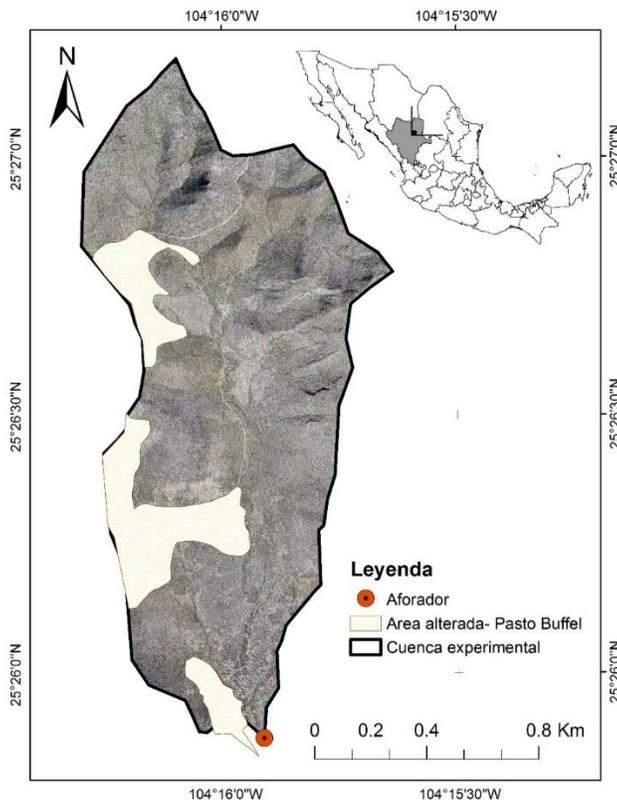


Figura 3. Superficie sembrada con pasto buffel en la Cuenca San Luis del Cordero.

2.2 Descripción de los procesos hidrológicos en la cuenca

2.2.1 Precipitación pluvial

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



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

2.2.2 Escurrimiento superficial

Las mediciones de escurrimiento en el sitio de estudio se iniciaron en 2017, utilizando un aforador rectangular con una sección hidráulica y una relación altura-volumen conocida (Figura 5). El aforador tiene un ancho de 1.76 m, una longitud de 4.8 m, una altura de 1 m y una pendiente de 0.20%, este fue diseñado para forzar el tránsito del escurrimiento a través de una estructura de geometría conocida que facilita el monitoreo del tirante hidráulico y la conversión del escurrimiento (Q , en m^3s^{-1}). La estación de aforo se ubicó en la parte baja de la cuenca experimental.



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

Las lecturas de la altura del flujo se realizaron utilizando una escala pintada en la pared del aforador con precisión de un centímetro. Las mediciones de la altura del flujo se registraron cada minuto al comienzo del escurrimiento, luego cada 5 minutos. Una vez que se obtuvieron tres lecturas consecutivas similares, se asumía que el hidrograma había alcanzado el punto de estabilización y las lecturas de la altura del flujo se registraron cada 5 minutos hasta el final del evento de escorrentía. Para la conversión de la altura del flujo a escurrimiento se usó la siguiente ecuación lineal (Pedroza, Ortiz & Martínez, 2007):

$$Q = A.V \quad (1)$$

Donde A es el área de la sección hidráulica (m^2) y V (ms^{-1}) es la velocidad del flujo. Además, se empleó la ecuación de Chezy-Manning (French, 1988). Hidráulica de canales abiertos) para el cálculo de la velocidad del flujo.

$$V = \left(\frac{1}{n}\right)r^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional; r es el radio hidráulico, la relación entre el área y el perímetro mojado (m); S es la pendiente longitudinal del cauce, adimensional.

Algunas consideraciones para la obtención del escurrimiento fueron, un flujo uniforme, el valor de n en 0.025 que corresponde a un canal revestido con cemento en buen estado y una sección hidráulica rectangular. Con lo anterior se obtuvo la ecuación que describe la curva de calibración del canal como se muestra a continuación:

$$Q = 1.5855 h^2 + 3.2901h - 0.1486 \quad (3)$$

Donde Q es el caudal (m^3s^{-1}) y h es la altura del flujo en el canal (m). Posteriormente, las lecturas se correlacionaron con la curva de calibración del canal para calcular la tasa de escurrimiento (Figura 6).

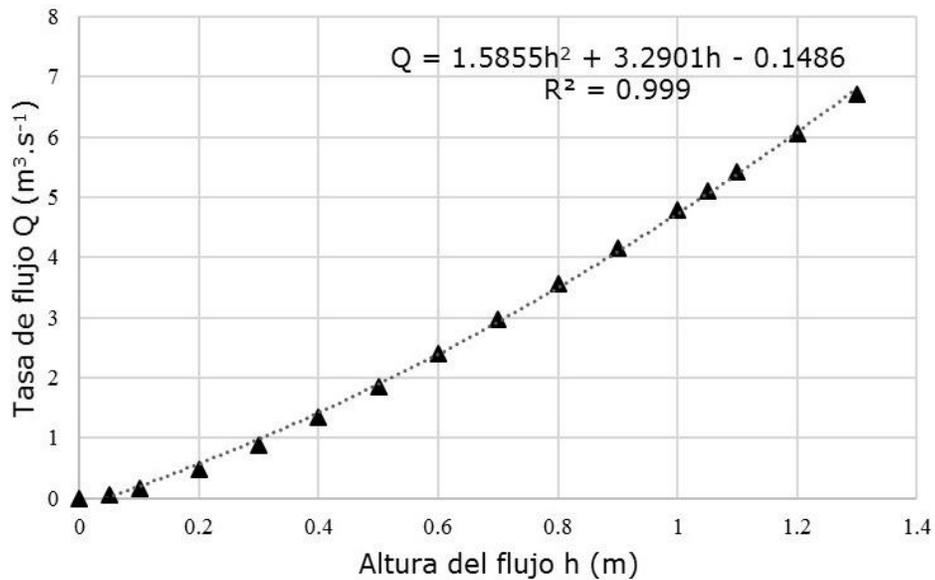


Figura 6. Relación entre la altura del tirante hidráulico y la tasa de flujo en la sección de aforo de la corriente principal de la cuenca.

Se tomó una muestra de un litro de escorrentía en cada lectura para estimar la carga de sedimentos de cada evento de escorrentía. La información hidrológica presentada corresponde al año 2017, en el cual se registraron 3 eventos de lluvia en la cuenca, el primero el 4 de agosto, el segundo el 17 de agosto por la mañana y el tercero el 17 de agosto por la tarde.

2.2.3 Simulación de lluvia en la cuenca

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



Figura 7. Simulador de lluvia en la cuenca.

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

Las parcelas experimentales fueron de 1 m de ancho por 3 de largo, cada parcela con una caja para recolectar la escorrentía. Antes de iniciar la simulación de lluvia, cada parcela fue etiquetada, se midió el microrelieve de la capa superficial del suelo, se caracterizó la cobertura del suelo y se midió la temperatura tanto del ambiente como del suelo dentro de la parcela (Figura 8).



Figura 8. Caracterización de parcelas experimentales.

Una vez iniciado el escurrimiento, se cuantificó el volumen escurrido cada minuto y posteriormente cada 2 minutos y en función de la disponibilidad de volumen escurrido se tomaron muestras de un litro para determinar la concentración y cantidad de sedimentos (Figura 9).



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

3. Resultados

3.1 Cuenca experimental

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

La relación precipitación-escorrentía de la cuenca, se observa en la Figura 10, donde se puede apreciar un cambio en el comportamiento de la escorrentía. Para 2016, donde la cuenca tiene sus condiciones naturales, el escurrimiento da inicio con una precipitación de 9 mm, mientras que para 2017, el escurrimiento da inicio con 6 mm de precipitación. Además, en condiciones naturales una precipitación de 10 mm produjo una escorrentía de 0.99 mm mientras que para 2017 una precipitación de 10 mm produjo un escurrimiento de 0.1 mm.

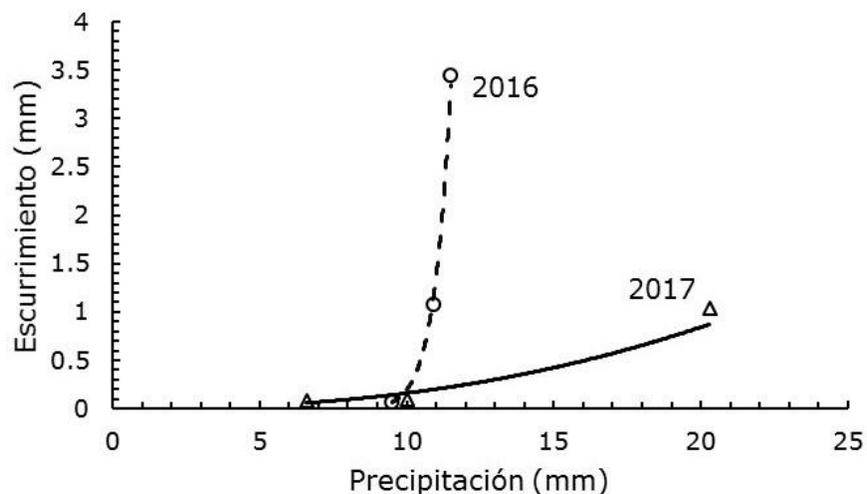


Figura 10. Relaciones precipitación-escorrentía del año 2016 (sin rodillo aireador) y 2017 (con rodillo aireador).

De lo anterior, se puede asentar que, el uso del rodillo produjo un adelanto en el inicio de la escorrentía, pero, por otro lado, la escorrentía en la cuenca después del uso del rodillo disminuyó. La Figura 11 muestra los resultados de la concentración de sólidos en suspensión y el hidrograma de tres eventos de escorrentía ocurridos durante el año 2017; el evento de mayor precipitación corresponde al 17 de agosto por la tarde. Este evento duró 1 hora y 26 minutos, mientras que los eventos del 4 y 17 de agosto por la mañana tuvieron una duración aproximada de 1 hora.

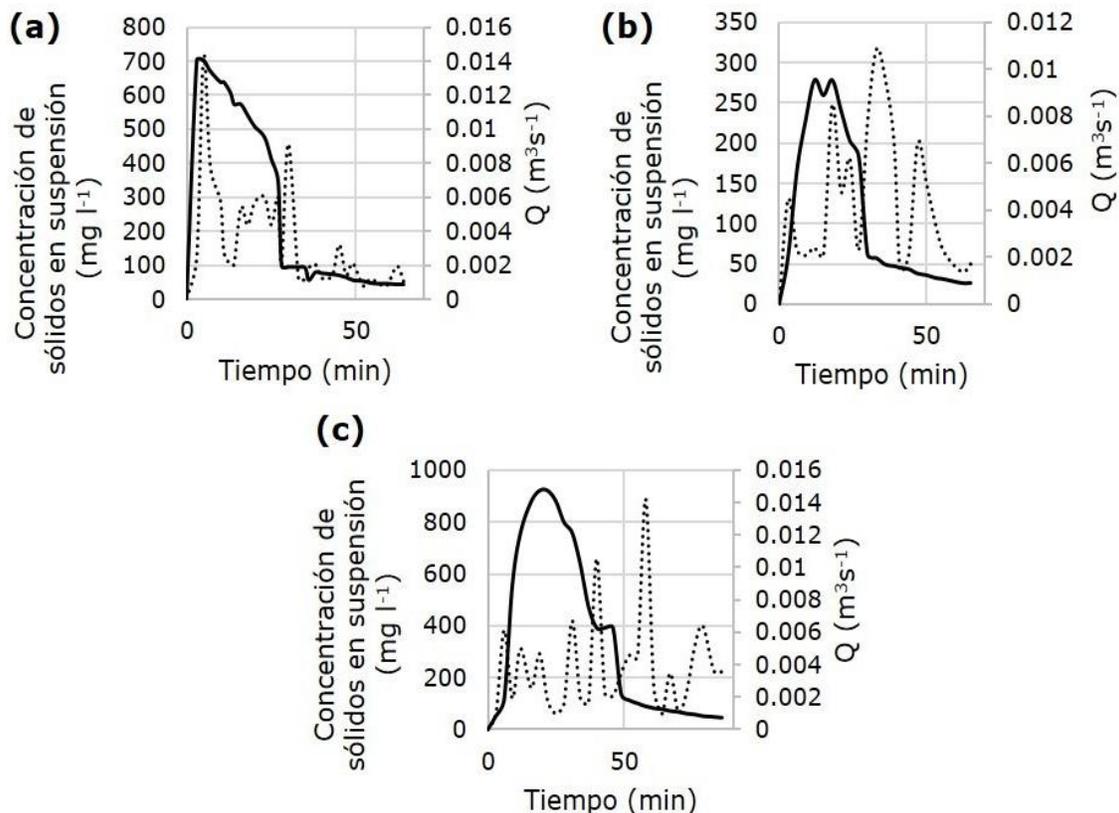


Figura 11. Concentración de sólidos en suspensión (línea punteada) e hidrograma (línea continua) durante 3 eventos de 2017, a) 04 de agosto, b) 17 de agosto por la mañana y c) 17 de agosto por la tarde.

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

3.2 Simulación de lluvia

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

las parcelas con el uso del rodillo (2.028 %); principalmente en la repetición 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de las parcelas: R1, R2 (Número de repetición), N (Condición natural), R(Rodillo).

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

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

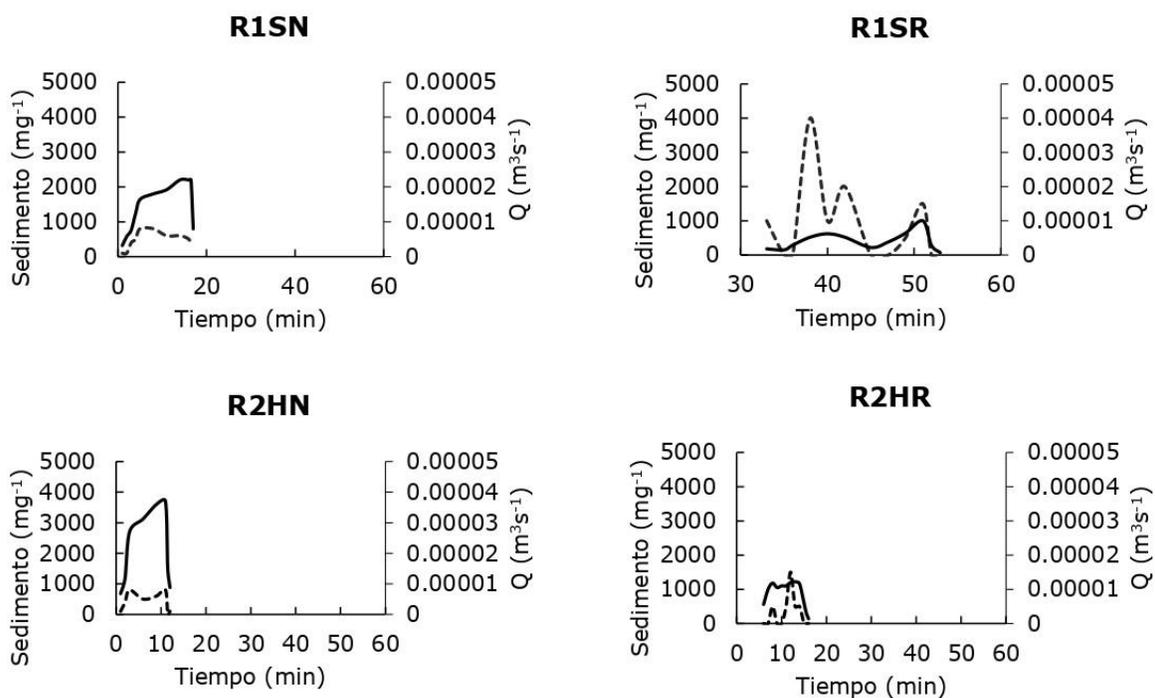


Figura 12. Sedigramas (línea punteada) e hidrogramas (línea continua) durante la simulación de lluvia con suelo seco (R1SN y R1SR) y con suelo húmedo (R2HN y R2HR).

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

Para la condición de suelo seco, la esorrentía en la parcela experimental R1SN comenzó 3 minutos después del inicio de la lluvia, mientras que el inicio de la esorrentía en la parcela R1SR fue 33 minutos después del inicio de la lluvia. Por otro lado, el gasto del escurrimiento para R1SR fue menor, con una producción media de $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el gasto medio del escurrimiento en la parcela R1SN fue de $1.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

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

Para la condición de suelo húmedo, el escurrimiento ocurrió 4 minutos antes en las parcelas sin efecto del rodillo aireador; el gasto del escurrimiento para R1HR fue menor, con un gasto medio de $8.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el gasto medio de escurrimiento en la parcela R1HN fue de $2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Respecto a la producción media de sedimentos, para R1HR y R1HN fue de 291.6 y 412.5 mg l^{-1} respectivamente.

A continuación, en la Tabla 2, se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante la simulación de lluvia, que, como se comentó previamente, los efectos del uso del rodillo aireador fueron en el tiempo de inicio del escurrimiento y en la producción de sedimentos. Sobre el tiempo en que se alcanzó la producción máxima de escurrimiento, existe una diferencia de hasta 38 minutos para R1SR respecto al resto de los tratamientos. Hay un efecto de retraso en la producción máxima del escurrimiento para suelo seco, no así en suelo húmedo.

Tabla 2. Resumen de los resultados de la simulación de lluvia.

	Tiempo- inicio del escurrimiento (min)	Tiempo- escurrimiento máximo (min)	Volumen del escurrimiento ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Escurrimiento máximo ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Producción de sedimento (mg l^{-1})
R1SN	2	14	1.6×10^{-4}	2.2×10^{-5}	4700
R2HN	2	13	1.7×10^{-4}	3.7×10^{-5}	3300
Media	2	13.5	1.6×10^{-4}	2.9×10^{-5}	4000
R1SR	33	51	4.8×10^{-5}	1×10^{-5}	10000
R2HR	6	13	1×10^{-4}	1.2×10^{-5}	3500
Media	19.5	32	7.7×10^{-5}	1.1×10^{-5}	6750
Diferencia de medias	17.5	18.5	8.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}	2750

4. Discusión

4.1 Cuenca experimental

El objetivo de utilizar el rodillo es rehabilitar suelos donde hay escasa vegetación y evitar procesos de degradación del sitio. En el área de estudio, se utilizó el rodillo para incrementar la producción de forrajes, ignorando los efectos potenciales de la remoción de vegetación natural que impacta en el hábitat de la micro fauna, así como en las características físicas y biológicas del suelo.

El cambio de cobertura vegetal, la formación de micro depresiones y mantillo, realizado en 24 ha de la cuenca por el paso del rodillo, modificó la hidrología de la cuenca. El mantillo evitó que las gotas de lluvia cayeran directamente sobre la superficie del suelo y retrasó el inicio del escurrimiento, favoreciendo así la infiltración del agua a la cuenca, lo anterior, concuerda con los resultados de Bienes, García y Cuevas (2016), la cobertura vegetal reduce la pérdida de suelo por erosión hídrica, también mejora la infiltración del agua en el suelo y reduce la velocidad de escorrentía.

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

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

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

Dentro de la cuenca hay áreas que deben ser identificadas y monitoreadas más a fondo, como son las áreas de recarga, con el fin de mantener un equilibrio en el ciclo hidrológico y lograr un mejor manejo del recurso hídrico. Por otro lado, los resultados obtenidos en esta investigación solo reflejan el efecto inicial del uso del rodillo, una vez que crezca el pasto buffel sembrado y se establezca un nuevo manejo de la cuenca (carga animal), la hidrología de la cuenca puede cambiar.

4.2 Simulación de lluvia

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

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

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

En las parcelas donde se realizó la alteración de la vegetación nativa, existe una mayor pérdida de suelo, esto coincide con los impactos de la alteración de la cobertura vegetal y microtopografía superficial del suelo

referidos por Chavéz et al. (2012). La alteración de la cobertura vegetal no solo tiene como efecto la erosión del suelo, sino que también puede haber menor producción de agua, menor captura de carbono, alteración del clima e impactos en la biodiversidad de la cuenca (Brüschweiler, Höggel & Kläy, 2004; Vargas & Rosales, 2014).

La biomasa vegetal es relevante en la caracterización del estado de la cuenca (Martínez & Leyva, 2014), y ya que la producción total de biomasa, pasto buffel, depende directamente de la cantidad de agua disponible en el suelo, siendo el sitio de estudio una zona árida caracterizada por sus escasas de agua (Medrano et al., 2007), el establecimiento del pasto no será rápido y tomará tiempo poder observar los verdaderos cambios en la hidrología de la cuenca. Además, los resultados obtenidos pueden variar con la implementación de mejores instrumentos de medición y la frecuencia de las mediciones.

5. Conclusiones

En condiciones de simulación *in situ*, la remoción de suelo con uso de rodillo aireador como práctica que propicie el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), redujo el flujo de escorrentía superficial mediante la formación de micro-depresiones que actuaron como retenedores del agua de lluvia, pero con el consecuente aumento en la producción de sedimentos con impacto en una mayor erosión del suelo. Adicionalmente, el paso de RA propicia la disminución de la cobertura vegetal nativa e impacta la biodiversidad de la flora, al menos en un primer período de tiempo, lo cual debe evaluarse a mediano plazo, sobre una posible regeneración y vigorización vegetal por la práctica de aireación del suelo y su mayor poder de retención de humedad.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- Alvez-Alvarenga, L. A., Mello, C. R. D., Colombo, A., & Cuartas, L. A. (2017). Performance of a Distributed Hydrological Model Based on Soil and Moisture Zone Maps. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41. DOI: 10.1590/18069657rbcS20160551
- Berlanga, R. C. A., S. Beltrán L., O. U. Martínez B., P. Hernández R. & L. M. Torres E. 2009. Rehabilitación de pastizales en el norte de Coahuila con el uso del rodillo aireador. In: *Memorias del VI Simposio Internacional de Pastizales*. UANL- ITESM. 4 al 7 de noviembre 2009. Monterrey, N.L. México.
- Bolaños González, Martín A., Paz Pellat, Fernando., Cruz Gaistardo, Carlos O., Argumedo Espinoza, Jesús A., Romero Benítez, Víctor M., & de la Cruz Cabrera, Julio C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792016000300271&script=sci_arttext
- Bueno-Hurtado, P., Sánchez-Cohen, I., Esquivel-Arriaga, G., Velásquez-Valle, M., & Inzunza-Ibarra, M. A. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *AGROFAZ*, 13(2). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Arriaga-3/publication/313596674_Caracterizacion_Hidrologica_para_cuencas_en_zonas_aridas_en_Mexico/links/5d6ecbf5299bf16522f30ca2/Caracterizacion-Hidrologica-para-cuencas-en-zonas-aridas-en-Mexico.pdf
- Brüschweiler, S., Höggel, U., & Kläy, A. (2004). Los bosques y el agua: interrelaciones y su manejo. *Geographica Bernensia*. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/48018126.pdf>
- Calvo-Alvarado, J., Jiménez-Rodríguez, C., & de Saá-Quintana, M. (2012). Intercepción de precipitación en tres estadios de sucesión de un Bosque húmedo Tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22). Recuperado de <https://doi.org/10.18845/rfmk.v9i22.355>
- Castillo, I. O., Ávalos, J. E., Ramírez, G. R., Arellano, J. D. J. E., Vázquez, C. V., & Sosa, E. S. (2009). Ganadería ejidal y emigración en el Municipio de San Luis del Cordero, Durango, Norte de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 25, 46-57. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/141/14118560006.pdf>
- Chavéz, L. G., Tapia, V. L. M., Bravo, E. M., Sáenz, R. T., Muñoz, F. H. J., & Vidales, F. I. (2012). Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. INIFAP. 13. ISBN: 978-607-425-825-7. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/265125083_Impacto_del_cambio_de_uso_del_suelo_forestal_a_huertos_de_aguacate_IMPACT_OF_FOREST_LAND_USE_CHANGE_TO_AVOCADO_ORCHARDS#:~:te

- xt=El%20cambio%20de%20uso%20del%20suelo%20en%20terrenos%20forestales%20para,Flora%20y%20Fauna%20Pico%20de
- Chen, L., Liu, C., Li, Y., & Wang, G. (2007). Impacts of climatic factors on runoff coefficients in source regions of the Huanghe River. *Chinese Geographical Science*, 17(1), 047-055. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/240354687_Impacts_of_climatic_factors_on_runoff_coefficients_in_source_regions_of_the_Huanghe_River
- Clary, W. P. (1989). Revegetation by land imprinter and rangeland drill. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. *Wildfires*. Paper 1.
- CONAFOR, SEMARNAT & UACH. (2013). Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final y Anexos I y II. Conafor y UACH. México.
- Cotler, Á. H, Galindo, A. A., González, M. I. D., Pineda, López, R. F. y Ríos, P. E. (2013). Cuadernos de divulgación ambiental. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. SEMARNAT, México, D. F. Primera edición. 31 p. Recuperado de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf>
- Esquivel Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., & Muñoz Villalobos, J. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del Norte-Centro de México. *Agrofaz*.
- Esquivel-Arriaga, Gerardo, Nevarez-Favela, María Magdalena, Velásquez-Valle, Miguel Agustín, Sánchez-Cohen, Ignacio, & Bueno-Hurtado, Palmira. (2017). Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 9(1), 3-18. Epub 28 de agosto de 2020. Recuperado de <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.12.008>
- FAO (2021). Un ambicioso programa de 104 millones de USD aborda la degradación del suelo en países de África y Asia central. Roma, Italia. Recuperado de: <https://www.fao.org/news/story/es/item/1411476/icode/>
- Forero, C. G. A., Saldarriaga, M. J. P., Vargas, R. M. (2017). Cambio climático: impactos y perspectivas de investigación desde una visión multidisciplinar. *Tendencias* (2): 122-138. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rtend.171802.80>
- Ffolliott, P. F., Brooks, K. N., Neary, D. G., Tapia, R. P., & Garcia-Chevesich, P. (2013). Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: processes and control. UNESCO Special Technical Publication No. 32. Montevideo, Uruguay: UNESCO, International Hydrological Programme, Regional Office for Science for Latin American and the Caribbean. 73 p. Recuperado de https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2013_ffolliott_p001.pdf

- French, R. H. (1988). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill Inc., U. S. A. ISBN 0-07-022134-0. Recuperado de: http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/doc/s/richard_french_hidraulica_canales_abiertos_-_hidrocliv_compressed_compressed-comprimido.pdf
- González-Cervantes, G., Estrada-Ávalos, J., González-Barrios, J. L., Cueto-Wong, J. A., Sánchez-Cohen, I., & Castillo-Santillán, G. (2006). Análisis de los factores que afectan la relación precipitación-escurrimiento en una zona semiárida del norte de México. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 337-345. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311103005.pdf>
- INEGI. (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. México. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
- Martínez Romero, A., & Leyva Galán, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el ecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos tropicales*, 35(1), 11-20. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000100002
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas (Esp)*, (43), 63-84.
- Medrano, F. G. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. ISBN 978-607-7908-69-2. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/las-zonas-aridas-y-semi-aridas-de-mexico-y-su-vegetacion/>
- Miller, W. P. (1987). A selenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. *Soil Science of America Journal*, 51(3), 832-834. Recuperado de <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100030048x>
- Olgún-López, J. L., & Pineda-López, R. (2010). Importancia de la priorización hidrológica en la toma de decisiones de manejo en la subcuenca del río Ayuquila, Jalisco, México. *Ciencia@ uaq*, 3(2), 42-51. Recuperado de https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v3-n2/Importancia.pdf
- Pedroza González, E., Ortiz Medel, J., & Martínez González, F. (2007). Historia del teorema de Bernoulli. *Acta Universitaria*, vol. 17, núm. 1,

- pp. 39-45 Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
<https://www.redalyc.org/pdf/416/41617103.pdf>
- Pereira, D. D. R., Almeida, A. Q. D., Martínez, M. A., & Rosa, D. R. Q. (2014). Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4), 1350-1358. DOI: 10.1590/S0100-06832014000400030
- Pérez-Arellano, R., Moreno-Pérez, M. F., & Roldán-Cañas, J. (2016). Comparación de modelos de interceptación de agua de lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. *Ingeniería del agua*, 20(3), 153-168. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/4713>
- Sánchez-Cohen, I., Velásquez -Valle, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., & Pedroza-Sandoval, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(2), 185-208 doi: 10.5154/r.rchsza.2015.07.007.
- Sánchez-Cohen, I., Pedroza Sandoval, A., Velásquez Valle, M. A., Bueno Hurtado, P., & Esquivel Arriaga, G. (2018). Expresiones analíticas de la erosión de suelo e impacto en su productividad. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(6), 1109-1122. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342018000601109&script=sci_arttext
- Sastre, B., Bienes, R., García-Díaz, A., & Cuevas, A. (2016). Incidencia de las cubiertas vegetales sobre la infiltración del agua de lluvia. I Congreso Ibérico de Olivicultura / V Jornadas Nacionales del Grupo de Olivicultura de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH), 13 - 15 de abril de 2016. I.S.B.N.: 978-84-09-04210-4. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Blanca-Sastre/publication/301351776_Incidencia_de_las_cubiertas_vegetales_sobre_la_infiltracion_del_agua_de_lluvia/links/5714d38b08ae6f3b8abe7201/Incidencia-de-las-cubiertas-vegetales-sobre-la-infiltracion-del-agua-de-lluvia.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, & Colegio de Posgraduados. (2003). Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1: 250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- Simanton, J. R., Hawkins, R. H., Mohseni-Saravi, M., & Renard, K. G. (1996). Runoff curve number variation with drainage area, Walnut Gulch, Arizona. *Transactions of the ASAE*, 39(4), 1391-1394. DOI: 10.13031/2013.27630
- Vargas Villamizar, T. C., & Rosales Salas, C. A. (2014). Pérdida de la cobertura vegetal y sus repercusiones ambientales y legales. *Geoenseñanza*. Vol. 19, 2014 (1) enero - junio / p. 61-79. I.S.B.N.: 1316-6077. Recuperado de

<http://www.revencyt.ula.ve/storage/repo/ArchivoDocumento/geoza/v19n1/art05.pdf>

Velásquez V., M. A., G. Esquivel A. P. Bueno H. I. Sánchez C. & H. E. Flores L. (2014). El uso de la lluvia artificial en la investigación en zonas áridas de México. *AGROFAZ*. 14: 83 – 89.

Yáñez-Chávez, L. G., Pedroza-Sandoval, A., Martínez-Salvador, M., Sánchez-Cohen, I., Echavarría-Cháirez, F. G., Velásquez-Valle, M. A., & López-Santos, A. (2018). Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. y *Chloris gayana* Kunth. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4), 702-718. Recuperado de <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i4.4333>

3.2 Predicción hidrológica en tierras áridas con modelos digitales de elevación de alta y baja resolución

Predicción hidrológica en tierras áridas con modelos digitales de elevación de alta y baja resolución

Azucelli Maythe Mauricio Pérez^{1*}; Ignacio Sánchez Cohen², Aurelio Pedroza Sandoval¹, Miguel Agustín Velásquez Valle³

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Km. 40 Carretera Gómez Palacio-Chihuahua, Bermejillo, Durango, México. C.P. 35230.

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. C.P. 35140.

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigaciones Noreste. Carretera Saltillo-Zacatecas km 8.5, col. Hacienda, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C. P. 25315.

*Autor para correspondencia: mauricioazucelli@hotmail.com, tel. 595 1161085.

Resumen

Introducción: La investigación se llevó a cabo en la cuenca San Luis del Cordero, la cual es parte de la Región Hidrológica 36 (Nazas-Aguanaval).

Objetivo: Identificar las variaciones hidrológicas de una cuenca en tierras áridas en QSWAT usando Modelo Digital de elevación (DEM, por su sigla en inglés) de alta y baja resolución.

Metodología: Se modeló la hidrología de la cuenca en QSWAT para DEM de alta y baja resolución. Se empleó el mapa de edafología y uso de suelo y datos de precipitación y temperatura del periodo 1979-2014.

Resultados: La producción de sedimento generada con DEMs de 25 y 4 cm de resolución difiere DEM de 90 m de resolución, la producción de sedimentos no difiere para los DEMs de 30m, 15 m y 25 cm de resolución. Para el caso del escurrimiento, la resolución no generó diferencias significativas en la cantidad del escurrimiento, y ésta no afecta la relación sedimento-escurrimiento de la cuenca con un ajuste de $R^2=0.9$ para todas las resoluciones.

Limitaciones del estudio: No se pudo hacer la calibración del modelo porque no se tienen suficientes datos medidos de escurrimiento y sedimentos.

Originalidad: La identificación de variación del escurrimiento y sedimentos para distintas resoluciones del DEM con el modelo QSAWT en tierras áridas no se ha realizado.

Conclusiones: Es posible identificar las variaciones de la respuesta hidrológica de una cuenca con distintas resoluciones del DEM, permitiendo la visualización de las áreas de mayor y menor impacto del escurrimiento y erosión de la cuenca.

Palabras clave: QSWAT, DEM, HRUs, escurrimiento, sedimentos.

Ideas sobresalientes:

Se requiere una resolución mínima para la creación de la red hidrológica de una cuenca.

Cuanto mayor sea la resolución del DEM, mayor será el área total de la cuenca y mayor el número de HRUs.

Un DEM de alta resolución requiere mayores capacidades computacionales, lo que incrementa el tiempo de la modelación y costo de la investigación.

La resolución del DEM usado en la modelación hidrológica, genera diferencias significativas en la producción de sedimentos, no así para el escurrimiento.

Introducción

Una de las principales causas de la degradación de los suelos es la erosión hídrica en zonas áridas. En estas regiones, la ocurrencia de eventos pluviales torrenciales, son de alta intensidad y corta duración, lo cual es causa de escorrentía superficial con alto potencial erosivo (Bolaños et al., 2016). Eventos extremos de precipitación pluvial con un rango de intensidad entre 40 y 70 mm h⁻¹, son causa de pérdidas de suelo más relacionadas con la energía erosiva de los escurrimientos superficiales, que con la erosión producida por la precipitación pluvial per se (Reza et al., 2017).

La energía necesaria para llevar a cabo este proceso es proporcionada por la energía cinética de las gotas de lluvia al impactarse en la superficie del suelo y por energía cortante del flujo al desplazarse sobre la superficie del suelo (Angulo-Martínez & Begueria, 2013). De esta manera, la infiltración y la estabilidad de los sedimentos durante los eventos pluviales torrenciales son factores altamente dependientes de las propiedades del suelo, tales como la textura, contenido de materia orgánica y tipo de agregados de las partículas (Diaz, 2011).

El uso de tecnologías digitales, son cada vez más frecuentes para el estudio y las relaciones entre las variables escurrimiento y el arrastre de sedimentos provocados por la precipitación pluvial y su

impacto en la degradación de los suelos en zonas de alta vulnerabilidad en las zonas áridas (Fernández de Castro et al., 2017).

El uso de los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por su sigla en inglés) es frecuente en los estudios hidrológicos y gestión de los recursos hídricos (Casado, Gentili, Campo, & Peiry, 2010), debido a la representación numérica del relieve terrestre cercano a la realidad de los DEM (Hawker et al., 2018). Para ello, se debe tener en cuenta durante el uso de los DEM, cuáles son sus alcances y limitaciones, ya que de esto dependerán los resultados que se obtengan y la calidad del producto generado (Burgos & Salcedo, 2014).

Además de las fuentes de descarga gratuita o cobro económico de DEM, es posible la generación de DEM a partir de la captura de imágenes realizadas con VANT-Vehículo aéreos no Tripulado (Vergara & Duarte, 2018). El uso de VANTs en fotogrametría hace posible la actualización, estudio, monitoreo e inspección de áreas puntuales y concretas basadas en ortofotos y DEM con una resolución superior a las imágenes satelitales (Quispe, 2016).

Contar con el DEM adecuado para el tipo de investigación o área de interés no siempre es posible y esto puede deberse a la baja resolución o elevado costo del DEM. Para el caso de los estudios hidrológicos, la resolución del DEM es importante ya que permite representar de forma más precisa los tramos de las redes de drenaje y, en consecuencia, aproximarse más a sus dimensiones reales (Moretto, Gentili & Campo, 2019). Sin embargo, el alto costo de los DEM de alta resolución y precisión en ocasiones no siempre justifica su uso (Reali, 2018).

Esta investigación parte de la hipótesis de que la precisión y resolución del DEM usado en la modelación hidrológica, puede generar diferencias significativas en los resultados de producción de sedimentos y escurrimiento, de modo que los DEMs de baja resolución no logran una buena representación de áreas pequeñas como lo son las microcuencas. El objetivo de este estudio fue identificar las variaciones de la respuesta hidrológica de una cuenca en tierras áridas en función de distintas resoluciones del DEM.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio fue desarrollado en la cuenca San Luis del Cordero, en el estado de Durango, esta cuenca es parte de la Región Hidrológica 36 (Nazas-Aguanaval) y se ubicada entre los paralelos 25°22' y

25° 25' Latitud Norte y los meridianos 104°10' y 104° 26' Longitud Oeste (Figura 1), a una altura de 1508 msnm (Esquivel *et al.*, 2015; Yáñez *et al.*, 2018). Las temperaturas máximas se presentan de mayo a agosto con valor de 40 °C mientras que las menores temperaturas, que son alrededor de 0 °C, comienzan en diciembre y terminan en marzo (Hurtado *et al.*, 2013), teniendo una precipitación promedio anual de 300 mm.

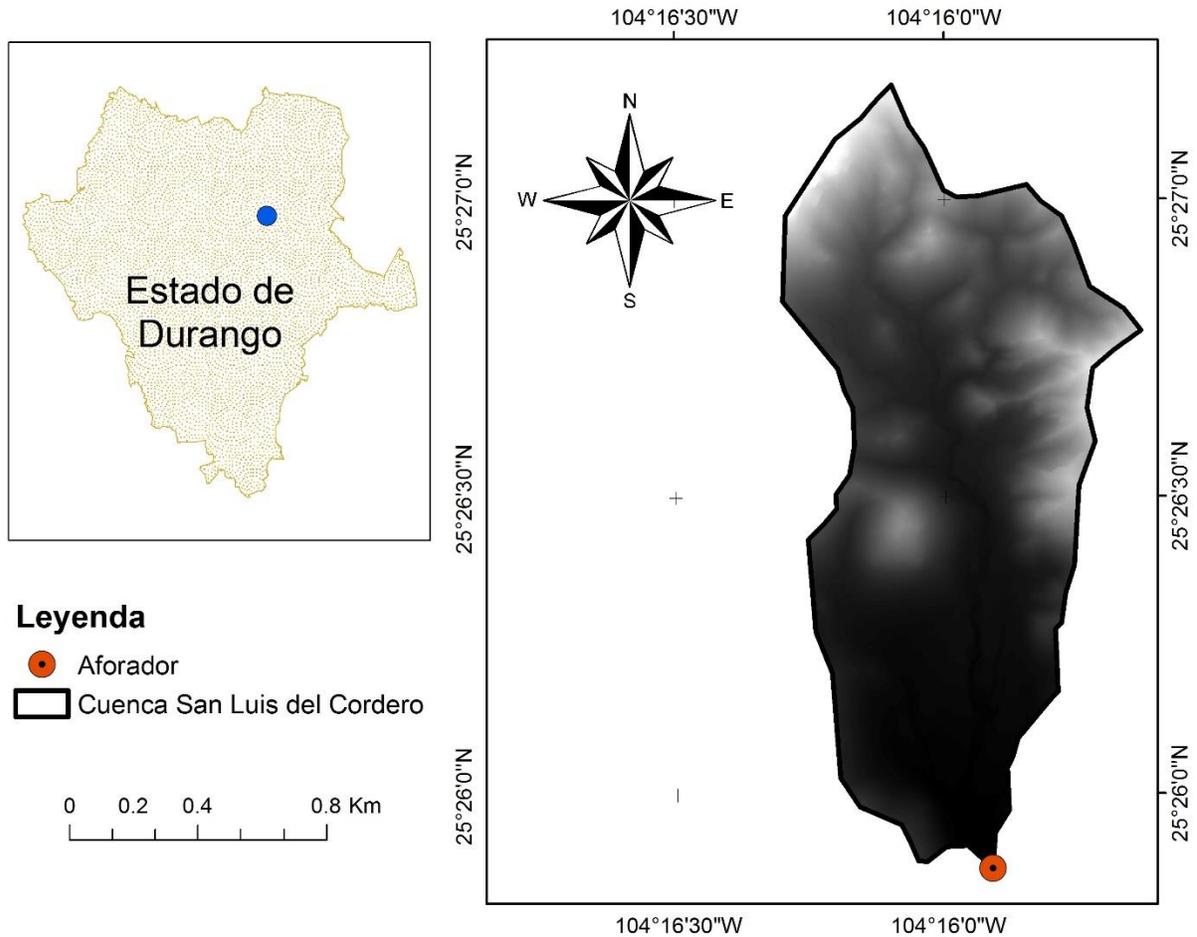


Figura 1. Ubicación de la cuenca San Luis del Cordero.

La clase de textura del suelo es franco arenoso con vegetación tipo matorral desértico (INEGI, 2016). La cobertura superficial del suelo es suelo desnudo principalmente (52.4%), seguido de roca (26.85%), materia orgánica (4.44%) y vegetación (15.92%) (Sánchez *et al.*, 2018). La principal actividad económica en la cuenca es la ganadería, representa el 45% de los ingresos económicos, esto ha llevado al pastoreo excesivo y disminución de los pastizales en la cuenca (Castillo *et al.*, 2009).

Al oriente de la cuenca se localiza el sistema orográfico La Cordillera del Rosario, y al poniente, el picacho "Las Peras" que forman un escarpado cañón en los márgenes del río Nazas, lo que hace que cuando corre el agua, lo haga con violencia en este lugar (INAFED, 2018), llegando a provocar inundaciones (Figura 2).



Figura 2. Crecida del arroyo e inundaciones de las calles del municipio San Luis del Cordero en el año 2019.

Para la identificación de las variaciones de la respuesta hidrológica se llevó a cabo la modelación hidrológica de la cuenca para los DEMs de 90 m, 30 m y 15 m de resolución (INEGI, 2018) que se consideraron de baja resolución, actualmente el DEM de mayor resolución disponible a nivel nacional es el de 15 m (INEGI, 2022). De igual forma se realizó la modelación considerando DEMs de 25 y 4 cm de resolución, a estos se les consideró de alta resolución. Los DEM de alta resolución (25 y 4 cm resolución) fueron creados a partir de fotogrametría con dron. A continuación, se describe el proceso para la generación de los DEMs de alta resolución.

Generación de los DEMs

La creación de los DEMs de alta resolución fue a partir de fotografías tomadas con un VANT operado por personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), quienes a su vez llevaron a cabo la generación computacional de los DEMs.

El VANT empleado es del modelo DJI Phantom 4 que cuenta con una cámara aérea que genera instantáneas de 12 megapíxeles (DJI, 2019). El VANT está equipado con botones y selectores para

exposición, inclinación de la cámara, captura de fotos y grabación de vídeo, además es operado mediante un control remoto que permite manejar el VANT hasta 5 km de distancia (Figura 3).



Figura 3. VANT DJI Phantom.

El procedimiento de creación de los DEMs de la cuenca fue acorde a los siguientes pasos:

- Establecimiento de puntos fijos de control

Los puntos fijos de control se usaron como referencia para la georreferenciación del DEM, en total se establecieron 6 puntos fijos de control dentro de la cuenca, estos puntos se distribuyeron por toda la escena incluyendo las cuatro esquinas y el centro de la imagen. El establecimiento de los puntos de control consistió en colocar una marca en el terreno, esta marca fue una cruz de pintura blanca de 1 m de longitud, en el centro de la cruz se dejó fija una probeta de cemento de 50 cm de alto con un radio de 5 cm.

- Georreferenciación de los puntos de control

Para la georreferenciación de los puntos de control se usó el método RTK (Real-Time Kinematic)-GPS. Los puntos de control fueron seleccionados acorde a los criterios establecidos por González (2015). Las herramientas usadas fueron, un receptor Ashtech locus estática GPS, una plataforma nivelante Sokkia y un trípode de la misma marca comercial, un receptor móvil que estuvo en movimiento y del cual se determinaron las coordenadas en tiempo real. Además, se empleó un sistema de telecomunicaciones ubicado entre el receptor fijo y receptor móvil y una Cinta métrica usada para la medición de la distancia horizontal de la base del trípode al punto fijo.

- Levantamiento fotográfico del área de estudio y creación de los DEMs

Se realizó la creación de la misión de vuelo en el software Pix4Dmapper, se definió el polígono que cubrirá el VANT durante su vuelo, la altura, velocidad del vuelo y traslape entre fotos, para este estudio se manejó un traslape de 80% en horizontal y 85% lateral. Creada la misión del vuelo, se procedió al armado, calibración y verificación del funcionamiento adecuado del VANT, luego se dio paso a la elevación del VANT y ejecución de la misión de vuelo. Los vuelos se realizaron a 300 m de altura respecto al punto de despegue. Una vez que el VANT ejecutó la misión de vuelo, se realizó el aterrizaje del mismo y respaldo de las imágenes capturadas.

Las imágenes fueron empleadas para construir un mosaico, el cual fue georreferenciado con el software Pix4Dmapper. Como resultados se obtuvieron los Mosaico RGB y los DEMs de 24 cm y 4 cm de resolución de la cuenca San Luis del Cordero.

Para el levantamiento fotográfico de la cuenca y la georreferenciación de los puntos de control se necesitaron tres días de permanencia en la cuenca. Del día del vuelo para el levantamiento fotográfico de la cuenca, al día en que fueron enviados los DEMs por parte del IMTA transcurrieron 24 días. Los DEMs enviados por el IMTA cubrían un área mayor a la cuenca, por lo que de estos DEMs se realizó la extracción de los DEMs específicos de la cuenca.

Para realizar la extracción de la cuenca fue necesario ampliar la capacidad de almacenamiento y procesamiento de un equipo computacional ya que este proceso no fue posible en una computadora personal- Laptop Acer Aspire V5 - Core i3 con 4GB de RAM y 750GB de capacidad del disco duro. El equipo donde se realizó la extracción de la cuenca tenía 1 Tb en disco duro, con procesador Core i3 y 16 GB de RAM. Una vez realizada la extracción de los DEMs, ya con un área menor, fue posible realizar la modelación en la Laptop Acer Aspire V5 mencionada anteriormente.

Modelación

La modelación hidrológica se llevó a cabo en el programa QSWAT de uso libre. Los insumos para la ejecución del programa fueron los DEMs, mapas de edafología, uso de suelo y vegetación obtenidos de la página de CONABIO (2019), estos archivos proyectados en coordenadas UTM Zona 13, así también fueron empleados datos de lluvia y temperatura correspondientes al periodo 1979-2014 obtenida de la página Waterbase (2019) de acceso público.

La modelación en QSWAT consistió en la creación de un nuevo proyecto, delimitación de la cuenca con base al MDE, creación de las HRU's a partir de los mapas tipo ráster de edafología y uso de suelo y vegetación de la cuenca. Lo siguiente es dar de alta la base de datos meteorológicos

y correr el modelo. Los resultados obtenidos fueron la variación en sedimentación y escurrimiento para cada HRU generado. En la Figura 4 se presenta de forma detallada el proceso de modelación en QSWAT. Finalmente, se realizó el análisis estadístico de los resultados mediante una prueba de Tukey en el paquete estadístico Minitab 19.

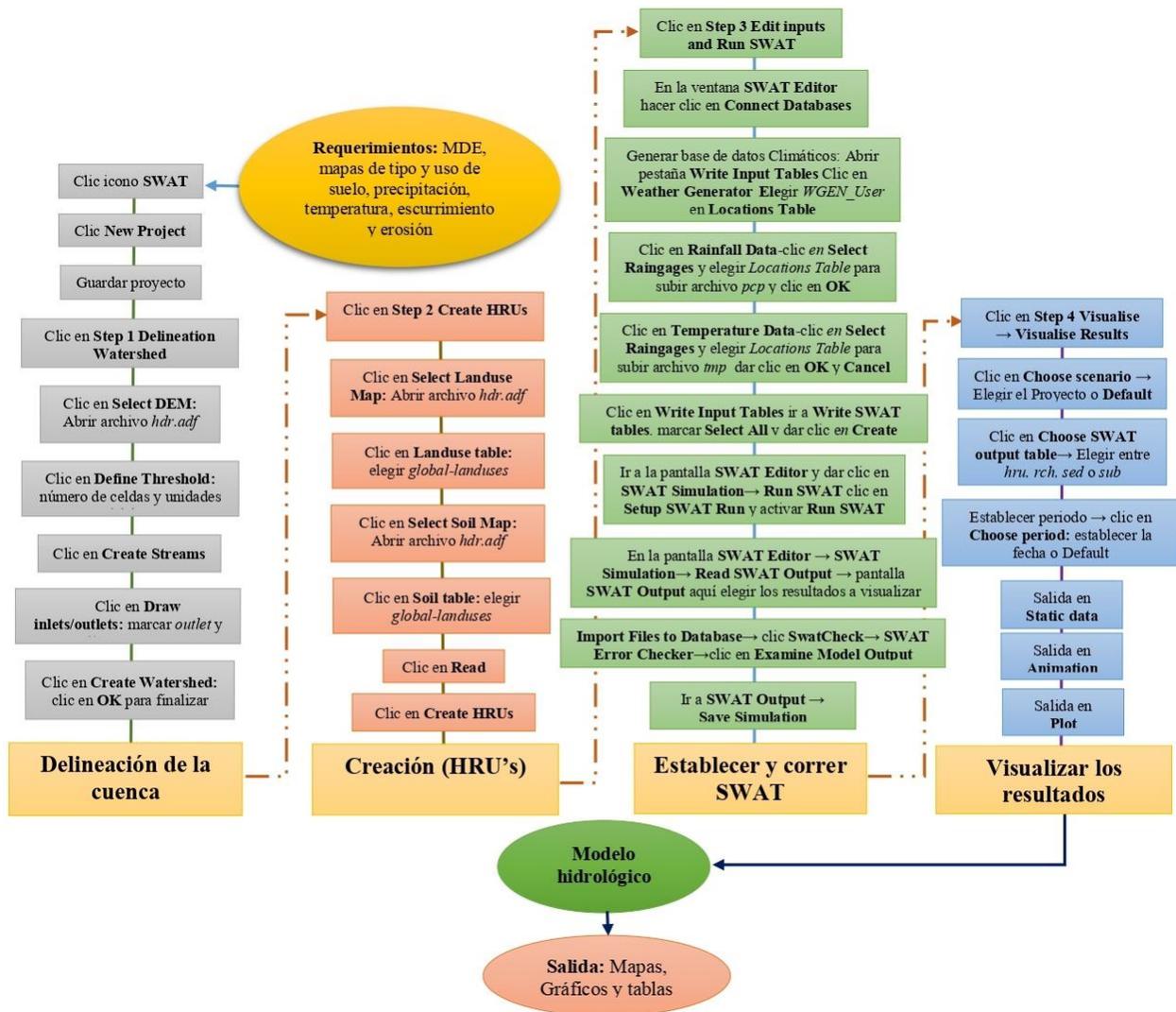


Figura 4. Procedimiento de modelación hidrológica en QSWAT.

Resultados y discusión

Sobre los resultados, se considera importante mencionar que el tiempo de procesamiento de la base de datos durante la modelación fue mayor conforme la resolución del MDE fue aumentando, por

lo que para los DEMs de alta resolución fue necesario un equipo de mayor capacidad y velocidad de procesamiento.

A continuación, en el Cuadro 1, se muestran los valores obtenidos de área, elevación y número de HRUs generado por QSWAT para la cuenca usando diferentes resoluciones del DEM. De estos resultados se observa una tendencia al aumento del tiempo de modelación, área total de la cuenca y número de unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) a mayor resolución del DEM.

El aumento los resultados en del área de la cuenca obedece a una mejor cobertura de la cuenca debido a la mayor resolución del DEM (Moretto, Gentili & Campo, 2019), el DEM de 4 cm de resolución es el que mejor representa el área, forma de la cuenca y las combinaciones de cobertura de tierra, suelo, y pendiente en la cuenca (mayor número de HRU), los DEM de alta resolución son valiosos en la ejecución de modelos de superficie y se análisis de zonas en riesgo de inundación en pequeñas áreas (López & Álvarez, 2018). Por otro lado, la reducción del valor del área de la cuenca, para el DEM de 90 m de resolución, se debió al mayor tamaño de las celdas del DEM que generó una red de drenaje incompleta de la cuenca.

Cuadro 1. Resumen de los valores generado en QSWAT de la Cuenca San Luis del Cordero.

Parámetro	DEM				
	90 m	30 m	15 m	25 cm	4 cm
Tiempo de modelación (min)	5	6	6	90	130
Área total-cuenca (ha)	70.28	133.7	142.6	149.3	149.3
Elevación máxima (m)	1530	1705	1744	1618	1731
Elevación mínima (m)	1429	1499	1500	1423	1484
Número de HRU	21	33	31	35	39

Otro resultado de la modelación fue la producción de sedimentos de cada HRU de la cuenca (Figura 5). La producción de sedimentos es mayor principalmente en la parte alta de la cuenca, siendo la parte baja de la cuenca el área de menor erosión del suelo, la producción de sedimentos en pendientes pronunciadas fue mayor que la producida en pendientes media y suave (Hernández, 2011).

La resolución del DEM durante la modelación dio como resultado una variación en producción de sedimentos, a mayor resolución del DEM mayor la producción de sedimentos generado durante la modelación. Los DEM con diferentes precisiones y resoluciones espaciales en la modelación hidrológica, generan diferencias cuantitativas en los resultados (Ortiz, 2019), así un DEM de 90 m de resolución genera una producción máxima de sedimentos de 1.708 t/ha/año, mientras que con un DEM de 4 cm de resolución la producción de sedimentos llega a ser hasta de 6.06 t/ha/año. Los HRU de mayor y menor producción de sedimentos para la modelación con DEM de 25 y 4 cm son los mismos, de modo que para fines de identificación de áreas de menor y mayor riesgo de erosión podrían usarse ambos DEM de manera indistinta.

Para el área de estudio, es necesario un DEM con una resolución mínima de 30 m para la creación de la red hidrológica, como se observa en la Figura 5, con el DEM de 90 m de resolución no es posible crear la red hidrológica que describa a la cuenca. A medida que la resolución del DEM aumenta la red hidrológica se crea con mayor nitidez, lo que permite una mejor delimitación de la cuenca que genera una variación de los resultados obtenidos en la modelación.

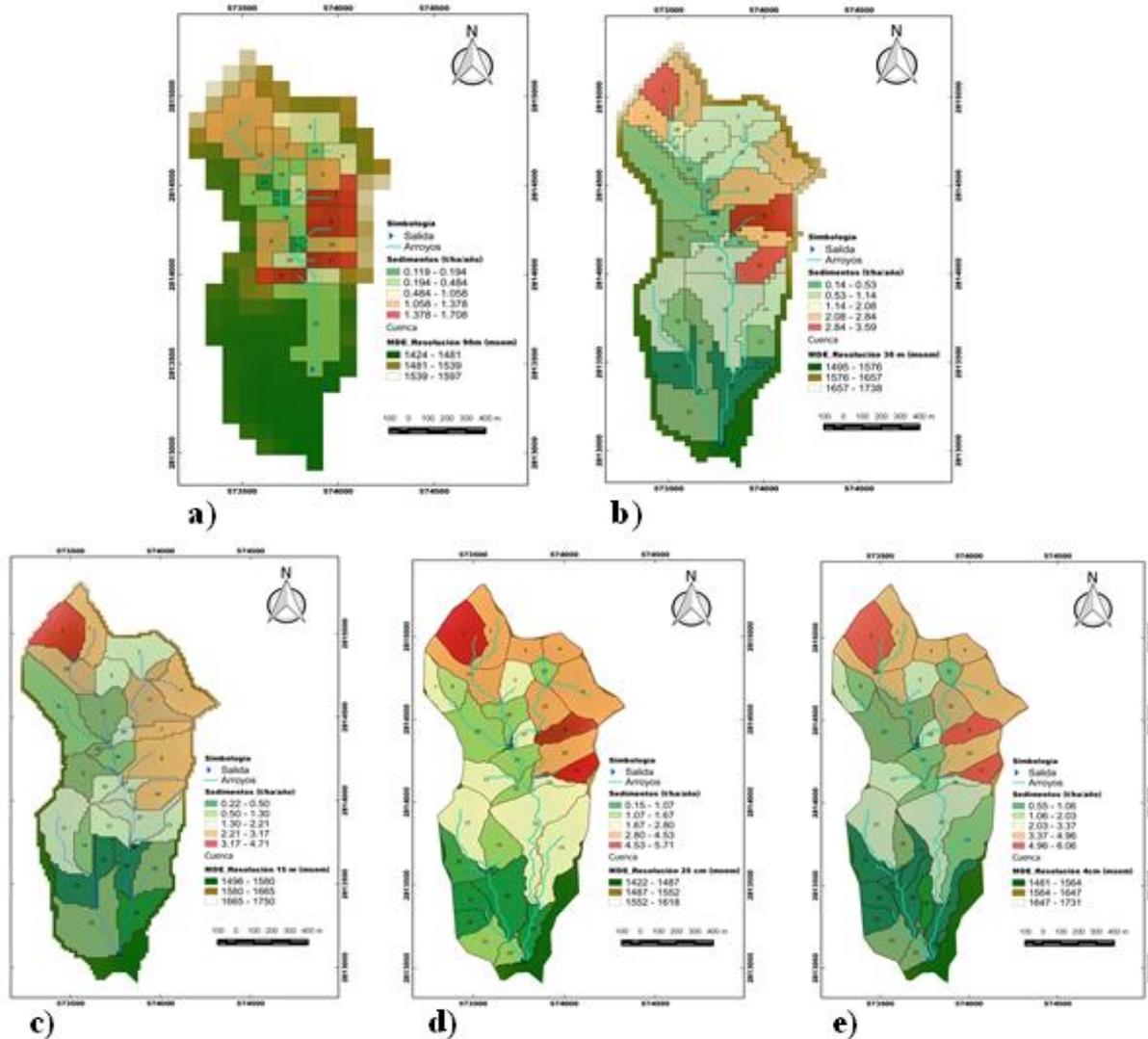


Figura 5. Producción anual de sedimentos en la cuenca San Luis del Cordero con DEM de a) 90 m, b) 30 m, c) 15 m, d) 25 cm y e) 4 cm de resolución.

En la Figura 6 se muestra la producción total de sedimentos que reportan los HRUs de mayor erosión de suelo para el periodo 1979-2014. Al igual que con la producción máxima de sedimentos, la producción total de sedimentos va en aumento acorde a una mayor resolución del DEM. Existe una variación en los valores obtenidos para cada DEM. Del análisis de varianza reportado en el Cuadro 2, se tiene que, la producción de sedimentos para los DEMs de 90, 30 y 15 m, no es significativa diferente, de igual manera ocurre para los DEMs de 25 y 4 cm donde no hay una diferencia significativa en la producción de sedimentos. Sin embargo, hay una diferencia significativa de la producción de sedimentos para los DEMs de 90 m, 25 cm y 4 cm.

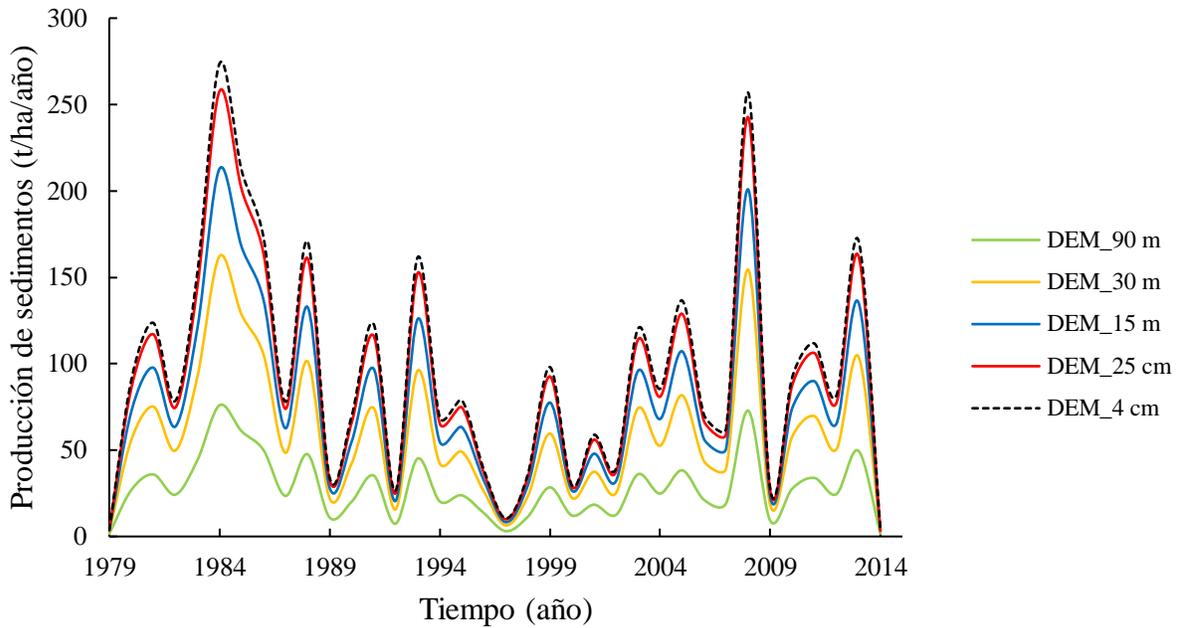


Figura 6. Producción máxima total anual de sedimentos en la cuenca para los HRUs.

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza de la producción total máxima de sedimentos.

DEM	N	Media	Desviación estándar	Agrupación
90 m	36	28.12	18.57	A
30 m	36	58.70	39.75	AB
15 m	36	76.12	52.18	AB
25 cm	36	90.8	63.3	B
4 cm	36	95.9	67.1	B

Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DEM con la misma agrupación, son estadísticamente iguales.

Dado que no todas las medias de los valores de la producción total máxima de sedimentos son iguales, la hipótesis de que la precisión y resolución del DEM usado en la modelación hidrológica, puede generar diferencias significativas en los resultados para el caso de la producción de sedimentos no se rechaza.

Para el caso del escurrimiento, los resultados obtenidos de la modelación se presentan en las Figuras 7 y 8. En la figura 7 se observa que los escurrimientos en la cuenca fueron de mayor

intensidad en la parte baja para todos los casos de resolución del DEM, caso contrario a esto son las áreas de menor escurrimiento ubicadas en la parte alta de la cuenca.

Contrario a la producción de sedimentos, la producción máxima del escurrimiento en la cuenca no varía significativamente para todos los casos de resolución del DEM, todos los DEMs reportan un escurrimiento máximo alrededor de 250 mm al año y señalan las mismas áreas de mayor y menor producción de escurrimiento (excepto el DEM de 90 m de resolución), para la identificación de las áreas de mayor escurrimiento en cuencas pequeñas usando QSWAT, pueden ser usados DEMs de baja resolución para su modelación.

La falta de variación del escurrimiento se atribuye a que el modelo QSWAT realiza el cálculo del escurrimiento con el método de Curva Numérica, CN (Soil Conservation Service, 1972) y dado que la CN es la misma para todos los HRUs de la cuenca, el escurrimiento no varió significativamente, ya que las condiciones de infiltración del suelo, las prácticas de manejo de la cuenca, la condición antecedente de la lluvia y la cobertura del suelo están directamente relacionadas el escurrimiento (Francisco *et al.*, 2010). Por otro lado, el método CN permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable de pequeñas cuencas (Sánchez *et al.*, 2003).

Del análisis de varianza reportado en el Cuadro 3, se tiene que, la producción de escurrimiento para las diferentes resoluciones del DEM, no son significativa diferente. Por lo que la hipótesis de que la precisión y resolución del DEM usado en la modelación hidrológica, puede generar diferencias significativas en los resultados de escurrimiento se rechaza.

Algo interesante a notar es la semejanza del comportamiento de la producción de sedimentos respecto al escurrimiento que se observan entre las figuras 6 y 8. El aumento y disminución del escurrimiento corresponden con un aumento y disminución de la producción de sedimentos, a mayor escurrimiento mayor es la producción de sedimentos en la cuenca (Camas *et al.*, 2012).

De lo anterior se puede establecer que la producción de sedimentos está dicentemente relaciona con el escurrimiento y esto queda comprobado con los resultados obtenidos de la relación sedimento-escurrimiento que se muestra en la Figura 9, donde se aprecia que para todas las opciones del DEM la relación entre ambas variables fue lineal. Las ecuaciones que relacionan la producción de sedimento y escurrimiento presentaron una R^2 de 0.9 para todos los casos, por lo que la resolución del DEM no afecta en la relación sedimento-escurrimiento de la cuenca.

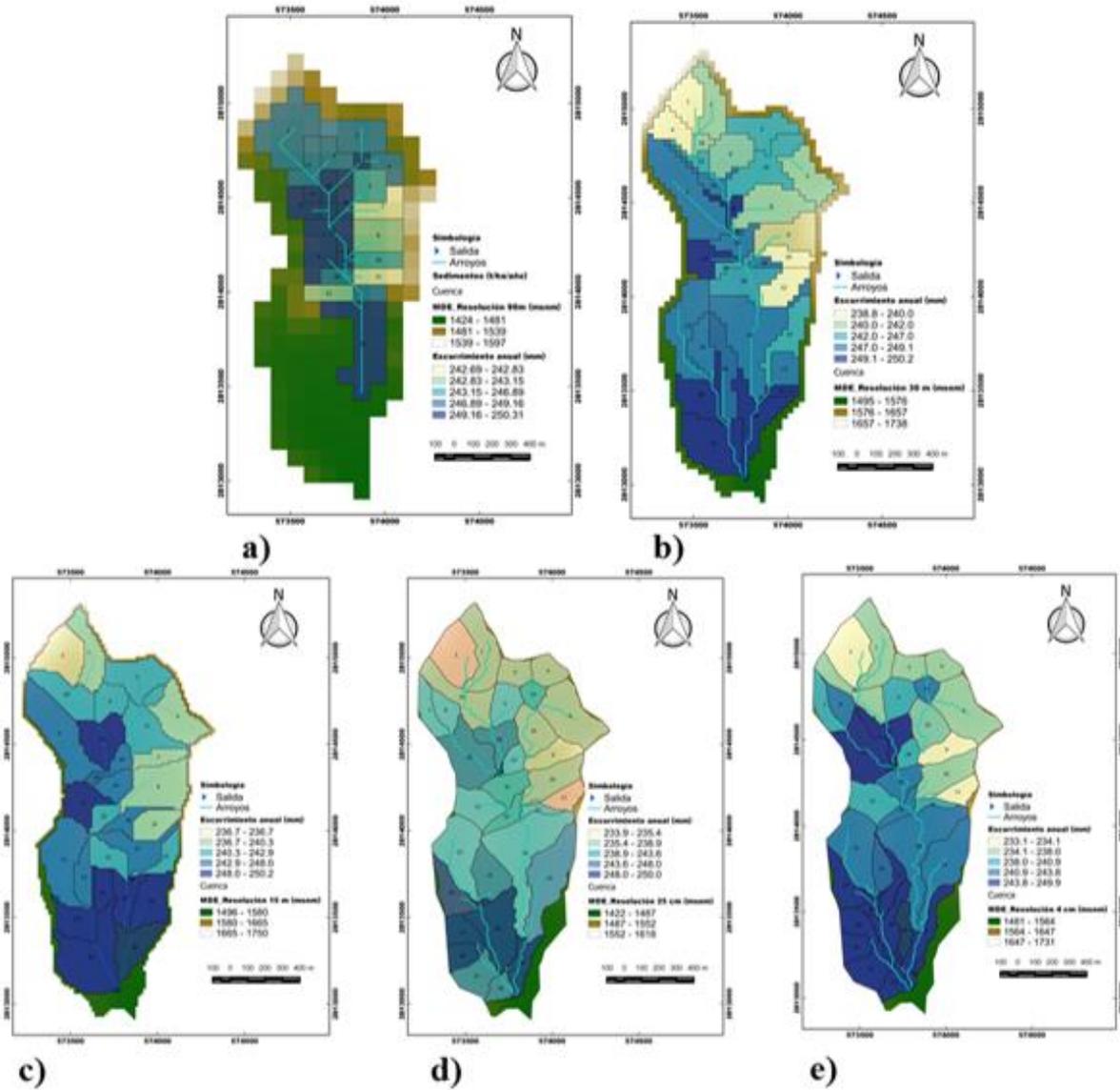


Figura 7. Producción anual de escurrimiento en la cuenca San Luis del Cordero con DEM de a) 90 m, b) 30 m, c) 15 m, d) 25 cm y e) 4 cm de resolución.

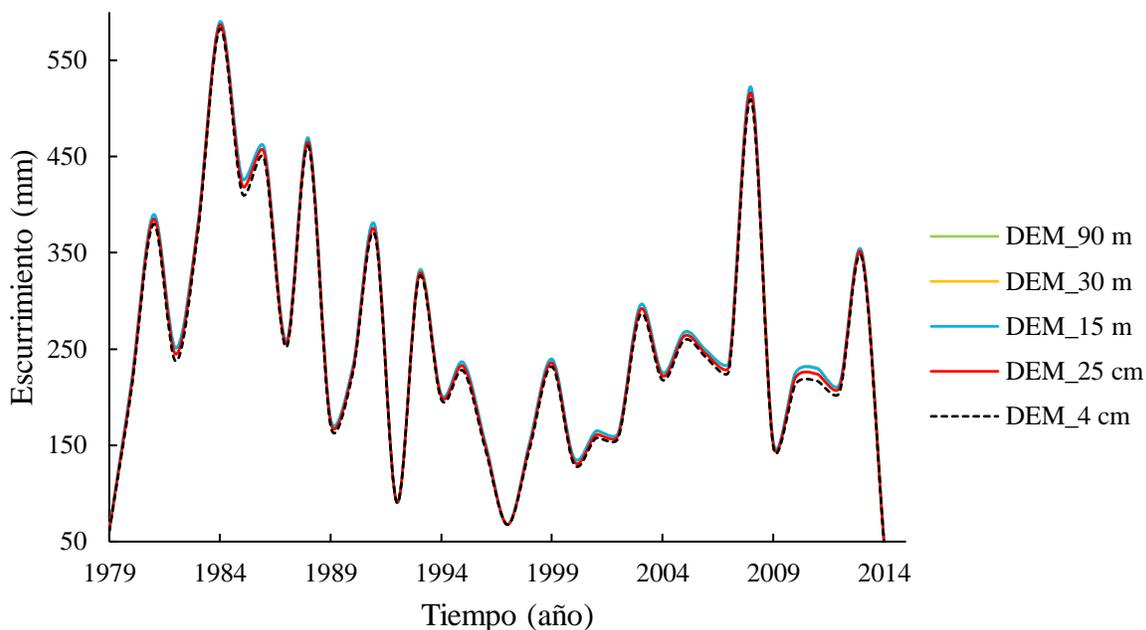


Figura 8. Producción máxima anual de escurrimiento en la cuenca San Luis del Cordero reportada en los HRUs.

Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza de la producción total máxima de sedimentos.

DEM	N	Media	Desviación estándar	Agrupación
90 m	36	256.8	129.1	A
30 m	36	253.3	128.2	A
15 m	36	253.6	128.3	A
25 cm	36	249.2	127.1	A
4 cm	36	257.2	129.2	A

Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). DEM con la misma agrupación, son estadísticamente iguales.

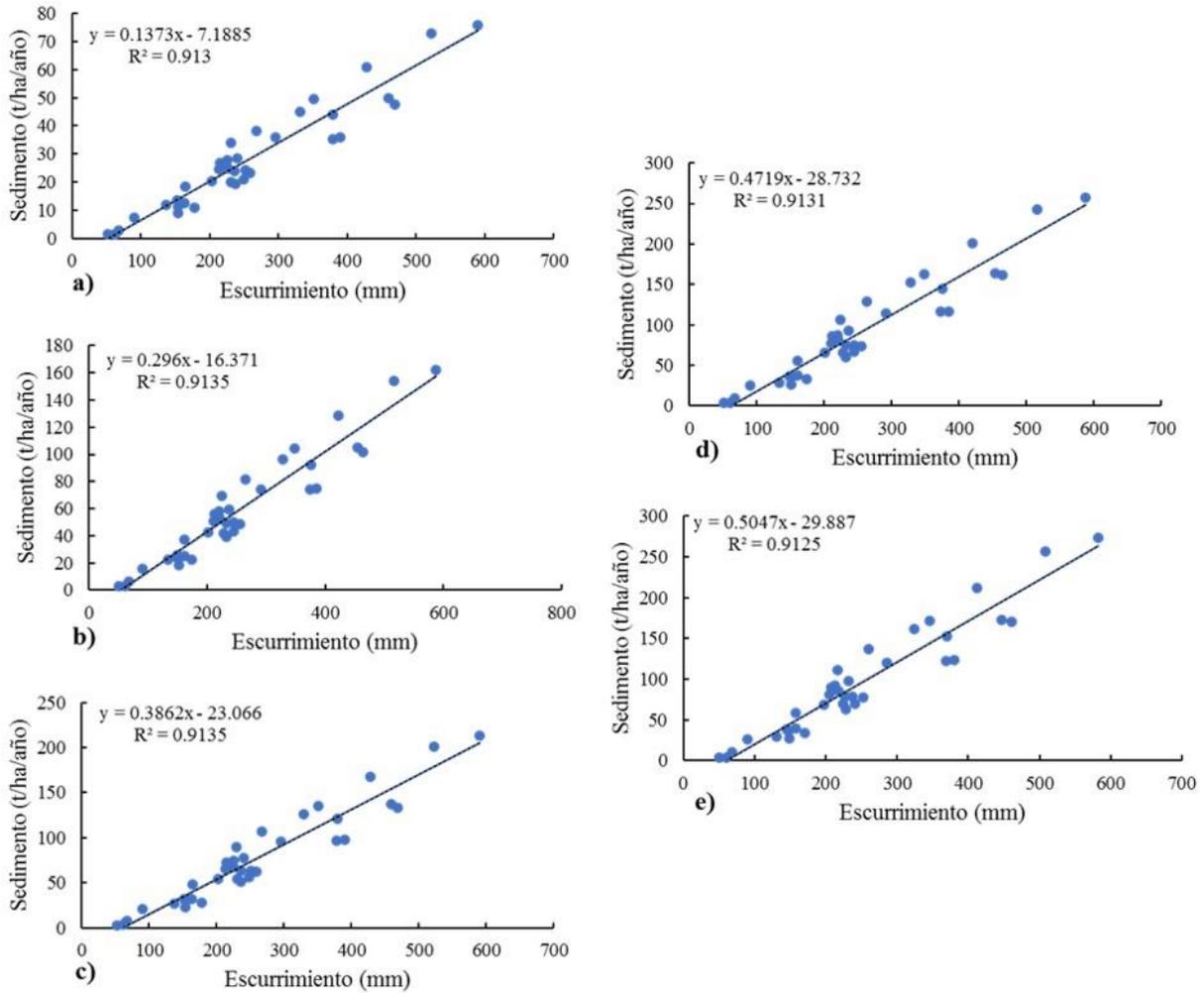


Figura 9. Relación de la pérdida de suelo (t/ha/año) con el escurrimiento (mm) para los DEMs:
a) 90 m; b) 30 m; c) 15 m; d) 25 cm y e) 4 cm.

En la Figura 10 se muestra un resumen de las 5 relaciones lineales de sedimento-escurrimiento, donde se observa el comportamiento de la tendencia de la relación sedimento-escurrimiento respecto a la resolución de los DEMs. El incremento de la resolución de los DEMs da como resultado que una misma cantidad de escurrimiento genere una mayor producción de sedimentos y esto se relaciona a la mejor cobertura del área de la cuenca que produjo un mayor número de HRU.

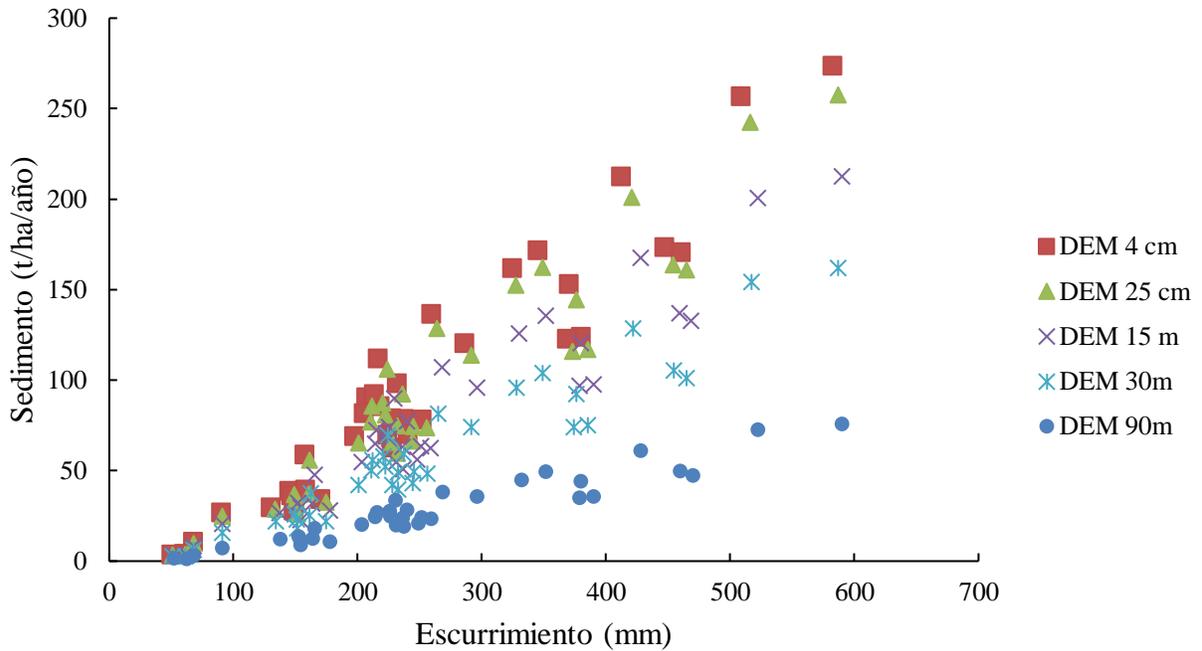


Figura 10. Resumen de la relación sedimento-escorrimento para los diferentes DEMs.

Realizando una comparación de los resultados generados de sedimento y escurrimiento con el DEM de 15 m de resolución, DEM de mayor resolución a nivel nacional, respecto a los DEM de 25 cm y 4 cm, se tuvo que estadísticamente no hay una diferencia significativa. Lo anterior indica que, para los DEM s de 15 m, 25 cm y 4 cm, los parámetros hidrológicos que caracterizan a la cuenca no variaron ampliamente.

Para el caso del DEM de 30 m respecto a los DEMs de 25 cm y 4 cm, al igual que para el DEM de 15 m, no hay una diferencia significativa en la producción de sedimentos y escurrimientos. Considerando las dificultades mencionadas anteriormente para la creación y procesamiento de los DEMs de 25 cm y 4 cm, y dado que estadísticamente no difieren los resultados de la modelación, para la modelación hidrológica de la cuenca, usando QSWAT, se recomienda el DEM de 30 m. Algo interesante sería realizar la modelación hidrológica en un modelo especializado en cuencas pequeñas para poder observar si en esta ocasión los DEM de alta resolución genere diferencias significativas en los resultados de la modelación.

Dadas las dificultades y el tiempo de procesamiento de los DEMs durante la modelación, y ya que no se generaron diferencias significativas en los resultados de sedimentos y escurrimientos a partir

de los DEMs de 30 m de resolución, para la modelación en QSWAT, es prudente realizar la modelación hidrológica con DEMs de una resolución de 30 m y 15 m de resolución.

Conclusiones

Es posible identificar las variaciones de la respuesta hidrológica de una cuenca en tierras áridas en función de distintas resoluciones del DEM. Lo anterior, hizo posible la visualización de las áreas de mayor y menor impacto del escurrimiento y erosión de la cuenca San Luis del Cordero. Por otro lado, la resolución del DEM en la modelación hidrológica impactó en el número de HRUs generadas, la ubicación de las áreas de mayor escurrimiento y producción de sedimento y en los valores de éstos.

La resolución de los DEMs genera diferencias significativas en la producción de sedimentos, no así para el caso del escurrimiento. Para una cuenca pequeña, es posible hacer un uso indistinto de los DEMs en la modelación hidrológica para la generación de la producción de sedimentos y escurrimientos a partir de 30 m de resolución. Sobre el modelo QSWAT, este puede ser considerado como un apoyo para la toma de decisiones en el manejo integral de la cuenca San Luis del Cordero.

Agradecimientos

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

Referencias

- Angulo-Martínez, M. & Beguería, S. (2013). Análisis de la erosividad de la lluvia: procesos, índices y fronteras de conocimiento. *Cuaternario y Geomorfología*, 27 (1-2): 53-69. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/19355>
- Bolaños, G. M. A., Paz, P. F., Cruz, G., Carlos, O., Argumedo, E. J. A., Romero, B. Víctor, M. & de la Cruz, C. J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3):271-288.

- Burgos, V. H., & Salcedo, A. P. (2014). Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información. 2do. Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos.
- Camas Gómez, R., Turrent Fernández, A., Cortes Flores, J. I., Livera Muñoz, M., González Estrada, A., Villar Sánchez, B., & Cadena Iñiguez, P. (2012). Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(2), 231-243.
- Casado, A., Gentili, J., Campo, A., & Peiry, J.L. (2010). Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. In *Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino* (pp. 102–116). https://www.researchgate.net/publication/259217512_Evaluacion_de_la_calidad_de_modelos_digitales_de_elevacion_derivados_de_curvas_de_nivel_para_aplicaciones_hidrologicas/citations [May 13 2022].
- Castillo, I. O., Ávalos, J. E., Ramírez, G. R., Arellano, J. D. J. E., Vázquez, C. V., & Sosa, E. S. (2009). Ganadería ejidal y emigración en el Municipio de San Luis del Cordero, Durango, Norte de México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 25, 46-57. <https://www.redalyc.org/pdf/141/14118560006.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2019). “Geoportal”. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Consultado 25/02/2019.
- Dajiang Innovation Technology (DJI). (2018). Phantom 4 Pro Especificaciones. <https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro>.
- Diaz, G. M. (2011). Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. *Ingeniería e Investigación*, 31(3):80-90. ISSN 0120-5609. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000300009&script=sci_abstract&tlng=es
- Esquivel Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., & Muñoz Villalobos, J. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del Norte-Centro de México. *Agrofaz*.
- Fernández de Castro, M. G., Vázquez, S. L., Palacio, P. J. L, Peralta, H. A. y García, R. A. (2017). Geomorfometría y cálculo de erosión hídrica en diferentes litologías a través de

fotogrametría digital con drones. *Investigaciones Geográficas*, 2448-7279. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.59548](https://doi.org/10.14350/rig.59548)

Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., Martínez-Menes, M. R., & Enríquez-Quiroz, J. F. (2010). Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71-78. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792010000100008

González Alcaraz, P. (2015). Levantamiento mediante GPS de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la universidad en el mismo sistema de coordenadas. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/4651>

Hawker, L., Rougier, J., Neal, J., Bates, P., Archer, L. & Yamazaki, D. (2018). Implications of simulating global digital elevation models for flood inundation studies. *Water Resources Research*, 54(10), 7910-7928. DOI: [org/10.1029/2018WR023279](https://doi.org/10.1029/2018WR023279)

Hernández Herrera, A. D. (2011). Influencia de la pendiente y la precipitación en la erosión de taludes desprotegidos. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2284/1/Hernandez_Herrera_Daniel_Alejandro.pdf

Hurtado, P. B., Cohen, I. S., Arriaga, G. E., Valle, M. A. V., & Ibarra, M. A. I. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *AGROFAZ*, 13(2). https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Arriaga-3/publication/313596674_Caracterizacion_Hidrologica_para_cuencas_en_zonas_aridas_en_Mexico/links/5d6ecbf5299bf16522f30ca2/Caracterizacion-Hidrologica-para-cuencas-en-zonas-aridas-en-Mexico.pdf

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2018). Continuo de elevación mexicano 3.0. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>

x

- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (2018). Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México Estado de Durango. <http://www.inafed.gob.mx/>
- López, M., & Álvarez, S. (2018). Influence of DEM source LiDAR and photogrammetry and resolution on computing topographic parameters in contrasted croplands.
- Moretto, B., Gentili, J.O. & Campo, A.M. (2019). Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires, Argentina. Revista Huellas, Volumen 23, N° 2, Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. DOI: <http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2019-2316>.
- Ortiz-Saens, L.E. (2019). Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación: caso caña de azúcar. UD y la Geomática, (14), 18-25. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.15266>
- Quispe, O. (2016). Análisis de GSD para la generación de cartografía utilizando la tecnología drone, huaca de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica, 18(36). DOI: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i36.12014>
- Reali, A. (2018). Potentialities of unmanned aerial vehicles in hydraulic modelling drone remote sensing through photogrammetry for 1D flow numerical modelling. [MSc tesis]. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Reza, V. A., Ahmadi, M. & Cerdà, A. (2017). Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. Science of the Total Environment. 583: 382-392. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.078
- Sánchez C., I., M. Velázquez V., R. Jasso I. y J. L. González B. 2003. Caracterización de la retención máxima de humedad en el suelo del método SCS–CN. Aplicación a una cuenca de México. Ingeniería Hidráulica en México. 18: 111–117. http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/954/pdf_1
- SCS (Soil Conservation Service), 1972. National engineering handbook. Washington, DC: Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
- Vergara, Ó. W., & Duarte, H. (2018). Generación de modelos digitales mediante fotogrametría, utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV's). Revista Tecnología y Productividad, 3(3), 63-69. <https://doi.org/10.23850/24632465.1560>

WaterBase. (2019). “Global Weather Data for SWAT”. <https://globalweather.tamu.edu/>. Consultado 03/03/2019.

Yáñez-Chávez, L. G., Pedroza-Sandoval, A., Martínez-Salvador, M., Sánchez-Cohen, I., Echavarría-Cháirez, F. G., Velásquez-Valle, M. A., & López-Santos, A. (2018). Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. y *Chloris gayana* Kunth. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4), 702-718. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i4.4333>

3.3 Modelación hidrológica en zonas áridas en AGWA para una cuenca semi-instrumentada en zonas áridas de México

MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN PLATAFORMA AGWA PARA UNA CUENCA SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS DE MÉXICO

Azucelli Maythe Mauricio Pérez¹; Ignacio Sánchez Cohen^{2*}, Aurelio Pedroza Sandoval¹, Miguel Agustín Velásquez Valle³

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Km. 40 Carretera Gómez Palacio-Chihuahua, Bermejillo, Durango, México. C.P. 35230.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México. C.P. 35140.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Regional de Investigaciones Noreste. Carretera Saltillo-Zacatecas km 8.5, col. Hacienda, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C. P. 25315.
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx (* Autor de correspondencia)

Resumen

La planificación y evaluación en la gestión del suelo y el agua requieren para su modelación de modelos complejos, el requerimiento de extensos datos y archivos de parámetros dificulta el uso de estos modelos. AGWA es una herramienta que permite el uso de modelos complejos en menor tiempo y con menor esfuerzo. El presente trabajo se desarrolló para la cuenca San Luis del Cordero con el objetivo de realizar la modelación de su hidrología mediante la plataforma AGWA. Se implementaron los modelos KINEROS, RHEM y SWAT alojados en AGWA, las entradas a los modelos fueron el modelo digital de elevación, mapas de edafología y uso de suelo, la modelación se realizó para un evento de lluvia de 25 mm. Se obtuvo la producción de sedimentos y escurrimientos e identificaron las subcuencas de mayor potencialidad hídrica. RHEM y Kineros calcularon una producción máxima de sedimentos en las subcuencas de 28820 kg ha^{-1} y 16278 kg ha^{-1} respectivamente. La diferencia en la producción de sedimentos se atribuye a los parámetros hidrológicos y de erosión derivados de RHEM y Kineros. Los escurrimientos máximos de las subcuencas, obtenidos para RHEM y Kineros fueron de 6.41 mm y 5.34 mm. Para ambos modelos, la mayor pérdida de agua ocurre en la infiltración, siendo mayor el calculado con Kineros. Los modelos KINEROS, RHEM modelaron la hidrología de la cuenca y mostraron las áreas de

mayor escurrimiento y producción de sedimentos. Dado que SWAT solo es capaz de modelar datos en serie de tiempo y no eventos aislados, se recomienda realizar la modelación de la cuenca San Luis del Cordero con los modelos KINEROS y RHEM que si son capaces de modelar eventos aislados de lluvia.

Palabras claves: Modelación, hidrología, AGWA, sedimento, escurrimiento.

Abstract

Planning and evaluation in soil and water management require complex models for their modeling, that require extensive data and parameter files that make the use of these models difficult. AGWA is a tool that allows the use of complex models in less time and with less effort. The present work was developed for the San Luis del Cordero waters with the objective of modeling its hydrology through the AGWA platform. The KINEROS, RHEM, and SWAT models housed in AGWA were implemented, the inputs to the models were the digital elevation model, edaphology, and land use maps. The modeling was carried out for a 25 mm rainfall event. The production of sediments and runoff was obtained and the sub-watershed with the greatest hydric potential were identified. RHEM and Kineros calculated a maximum sediment production in the sub-watersheds of 28,820 kg ha^{-1} and 16,278 kg ha^{-1} , respectively. The difference in sediment production is attributed to hydrological and erosion parameters derived from RHEM and Kineros. The maximum runoff of the sub-watershed, obtained for RHEM and Kineros, was 6.41 mm and 5.34 mm, respectively. For both models, the greatest loss of water occurs in infiltration, being greater than calculated with Kineros. The KINEROS, RHEM models modeled the hydrology of the basin and showed the areas of greatest runoff and sediment production. Since SWAT is only capable of modeling time series data and not isolated events, it is recommended to use KINEROS and RHEM for the San Luis del Cordero watershed, which are capable of modeling isolated rainfall events.

Keywords: Modelling, hydrology, AGWA, sediment, runoff.

INTRODUCCIÓN

La planificación y la evaluación en la gestión de los recursos suelo y agua están evolucionando de problemas locales a problemas regionales complejos que requieren para su modelación el uso de modelos distribuidos que calculen el escurrimiento y la erosión a diferentes escalas espaciales y temporales, sin embargo, el uso de modelos distribuidos era dificultada por los extensos requisitos de datos y archivos de parámetros de entrada que representaba un obstáculo en el uso oportuno y rentable de los modelos complejos (Burns et al., 2004).

Actualmente es posible el uso de la plataforma Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA, por sus siglas en inglés), esta es una herramienta de modelado de cuencas basada en SIG que reduce en gran medida el tiempo y el esfuerzo necesarios para preparar archivos de entrada y permitir parametrizar, ejecutar y visualizar resultados de modelos complejos como RHEM, KINEROS2, KINEROS-OPUS, SWAT2000 y SWAT2005 (USDA-ARS, 2019). Con motivo de aprovechar las bondades de la herramienta AGWA, el objetivo de la presente investigación fue realizar la modelación de la hidrología de una cuenca en zonas áridas mediante la plataforma AGWA.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La microcuenca San Luis del Cordero se ubica dentro del municipio del mismo nombre, en el estado de Durango, forma parte de la Región Hidrológica 36 (Nazas-Aguanaval), ubicada entre los paralelos 25°22' y 25° 25' Latitud Norte y los meridianos 104°10' y 104° 26' Longitud Oeste. Las temperaturas máximas se presentan de mayo a agosto con valor de 40 °C mientras que las menores temperaturas, que son alrededor de 0 °C, comienzan en diciembre y terminan en marzo (Hurtado et al, 2013), teniendo una precipitación promedio anual de 300 mm.

La clase de textura del suelo es franco arenoso con vegetación tipo matorral desértico (INEGI, 2016). Para el entendimiento del funcionamiento de los

modelos KINEROS, RHEM y SWAT, a continuación, se presenta una descripción general de estos.

Modelos hidrológicos KINEROS, REHEM y SWAT

- KINEROS

El modelo cinemático de escorrentía y erosión KINEROS (acrónimo en inglés de KINematic runoff and EROSion model) describe los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía superficial y erosión de pequeñas cuencas agrícolas y urbanas, en KINEROS la cuenca está representada por una cascada de planos y canales (Figura 1).

KINEROS puede usarse para determinar los efectos de varias características artificiales como desarrollos urbanos, pequeños depósitos de detención o canales alineados en hidrografías de inundación y rendimiento de sedimentos (SWRC-ARS-USDA, 2019a). El algoritmo de infiltración de KINEROS es dinámico (interacción de la lluvia con las aguas superficiales en tránsito) e incluye las pérdidas de transmisión del canal.

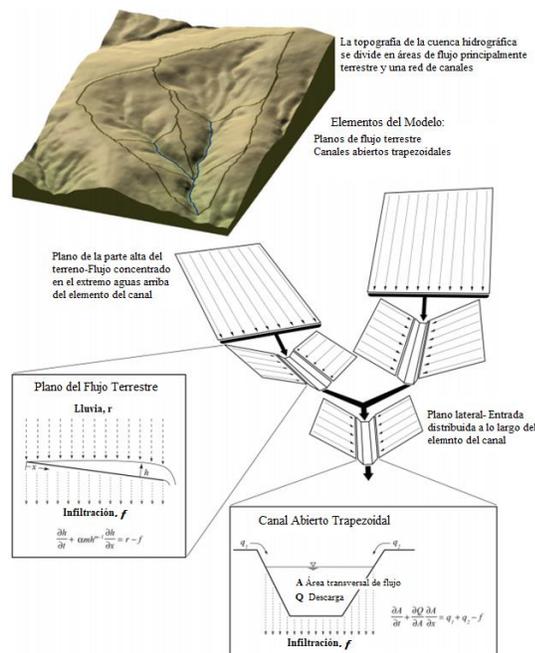


Figura 1. Esquema del proceso mediante el cual los datos topográficos y la topología de la red de canales se abstraen en la geometría simplificada de los elementos del modelo KINEROS2 (de Goodrich et al., 2012).

- RHEM

Las complejas interacciones del cambio climático, la vegetación, la dinámica del suelo superficial y las actividades humanas tienen importantes impactos en los procesos de escorrentía y erosión del suelo en los ecosistemas de pastizales (Hernández et al., 2017). RHEM está diseñado para proporcionar tecnología sólida basada en la ciencia para modelar y predecir las tasas de escorrentía y erosión en los pastizales y para ayudar a evaluar los efectos de la práctica de conservación de los pastizales.

RHEM es una herramienta de predicción de la erosión, específica para la aplicación de pastizales, basada en los fundamentos de infiltración, hidrología, ciencia de las plantas, hidráulica y mecánica de la erosión (SWRC-ARS-USDA, 2019b). Las ecuaciones de estimación de parámetros en RHEM utilizan datos físicamente cuantificables, como la textura del suelo, las características de la pendiente, la cubierta vegetal y la cubierta del suelo (Al-Hamdan et al., 2017; Hernández et al., 2017).

RHEM es una versión modificada y mejorada del código del modelo WEPP específico para la aplicación de pastizales y basada en los fundamentos de infiltración, hidrología, ciencia de plantas, hidráulica y mecánica de erosión (Nearing et al., 2011). Una parte compleja para la implementación de RHEM es su requerimiento de la base de datos de vegetación del área a modelar.

Actualmente a nivel mundial se tiene la limitación en la disponibilidad de datos de vegetación, esto se debe principalmente al tiempo y costo invertido en el levantamiento de datos (Kautz et al. 2019). Estas limitaciones de datos son un obstáculo clave para el modelado hidrológico a gran escala en regiones áridas y semiáridas (Goodrich et al., 2012).

- SWAT

SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado. SWAT no está diseñado

para simular un solo acontecimiento de flujo detallado. SWAT requiere como datos de entrada el clima y tiempo, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo que acontecen en las cuencas (Uribe, 2010).

El modelo SWAT resuelve la ecuación de balance para la cuenca bajo estudio como lo señala la Ecuación 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial de humedad en el suelo R_{day} es la precipitación en un día determinado, E_a es la evapotranspiración en el intervalo de tiempo considerado, w_{seep} es la cantidad de agua en la zona vadosa, Q_{surf} es el escurrimiento superficial en el mismo intervalo y Q_{gw} es la cantidad del flujo de retorno.

Dentro de los resultados que SWAT genera durante el proceso de modelación se tiene un resumen de los resultados hidrológicos, sedimentos, del ciclo del nitrógeno y del fósforo, crecimiento de la planta, nutrientes perdidos y un resumen del uso del suelo (Figura 2).

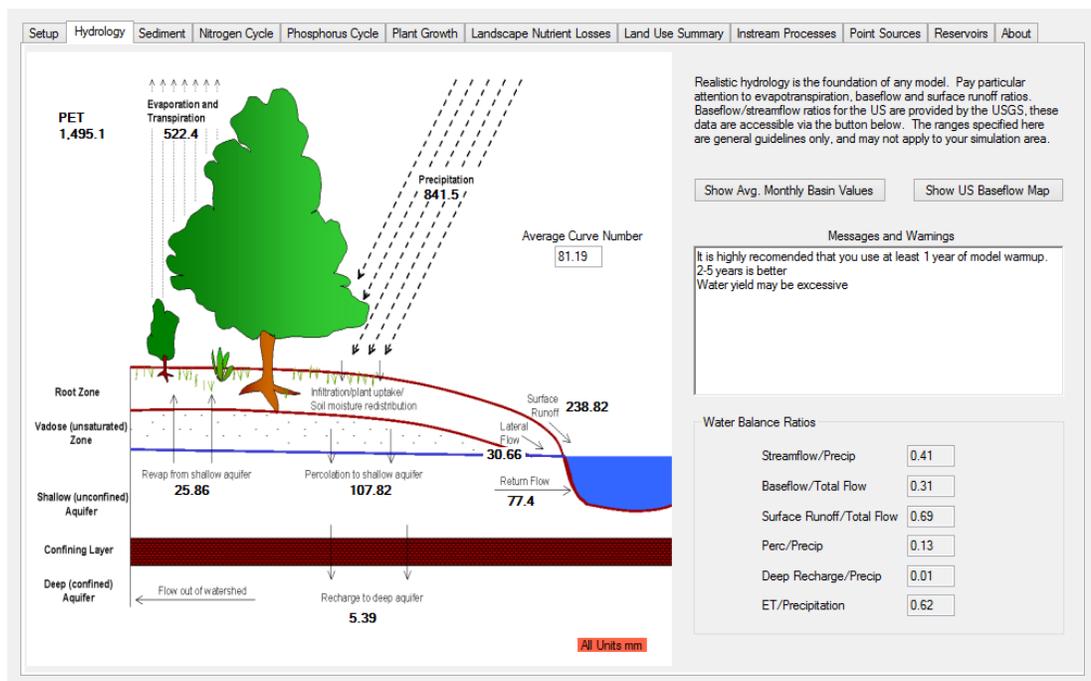


Figura 2. Resumen de la hidrología generado con SWAT.

Para la implementación de los modelos KINEROS, RHEM y SWAT, se usó el modelo digital de 25 cm de resolución de la cuenca, así como sus mapas de edafología y uso de suelo, estos archivos fueron proyectados a coordenadas UTM Zona 13. La modelación se realizó para un evento de lluvia de 25 mm.

La modelación consistió en la creación de un nuevo proyecto, delimitación de la cuenca, discretización, parametrización, definición de la precipitación, elección del modelo para la simulación y, generación y observación de los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran los resultados de producción de sedimentos y escurrimiento generados en la modelación hidrológica de la Cuenca San Luis del Cordero, para un modelo digital de elevación de 25 cm de resolución en la plataforma AGWA.

Durante la modelación, el cálculo de la producción de sedimentos solo fue posible en los modelos KINEROS y RHEM, SWAT no produjo resultados de producción de sedimentos; por otro lado, el cálculo del escurrimiento fue posible en los tres modelos.

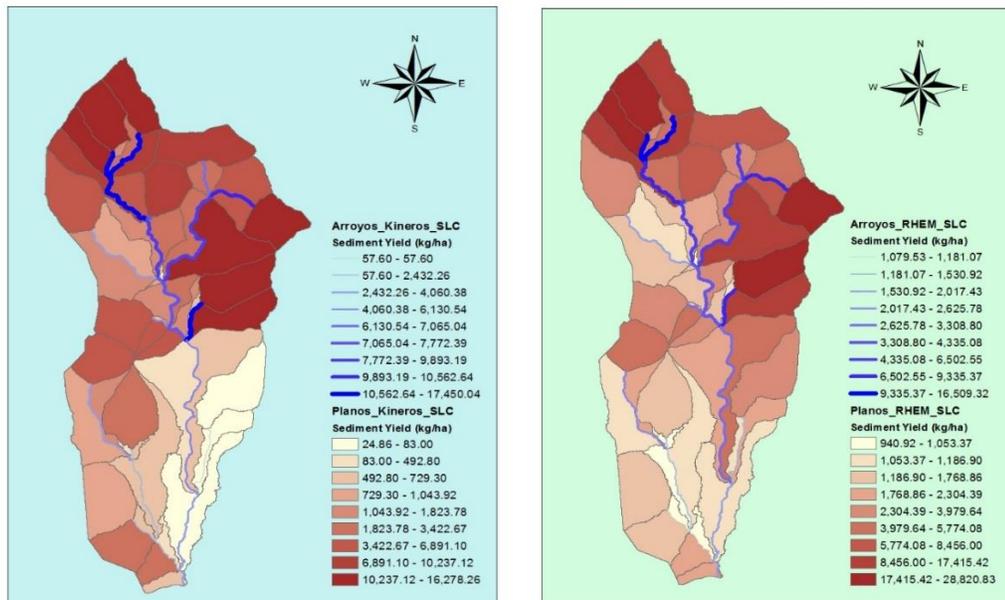


Figura 3. Producción de sedimentos con modelo Kineros (Izquierda) y RHEM (Derecha).

El modelo RHEM generó una producción de sedimentos en las subcuencas de hasta 28820 kg ha^{-1} , mientras que Kineros reporta una producción máxima de sedimentos de 16278 kg ha^{-1} . Para el caso de la producción de sedimentos en los arroyos, esta no difiere significativamente en lo calculado por ambos modelos. La pendiente de terreno influyó en una mayor producción de sedimentos en la parte alta y media de la cuenca (Vázquez, 2018).

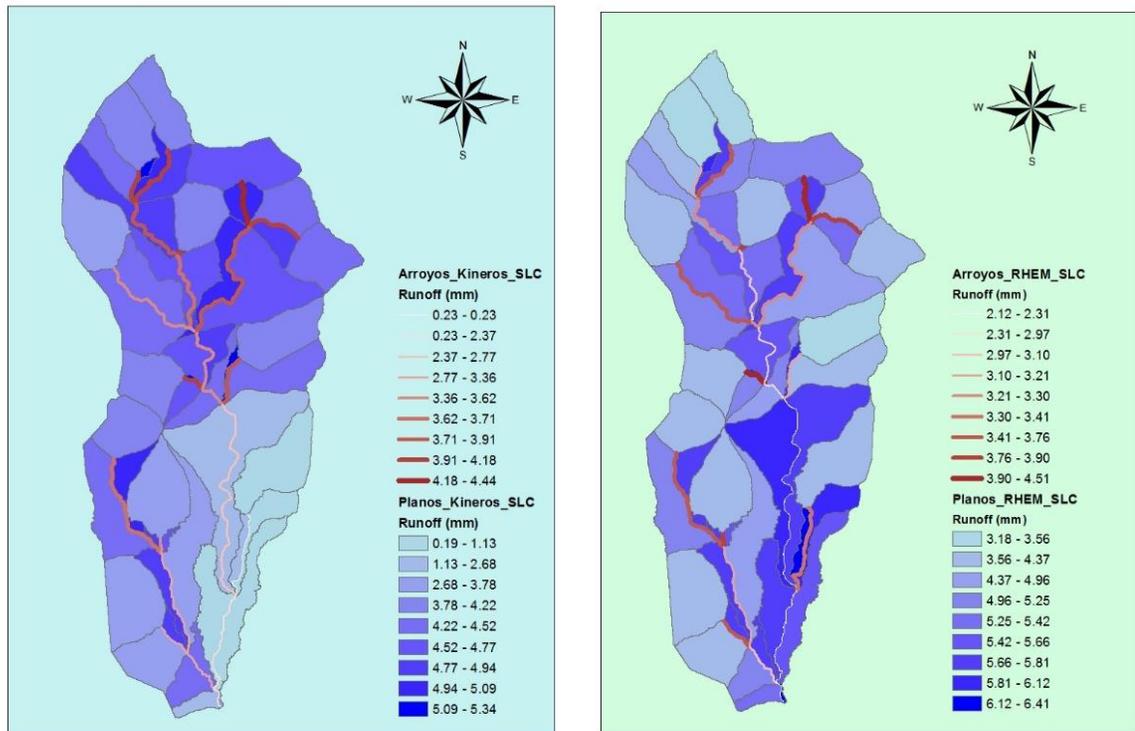


Figura 4. Resultado de Escurrimiento superficial producido con modelo Kineros (Izquierda) y RHEM (Derecha).

Para el caso del escurrimiento, el modelo RHEM calculó un escurrimiento de hasta 6.41 mm en la cuenca, mientras que Kineros reportó un escurrimiento máximo de 5.34 mm. Durante la modelación con Kineros y RHEM, el escurrimiento no es tan variable como la producción de sedimentos calculado en ambos modelos, lo anterior se atribuye a que el modelo RHEM sea más robusto en su diseño para cálculo de sedimentos comparado con Kineros debido a que incorpora nuevos modelos de erosión y transporte de sedimentos (ARS, 2022).

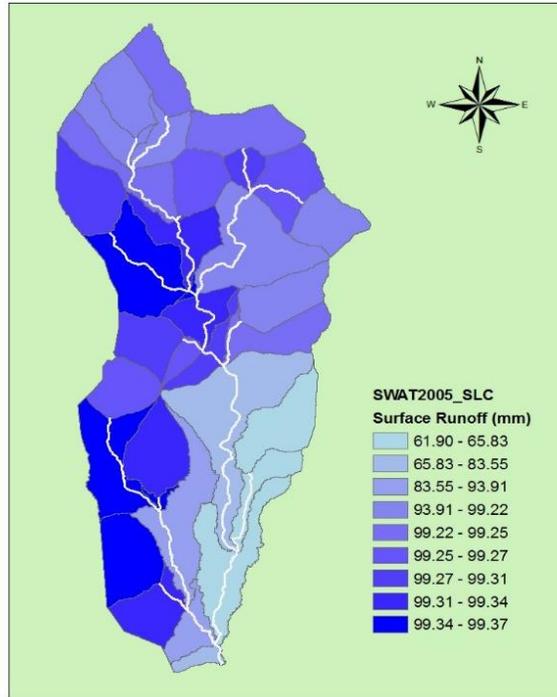


Figura 5. Resultado de Escurrimiento superficial producido con modelo SWAT.

Para el caso del escurrimiento en SWAT que se muestra en la figura 5, los valores de escurrimiento son mucho mayores que los obtenidos en los modelos KINEROS y RHEM y esto se debe a que para la modelación fue necesaria un periodo de los eventos de lluvia, no es posible modelar un evento aislado de lluvia en SWAT (SWRC-USDA-ARS, 2022). Yu y colaboradores (2018), señalan que SWAT continúa siendo un modelo de rendimiento a largo plazo y está limitado a un tiempo de marcha continuo lo que limita para una simulación de inundaciones detalladas basada en eventos.

De modo que, trabajos recientes desarrollados en SWAT sobre el cálculo de sedimentos y escurrimiento, solo han sido desarrollados para series de tiempo anual, mensual o diarios, pero no para eventos aislados de lluvia (Ahmed et al., 2020; Ni et al., 2020; Chen et al., 2019; Xue et al., 2019). Será necesario continuar con las modelaciones a fin de conocer la dinámica de los modelos y entender su funcionamiento para obtener mejores resultados.

En el Cuadro 1 se muestra un resumen de los valores obtenidos de la modelación hidrológica de San Luis del Cordero en la plataforma AGWA, el modelo se corrió

para un evento de lluvia de 25 mm tanto para Kineros como para RHEM teniendo como resultado que en ambos modelos la mayor pérdida de agua se da en la infiltración con la diferencia que tanto la infiltración en planos como el flujo de salida es mayor con Kineros que con RHEM. Para el cálculo de la producción de sedimentos, Kineros calculó una mayor producción de sedimentos, existe una diferencia de 1.74 tha^{-1} en la producción de sedimentos entre lo calculado por KINEROS y RHEM. No se incluyen resultados de SWAT ya que AGWA no genera un resumen de los valores generados por SWAT como en los casos de Kineros y RHEM.

Cuadro 1. Resumen de los valores obtenidos en la modelación en AGWA para KINEROS y RHEM.

Parámetro	Valor	
	KINEROS	RHEM
Precipitación (mm)	25	25
Infiltración en los planos (mm)	20.49	17.75
Infiltración en los canales (mm)	1.38	2.49
Intercepción (mm)	0.74	2.45
Flujo de salida (mm)	2.37	2.27
Área total de la cuenca (ha)	150.45	150.48
Producción de sedimentos (tha^{-1})	3.54	1.79

La diferencia en la producción de sedimentos se atribuye a los parámetros hidrológicos y de erosión derivados de RHEM y Kineros. En 2016, Williams *et al.*, encontraron que la aplicabilidad de RHEM para evaluar los efectos de tratamientos en la escorrentía y los procesos de erosión depende de la parametrización del modelo, mientras que, Fortuño, Gómez, & Jang (2021) reportan que el modelo Kineros sin una discretización óptima, aumenta el volumen de sedimento erosionado calculado.

Alonso (2016) menciona que Kineros no posee un componente que describa la evapotranspiración entre eventos, por tanto, no mantiene el balance hidrológico;

en el caso de RHEM, la pérdida de suelo está dada por la erosión laminar y la salpicadura en la que los suelo desnudo son fuente de generación de escorrentía y desprendimiento del suelo por salpicadura de lluvia, mientras que los suelos con cubierta vegetal interceptan y almacenan la lluvia y el flujo superficial, facilitando la infiltración y la retención de sedimentos (Al-Hamdan et al., 2017). Por lo que, las diferencias entre el escurrimiento y sedimento reportado por Kineros respecto a RHEM son causadas principalmente por el proceso de parametrización de cada modelo.

Por lo anterior, es necesario realizar la parametrización y discretización de los modelos acorde a las características de la cuenca y, más importante, realizar la comparación de los resultados de las modelaciones con datos observados para saber con certeza que modelo estima mejor el escurrimiento y sedimento en la cuenca.

CONCLUSIONES

La modelación hidrológica de la microcuenca San Luis del Cordero con los modelos KINEROS, RHEM y SWAT dentro de la plataforma AGWA fue posible gracias a la implementación del Modelo Digital de Elevación, mapa de edafología y mapa uso de suelo. Los modelos KINEROS, RHEM fueron capaces de modelar la hidrología de la microcuenca, esto permitió visualizar las áreas principales de generación de escurrimiento y sedimentos a las que hay que poner atención para el manejo de los recursos agua-suelo-vegetación, de tal modo que AGWA es un apoyo para la toma de decisiones en el manejo integral de la microcuenca San Luis del Cordero.

Aunque fue posible ejecutar SWAT, el resultado obtenido solo fue posible para una serie de tiempo, por lo que se recomienda realizar la modelación de la microcuenca con los modelos KINEROS y RHEM que si son capaces de modelar eventos aislados de lluvia.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado económicamente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) de México y el Posgrado en Ciencias en Recursos

Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo.

LITERATURA CITADA

- Ahmed, E., Al Janabi, F., Zhang, J., Yang, W., Saddique, N., & Krebs, P. (2020). Hydrologic assessment of TRMM and GPM-based precipitation products in transboundary river catchment (Chenab River, Pakistan). *Water*, 12(7), 1902. DOI: 10.3390/w12071902
- Agricultural Research Service (ARS), (2022). About AGWA. <https://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/about-agwa/>
- Al-Hamdan, O.Z., Pierson, F.B., Nearing, M.A., Williams, C.J., Hernandez, M., Boll, J., Nouwakpo, S.K., Wertz, M.A., Spaeth, K., (2017). Developing a parameterization approach for soil erodibility for the Rangeland Hydrology and Erosion Model (RHEM). *Trans. ASABE* 60 (1), 85–94. DOI: 10.13031/trans.11559
- Alonso, B. G. R. (2016). Predicción probabilística del escurrimiento superficial y la pérdida de sedimento para eventos extremos. Parte I: Metodología. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 31-42.
- Burns, I., Semmens, D., Scott, S., Levick, L., Goodrich, D., & Kepner, W. (2004). The Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) Tool-Enhanced Capabilities of just released Version 1.4. In *Proceedings Arizona Hydrological Society Symposium* (pp. 5-18). <https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/1705.pdf>
- Chen, Y., Xu, C. Y., Chen, X., Xu, Y., Yin, Y., Gao, L., & Liu, M. (2019). Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models. *Journal of Hydrology*, 573, 486-500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.091
- Fortuño Ibáñez, J., Gómez Valentín, M., & Jang, D. (2021). Application of the KINEROS 2 Model to Natural Basin for Estimation of Erosion. *Applied*

Sciences, 11(19), 9320.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/358194/32289984.pdf?sequence=1>

Goodrich, D.C., Burns, I.S., Unkrich, C.L., Semmens, D.J., Guertin, D.P., Hernandez, M. & Levick, L.R., (2012). KINEROS2/AGWA: model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE* 55 (4), 1561–1574. DOI: 10.13031/2013.42264

Hernández, M., Nearing, M.A., Al-Hamdan, O.Z., Pierson, F.B., Armendariz, G., Weltz, M.A., Spaeth, K.E., Williams, C.J., Nouwakpo, S.K., Goodrich, D.C. & Unkrich, C.L., (2017). The rangeland hydrology and erosion model: a dynamic approach for predicting soil loss on rangelands. *Water Resour. Res.* 53 (11), 9368–9391. <https://doi.org/10.1002/2017WR020651>

Hurtado, P. B., Cohen, I. S., Arriaga, G. E., Valle, M. A. V., & Ibarra, M. A. I. (2013). Caracterización hidrológica para cuencas en zonas áridas en México. *AGROFAZ*, 13(2). https://www.researchgate.net/publication/313596674_Caracterizacion_Hidrologica_para_cuencas_en_zonas_aridas_en_Mexico

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Unión), escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Kautz, M. A., Collins, C. D. H., Guertin, D. P., Goodrich, D. C., van Leeuwen, W. J., & Williams, C. J. (2019). Hydrologic model parameterization using dynamic Landsat-based vegetative estimates within a semiarid grassland. *Journal of Hydrology*, 575, 1073-1086. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.044>

Nearing, M. A., Wei, H., Stone, J. J., Pierson, F. B., Spaeth, K. E., Weltz, M. A., ... & Hernandez, M. (2011). A rangeland hydrology and erosion model. *Transactions of the ASABE*, 54(3), 901-908. DOI: 10.13031/2013.37115

- Ni, S., Huang, X., Gan, W., Zorn, C., Xiao, Y., Huang, G., ... & Silvennoinen, H. (2020). Coupled modelling and sampling approaches to assess the impacts of human water management on land-sea carbon transfer. *Science of the Total Environment*, 701, 134735. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134735
- SWRC-USDA-ARS. (2019a). KINEROS2-A Kinematic Runoff and Erosion Model: <https://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>
- SWRC-USDA-ARS. (2019b). Rangeland Hydrology and Erosion Model Web Tool (RHEM): <https://dss.tucson.ars.ag.gov/rhem/>
- SWRC-USDA-ARS. (2022). The Soil and Water Assessment Tool (SWAT): <https://dss.tucson.ars.ag.gov/rhem/>
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 1-47. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Vázquez Alvarado, A., Ortiz Rodríguez, A. J., Palacio Aponte, Á. G., & Muñoz Robles, C. A. (2018). Escorrentía y producción de sedimentos en encinares incendiados de la Sierra Madre Oriental, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 4-26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.121>
- Xue, F., Shi, P., Qu, S., Wang, J., & Zhou, Y. (2019). Evaluating the impact of spatial variability of precipitation on streamflow simulation using a SWAT model. *Water Policy*, 21(1), 178-196. DOI:10.2166/wp.2018.118
- Yu, D., Xie, P., Dong, X., Hu, X., Liu, J., Li, Y., ... & Xu, S. (2018). Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 5001-5019. <https://hess.copernicus.org/articles/22/5001/2018/hess-22-5001-2018.pdf>

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

IV. CONCLUSIONES

**Doctorado en ciencias en recursos naturales y medio ambiente en zonas
áridas**

La modelación distribuida realizada con el modelo QSWAT y la plataforma AGWA (Kineros y RHEM) ayuda en el entendimiento de la hidrología de la cuenca San Luis del Cordero y la señalización de las áreas claves (escurrimiento y producción de sedimento) de la cuenca. Un método distinto a la modelación distribuida, subdivisión jerárquico o anidado, para abordar la hidrología de la cuenca es el mapeo geomorfológico realizar el estudio de la cuenca a partir de una división de esta en parte alta, media y baja según la función hidrológica que realizar cada unidad.

De la simulación de lluvia, el paso del rodillo aireador disminuye la cobertura vegetal nativa impactando en la biodiversidad de la flora, reduce el escurrimiento superficial con el consecuente aumento en la producción de sedimentos que resulta en la erosión del suelo.

Las conclusiones anteriores refieren a un primer período de tiempo del uso del rodillo aireador, dado que las zonas áridas se caracterizan por un déficit de agua a lo largo del año que dificulta la regeneración vegetal y a su vez la descomposición de la materia orgánica, es necesaria la evaluación a través del tiempo del uso del rodillo aireador en la cuenca ya que la posible regeneración vegetal por la práctica de aireación del suelo y su mayor poder de retención de humedad, combinado con una variación en la climatología del lugar, pueden cambiar los resultados obtenidos en esta investigación.

Durante la modelación, la resolución de los modelos digitales de elevación genera diferencias significativas en la producción de sedimentos, no así para el caso del escurrimiento. Para una cuenca pequeña, es posible hacer uso indistinto de los modelos digitales de elevación en la modelación hidrológica a partir de 30 m de resolución hacia una mayor resolución.

La falta de pluviómetros y aforadores en áreas de la cuenca donde se usó el rodillo aireador, no permitió tener mediadas de escurrimiento y sedimento que pudieran hacer más claro el efecto de cambio de uso de suelo en la cuenca. Por otro lado, el modelo QSWAT, los modelos KINEROS, RHEM y SWAT de la plataforma AGWA, son capaces de modelar la hidrología de la cuenca, permiten visualizar las áreas principales de generación de escurrimiento y sedimentos

para realizar un adecuado manejo de los recursos agua-suelo-vegetación, son un apoyo en la toma de decisiones en el manejo integral de la cuenca San Luis del Cordero.

Sobre las dificultades que tuvieron en la realización de la investigación se recomienda hacer estudios en la cuenca relacionados con el diseño de instrumentación para la medición de variables hidrológicas y la evaluación del proceso de degradación de materia orgánica y flujo de carbono.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN UNA CUENCA
SEMI-INSTRUMENTADA EN ZONAS ÁRIDAS**

V. LITERATURA CITADA

**Doctorado en ciencias en recursos naturales y medio ambiente en zonas
áridas**

- Aglanu, L. M. (2014). Watersheds and rehabilitations measures-a review. *Resources and Environment*, 4(2), 104-114. DOI: 10.5923/j.re.20140402.04
- Alcántara, A., Montalvo, N., Mejía, A., & Ingol, E. (2014). Validación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía para su aplicación a la cabecera de cuenca del río Jequetepeque. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 17(33).
- Alvez-Alvarenga, L. A., Mello, C. R. D., Colombo, A., & Cuartas, L. A. (2017). Performance of a Distributed Hydrological Model Based on Soil and Moisture Zone Maps. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41.
- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Snthi, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N; Jha, MK. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55(4): 1491-1508.
- Benavides Mora, V., Tarlé Pissarra, T. C., & Galbiatti, J. A. (2009). Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño-Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 29(3), 97-101.
- Bolaños González, Martín A., Paz Pellat, Fernando, Cruz Gaistardo, Carlos O., Argumedo Espinoza, Jesús A., Romero Benítez, Víctor M., & de la Cruz Cabrera, Júlio C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288. Recuperado en 21 de octubre de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000300271&lng=es&tlng=es.
- Caciano, R. T., Rodríguez, J. M., Navarrete, J. B., & Cohen, I. S. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextin en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6(1), 91-101.
- Clark, M. P., Slater, A. G., Rupp, D. E., Woods, R. A., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Wagener T. & Hay, L. E. (2008). Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research*, 44(12).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2007). Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Cuarta reimpresión. 298 p.jb
- CONAFOR, SEMARNAT & UACH. (2013). Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final y Anexos I y II. Conafor y UACH. México.
- Cruces-De Abia J. & Martínez-Cortina L. (2006). Modelos matemáticos en hidrología. Master en Ingeniería Medioambiente y Gestión del agua. España.
- Domínguez Calle, E. A. (2010). MODELACIÓN MATEMÁTICA: Una introducción al Método. Pontificia Universidad Javeriana.

- Esquivel Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., & Muñoz Villalobos, J. (2015). Delimitación y análisis morfométrico de tres cuencas del Norte-Centro de México. *Agrofaz*.
- Estrada-Sifontes, V. & Pacheco-Moya R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71-80. Recuperado en 29 de abril de 2018, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008&lng=es&tlng=es.
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., & Bachir, O. A. (2011). Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. *Journal of Geographic Information System*, 3(04), 279.
- Fattorelli S. y Fernández P. (2011). *Diseño hidrológico. WASA-GN, 2º Edición*, Zaragoza, ISBN: 978-987-05-2738-2.
- Feler, M. V., Vazquez-Amabile, G., Meer, H. V., Gaspari, F., Mercuri, P., Prieto, D., & Flamenco, E. (2014). Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca. In *Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (Vol. 2)*.
- Garrido, A., Pérez, J., & Enríquez, C. (2010). Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*. Instituto de Ecología de México Press, México, 14-17.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. I. (2009). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Gaspari. La Plata, 321.
- González-Cervantes, G., Estrada-Ávalos, J., González-Barrios, J. L., Cuento-Wong, J. A., Sánchez-Cohen, I., Castillo-Santillán, G. (2006). Análisis de los factores que afectan la relación precipitación – escurrimiento en una zona semiárida del norte de México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 3. Pp 337-345. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gómez, R. D., Gaspari, F. J., & GeorGieff, S. M. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta geológica lilloana*, 29(1), 3-19.
- Her, Y., Fankenberger, J., Chaubey, I., & Srinivasan, R. (2015). Threshold effects in HRU definition of the soil and water assessment tool. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58 (2), 367-378.
- Hott, M. C., Furtado, A. L. S., Ribeiro, C. A. A. S. (2007). Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas, Sao Paulo., *Memorias del Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Florianópolis*, INPE Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, pp. 3381-3388.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2011). *Censo de Población y Vivienda 2010*. México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015a. Estadísticas a propósito del día mundial del suelo (5 de diciembre): Datos nacionales. Aguascalientes, México, 2 de diciembre de 2015. <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/suelo0.pdf> (Consultado el 15 de octubre del 2018).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015b. Conjunto de datos de erosión hídrica del suelo. Escala 1:250 000. INEGI. Aguascalientes, México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004233>. (Consultado el 15 octubre del 2018).
- Jorquera, E., Weber, J. F., & Reyna, S. M. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.
- Khalid, K., Ali, M. F., Abd Rahman, N. F., Mispan, M. R., Haron, S. H., Abd Rasid, M. Z., ... & Kamaruddin, H. (2016). Application of SWAT hydrologic model in Malaysia: Recent research. The challenges of agro-environmental research in Monsoon Asia, 237-244.
- López, R. F. P., & Patrón, E. R. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- Loizu, J., Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., Chahor, Y., & Brocca, L. (2015). Catorce años de simulación en continuo de caudales horarios en las cuencas navarras de los ríos Cidacos y Arga. Estudio comparativo de dos modelos hidrológicos. IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de octubre 2015.
- Maneta, M.P., Pasternack, G.B., Wallender, W.W., Jetten, V. & Schnabel, S. (2007). Temporal instability of parameters in an event based distributed hydrologic model applied to a small semiarid catchment. *Journal of Hydrology* 341, 207– 221.
- Martínez-Rodríguez J. G., Trucíos-Caciano R., Quiñones- Chávez A. y Reyes-Juárez I. (2008). Modelación de procesos hidrológicos utilizando sistemas de información geográfica. SAGARPA-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Primera edición, ISBN 978-607-425-053-4.
- Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., & Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(1), 83-101.
- Medrano, F. G. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Instituto Nacional de Ecología.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

- Neitsh, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). Herramientas de evaluación de suelo y agua, documentación teórica. Texas AgriLife Research Center Blackland en Temple, Texas, 20-100.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool. Theoretical Documentation version 2009 (618 pp.). Texas: Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Temple, USA: Texas A & M University System. College station.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24).
- Pereira D. R., Almeida AQ, Martínez M. A., Rosa D. R. Q. (2014) Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian East Coast. *Rev Bras Cienc Solo*. 2014; 38:1350-8. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400030>
- Ramírez Cruz, H., López Velasco, O., & Ibáñez Castillo, L. A. (2015). Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 151-159.
- Rankinen, K., T. Karvonen, D. Butterfield. (2006). An application of the GLUE methodology for estimating the parameters of the INCA-N model. *Sci. Total Environ.* , 365(1-3), 123-139.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 141-156. ISSN 2007-2422. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>.
- Sánchez-Lozano J. L. (2017). Modelación hidrológica e Hidráulica acoplada de la Cuenca media y baja del río Magdalena, Colombia (Doctoral dissertation).
- Sedano Cruz, R. K. (2017). Influencia de la variabilidad climática en la modelación estadística de extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia (Doctoral dissertation).
- SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. Semarnat. México.
- Triviño, A. P. y Ortiz, S. R. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas*. 35:67-83.
- Trucios Caciono, R.; Martínez Rodríguez, J. G.; Blando Navarrete, J. L.; Sánchez Cohen, I.; (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextin en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 91-101.

- Torres-Benites, Elibeth; Fernández-Reynoso, Demetrio S.; Oropeza-Mota, José Luis; Mejía-Saenz, Enrique; (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, Octubre-Diciembre, 437-444.
- Universidad Autónoma Chapingo (UACH). (2011). Actualización de la delimitación de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México, a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. México.
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT 2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 1-47.
- Valencia, M. (2008). Modelación Hidrológica Distribuida de Tipo Conceptual, como Elemento para Ordenación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas, Caso de Estudio: Cuenca Hidrográfica del Río La Miel, Departamento de Caldas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.
- Vega–Manganiello, A. C., Quines, V. C., & Guevara, E. (2015). Validación de modelos del proceso lluvia–escorrentía. *Revista INGENIERÍA UC*, 22(3).
- Wigginton, N. S. (2011). A Watershed Moment. *Science*, 332(6029), 514-514.
- Vilchis-Mata, Iván, Bâ, Khalidou M., Franco-Plata, Roberto, & Díaz-Delgado, Carlos. (2015). Hydrological Modeling based on Rainfall Estimates using Hydrometeorological Sensors. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 45-60. Recuperado en 29 de abril de 2018, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400003&lng=es&tlng=en.
- Xu, CY. & Singh, V. (2004). *Water Resour Manage.* 18: 591. <https://doi.org/10.1007/s11269-004-9130-0>
- Zambrano, R. F. V. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *ISSN No. 1390-6143*, 79.
- Zettam, A., Taleb, A., Sauvage, S., Boithias, L., Belaidi, N., & Sánchez-Pérez, J. M. (2017). Modelling hydrology and sediment transport in a semi-arid and anthropized catchment using the SWAT model: The case of the Tafna river (northwest Algeria). *Water*, 9(3), 216.