

## Estimación del escurrimiento superficial utilizando sistemas de información geográfica, caso de estudio: Ciudad de Guanajuato

Delgadillo Ruiz Eladio, Pérez Agreda Leslie Vanessa, Fonseca Gasca Alberto Esaul, Godínez Brizuela Ernesto, Gutiérrez Flores Israel, Mares Ventura Jorge, Sánchez Parra Dulce Fernanda, Cea Barcía Glenda Edith

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Departamento de Ingeniería Civil, Av. Juárez No. 77, Col. Centro, Guanajuato Gto. C.P. 36000, México

### Resumen

Uno de los principales componentes del balance hídrico es el escurrimiento superficial, el cual, la mayoría de las veces es estimado debido a la poca información hidrométrica con la que cuenta el estado de Guanajuato, lo anterior, tiene como consecuencia que las acciones de prevención de eventos hidrometeorológicos extremos que se realicen sean pocas o inexistentes. En particular, la ciudad de Guanajuato, al estar catalogada como ciudad patrimonio cultural de la humanidad requiere de una propuesta de prevención ante posibles inundaciones, en particular, asociadas a la zona sur. El objetivo principal de este estudio fue obtener un modelo hidrológico para la cuenca hidrológica en la cual se encuentra situada la Ciudad de Guanajuato, ya que estos modelos son una opción rápida y de bajo costo para poder estimar en cuencas sin aforos el escurrimiento superficial en un evento de lluvia-escorrentía. Para lograr el objetivo se llevó a cabo una delimitación de la zona de estudio utilizando sistemas de información geográfica en particular de los programas de cómputo ArcGis y Qgis, para lo cual se utilizaron las características físicas actuales de la vegetación y de los suelos para poder construir el modelo hidrológico y con ello estimar el escurrimiento superficial utilizando las propuestas del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos y del método racional. Algunos de los datos de entrada que se requieren para la obtención del volumen de escurrimiento son las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, asociadas al tiempo de concentración de la cuenca y diversos periodos de retorno. Como resultados se obtuvieron datos de escurrimiento asociados al cambio de uso de suelo actual sobre todo en la parte sur de la ciudad.

**Palabras clave:** balance hídrico, precipitación, escurrimiento superficial.

### Introducción

El agua es un recurso que está siendo utilizado por la humanidad de una manera muy irresponsable, provocando que la disponibilidad del agua de buena calidad sea cada vez menor. Preservar el recurso hídrico es una prioridad respecto al cuidado de los recursos naturales a nivel mundial, distintas cuencas hidrográficas cuentan con riqueza natural asociada directamente a la disponibilidad de agua, de la cual hacen uso los seres humanos y ecosistemas que integran esta área natural. Por lo tanto, toda cuenca es estrictamente diferente, tiene características únicas, por lo que, el acceso y disponibilidad de la información hídrica de estas zonas es importante en las diferentes estaciones climáticas del año ya que se afecta de diferente manera a las cuencas, subcuencas o microcuencas (Flores-López et al., 2003).

El balance hídrico es uno de los principales métodos utilizados para determinar el volumen de agua que se traslada desde el punto más alejado de la cuenca hasta un punto de salida, generalmente el componente principal de entrada al sistema es la precipitación y dejamos como datos de salida la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, la infiltración y el cambio de almacenamiento. Tomando en cuenta el régimen climático de la zona, la lluvia define en la mayoría de las cuencas de manera directa el comportamiento de los flujos superficiales, por lo que en este tipo de modelos de balance hídrico se deja como incógnita de cálculo el escurrimiento superficial (Bohn & Campo, 2010).

Para poder realizar un balance hídrico primero tenemos que saber que es, el balance hídrico es un método para conocer el comportamiento hídrico natural que se tendrá en una zona de estudio determinada obteniendo así la época de sequías y excesos hídricos, esto se logra cuantificando las entradas y salidas del sistema suelo-ambiente considerando datos como lo son las precipitaciones, evapotranspiración potencial, así como la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Vargas et al., 2012). El aplicar balances hídricos anuales nos permite conocer o cuantificar los fenómenos hidrológicos de una cuenca como lo son la precipitación, evapotranspiración y escorrentía, todo esto es con el fin de obtener un conocimiento más completo de la cuenca, ya que también se obtiene la variación mensual de los almacenamientos de dicha cuenca. Sin embargo, no siempre es posible obtener la cantidad de información para el

balance, por ello se hace uso de modelos hidrológicos que permiten suplir la falta de datos y continuar el proceso esperando con el tiempo ir validando dichos resultados (Ruiz-Álvarez et al., 2012).

Por esta razón es necesario conocer el estado actual de consumo de agua de la población y la disponibilidad de este. Esto permitirá diseñar estrategias y medidas para cuidar el agua considerando la actual situación y los problemas a futuro. El balance hídrico está enfocado en registrar que cantidad de agua se obtiene de un entorno y buscar un equilibrio entre el ecosistema natural y las necesidades, humanas. Para realizar un balance hídrico existen distintos métodos, uno de ellos y más utilizados es el establecido por Thornthwaite & Mather (1955), mismo que aplico Ferguson en 1996. Para ejecutar ese método se utilizó la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA), el promedio de precipitaciones determinado en cierto periodo de tiempo (PP) y la Temperatura (T), gracias a la temperatura se puede determinar la evapotranspiración. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) sugiere un periodo de mínimo 30 años de información climática a lo que distintos autores concuerdan.

Dentro de los componentes del balance hídrico superficial, la medición o estimación del escurrimiento forma parte primordial en la determinación del volumen de agua disponible para poder llevar a cabo el diseño de la mayoría de las obras hidráulicas, para realizar acciones de conservación, para estimar aspectos económicos y sobre todo para la evaluación del uso del suelo dentro de las cuencas hidrológicas (Flores-López et al., 2003). El escurrimiento superficial está en función de muchos factores físicos tales como el uso y tipo de suelo presentes en la cuenca, la intensidad de las precipitaciones, las características físicas, la evapotranspiración, entre otros (Ares et al., 2012). En general, el escurrimiento superficial constituye uno de los elementos que provocan algunos problemas ambientales en las cuencas hidrológicas, como por ejemplo el acarreo de sedimentos, la erosión hídrica del suelo, aumento del caudal y el transporte y mezcla de otros contaminantes en el agua (Francisco-Nicolás et al., 2010).

Las prioridades mundiales en el ámbito de la conservación de recursos es el aprovechamiento racional y manejo de recursos hídricos, dentro del ciclo hidrológico sobresale el escurrimiento superficial y la infiltración del agua de lluvia que condicionan la planificación de recursos hídricos a nivel cuenca y conducción de estos. El escurrimiento superficial es un problema ambiental ya que provoca la erosión del suelo, aumento de caudal, carga de sedimento y contaminantes, dentro de las soluciones se presentan los sistemas agroforestales, disminuyendo la pérdida de suelo y nutrientes de estos. La colocación de dosel vegetal en sistemas de cultivo y arboles perennes pueden reducir la velocidad de caída e impacto de las gotas de lluvia. Dentro de las prácticas de conservación del suelo y agua se encuentra el establecimiento de barreras vivas y terrazas que atrapen el escurrimiento, sedimentos y nutrientes (Andriani et al., 2016).

El uso del suelo en el medio urbano provoca un aumento del área impermeable lo que provoca un aumento del escurrimiento superficial. Algunas ciudades aceptan que existe la manera de cambiar el paradigma del drenaje urbano, proponiendo un nuevo enfoque el cual se basa en controlar el volumen, caudales máximos y contaminación de la fuente, con el cual se espera minimizar el cambio hidrológico y causas negativas en el proceso de urbanización. Para el diseño de esta urbanización el aspecto fundamental es considerar el aumento de la intensidad de las lluvias como una parte de la variabilidad climática que sucede en muchas ciudades. Desde el punto de vista hidrológico lo que se busca es minimizar la escorrentía urbana, favorecer la captura y almacenamiento del agua para de esta forma reducir la contaminación provocada por el escurrimiento superficial, así como disminuir el impacto de los cuerpos receptores acuáticos, la colocación de fuentes de infiltración en zonas altas de las ciudades permite retener el escurrimiento al centro de las ciudades (Armson et al., 2013).

La modelación del escurrimiento superficial nos permite conocer el comportamiento temporal, existe un consenso entre científicos que el manejo de recursos hídricos debe realizarse desde la perspectiva de una cuenca, subcuenca o microcuenca, dependiendo del tipo y objetivos de estudio, por ejemplo, la cuenca se considera como unidad de planeación. La modelación de procesos hidrológicos se ha facilitado con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitiendo el estudio de diversas variables de patrones espaciales y temporales, dentro de las modelaciones se encuentra los escurrimientos naturales del agua de lluvia, delimitación de unidades de drenaje, flujo y dirección de corrientes a nivel cuenca, subcuenca o microcuenca. Respecto a la cuantificación de escurrimiento superficial existen diversos métodos de cálculo desde los más fáciles hasta los más complejos, entre los más sencillos se encuentra el Método Racional, el cual requiere los coeficientes de escurrimiento, estimados mediante la metodología propuesta por Prevert, dicho método y coeficientes de escurrimiento fueron seleccionados por la simplicidad en la modelación a través de SIG, en la valoración de la producción del agua en la zona, una de las variables de entrada fundamental es el uso actual del suelo y la modelación de escenarios a futuro, entre ellos están los grados de deforestación y los problemas causados por el hombre. También tenemos bases de datos complejos o fáciles de interpretar, donde varios autores señalan el uso de métodos multivariados los cuales permiten reducción de resultados y una fácil interpretación (Delgado, 2013).

En este estudio se tomaron en cuenta los diferentes usos y tipos de suelo para poder estimar un coeficiente de escurrimiento ponderado para el área de estudio, luego aplicamos sistemas de información geográfica para poder llevar a cabo una regionalización de las características físicas de la cuenca y del coeficiente de escurrimiento. Por último, aplicamos el modelo de Tr55 del Servicio de Conservación del Suelos de Estados Unidos y el método racional para estimar el escurrimiento superficial en la ciudad de Guanajuato y que sirva de base para poder identificar en posteriores estudios las zonas de posible inundación (Lorenzo & García, 2011).

## Metodología

### Delimitación de la zona de estudio

En esta parte de la metodología se utilizan los sistemas de información geográfica para delimitar el área de estudio, con ayuda de los programas de cómputo ArcGis y Qgis, apoyados de las herramientas de análisis espacial e hidrología, se llevará a cabo la delimitación de la cuenca de estudio a partir del mapa de las curvas de nivel a una escala de 1:25000. El sistema realizará un modelo digital de elevaciones en el cual se obtendrán los mapas de pendiente, los cauces principales y la longitud de estos.

El municipio de Guanajuato, que es capital del estado de Guanajuato se encuentra ubicado entre los paralelos 21°14' y 20°49' de latitud norte; entre los meridianos 101°03' y 101°27' de longitud oeste; con una altitud entre 1700 y 3000 metros sobre el nivel del mar. El municipio tiene colindancia con los municipios de Dolores Hidalgo y San Felipe al norte, al este está colindando con el municipio de Dolores Hidalgo, nuevamente; al oeste colinda con los municipios de León y Silao (Figura1). La Fisiografía del municipio es localizada en la Mesa del Centro (78.4%) y el Eje Neovolcánico (21.6%). El rango de temperatura y de precipitación media anual con el que cuenta el municipio son de 12–20 °C y de 600–900 mm, y maneja una región hidrológica conocida como Lerma–Santiago (100%), cuya cuenca está definida por Río Lerma–Salamanca (73.9%) y Río Laja (25.5%) (INEGI,2009).

### Determinación del coeficiente de escurrimiento

En el área de estudio el uso de suelo no es uniforme, por lo que existen polígonos de superficie habitacional, zonas pavimentadas, parques, entre otras, que retienen diferente cantidad de agua debido a su capacidad de infiltración y de escurrimiento. Por lo tanto, se llevará a cabo una delimitación de polígonos en función del uso de suelo actual, para determinar el coeficiente C de escurrimiento en la cuenca urbana utilizando una media ponderada, con estos mismos polígonos se determinará el número de curva asociada al uso de suelo y vegetación requeridos para el modelo propuesto por el Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos de América.

### Análisis y recopilación de datos de precipitación

En el caso de la precipitación, se utilizará información de registros obtenidas de estaciones tipo tradicional administradas por diferentes organismos gubernamentales como el Servicio Meteorológico Nacional, el Observatorio meteorológico de Guanajuato y Universidad de Guanajuato, las cuales ayudan en el registro de datos de velocidad y dirección del viento, precipitación, humedad relativa, y temperatura ambiente. Dentro de la cuenca se encuentran instaladas 7 estaciones climatológicas tradicionales de las cuales se obtuvieron los datos de precipitación máxima en 24 horas, luego se aplicaron algunos modelos de distribución probabilístico para determinar la precipitación para el tiempo de concentración de la cuenca y a diferentes periodos de retorno.

### Determinación de las curvas IDTr

Se llevará a cabo la obtención de las curvas IDTr para la cuenca de estudio y asociadas al tiempo de concentración de la cuenca el cual se estimó mediante el método de Kirpich, la determinación de estas curvas para periodos de retorno menores a 10 años se realizará mediante el método de Bell y para periodos de retorno mayores a 10 años se utilizará el método de Chen Lung Chen, en los cuales se aplicarán los parámetros regionales propios de las ecuaciones características de estos métodos. Finalmente, mediante el uso de ArcGis se realizarán interpolaciones con el método IDW para poder establecer la precipitación probable para diferentes periodos de retorno y para una duración asociada al tiempo de concentración.

## Obtención del modelo hidrológico

El modelo hidrológico se llevó a cabo siguiendo la metodología de García y Conesa (2011), el cual se basa en la obtención de diferentes características físicas del suelo para determinar las subcuencas dentro de un área total de la cuenca de estudio, luego aplicando el método racional se obtendrá una primera estimación de escurrimiento superficial, para después ser comparado con el método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) de Estados Unidos que emplea el número de curva asociado al tipo de uso de suelo presente en la zona.

## Resultados

### Delimitación de la zona de estudio

En esta parte de los resultados se utilizaron los sistemas de información geográfica para delimitar el área de estudio, con ayuda de los programas de cómputo ArcGis y Qgis, en conjunto con las herramientas de análisis espacial e hidrología. En la figura 1 se muestra la delimitación obtenida mediante SIGs tomando como punto de salida la cortina de la presa la Purísima, geográficamente esta cuenca se encuentra en la parte central del estado de Guanajuato e incluye por completo la superficie de la ciudad de Guanajuato, en la figura 2 se muestra una ubicación espacial de la cuenca tomando como referencia una imagen satelital de fondo en color azul se muestra la delimitación obtenida por medio de ArcGis y en color rojo la delimitación obtenida por Qgis.



Figura 1. Ubicación de la cuenca de estudio Guanajuato México, punto de salida: presa la Purísima.



Figura 2. Ubicación espacial de la cuenca de estudio Guanajuato México

### Determinación del coeficiente de escurrimiento

Se llevó a cabo una delimitación de polígonos en función del uso de suelo actual, para determinar el coeficiente de escurrimiento en la cuenca de estudio utilizando una media ponderada en función del área de cada polígono, obteniendo un mapa de distribución del coeficiente C como se muestra en la figura 3, en la cual se observa que se presentan en mayor superficie zonas de pastizal con erosión, esto debido a las altas pendientes presentes en la cuenca. De manera similar, en la Figura 4 se muestra la distribución espacial del Número de Curva CN con base al uso de suelo y vegetación en la zona de estudio. Estos dos coeficientes nos ayudaron en la determinación del escurrimiento superficial a la salida de la cuenca.



Figura 3. Coeficiente C con base al Uso de suelo y vegetación de la cuenca de estudio Guanajuato México



Figura 4. Numero de Curva CN con base al Uso de suelo y vegetación de la cuenca de estudio Guanajuato México

## Análisis y recopilación de datos de precipitación

En el caso de la precipitación se utilizó la información de registros obtenidas de estaciones tipo tradicional administradas por diferentes organismos gubernamentales como el Servicio Meteorológico Nacional, Observatorio meteorológico de Guanajuato y Universidad de Guanajuato, las cuales ayudan en el registro de datos de velocidad y dirección del viento, precipitación, humedad relativa, y temperatura ambiente. Dentro de la cuenca se encuentran instaladas 5 estaciones climatológicas tradicionales y 2 en la periferia a una distancia de menos de 10 km, de las cuales se obtuvieron los datos de precipitación diaria registrada, a manera de ejemplo, en la tabla 1 se muestra un resumen de los parámetros estadísticos de la estación Calderones, luego en la tabla 2 se muestran los diferentes métodos de ajuste para la información obtenida de precipitación, en el ejemplo de la estación de Calderones podemos observar que el método Normal es el que presenta menor error estándar por lo que se elige para la estimación de la precipitación.

Tabla 1. Resumen de parámetros estadísticos de la estación Calderones.

Datos Paramétricos Estación Calderones	
Número de datos:	671.00
Media de precipitaciones:	65.43
Desviación estándar de las precipitaciones:	22.08
Media de los logaritmos de las precipitaciones:	4.10
Desviación estándar de los logaritmos de las precipitaciones:	0.49

Tabla 2. Métodos de ajuste para la estación Calderones.

Error estándar	
Método	Error estándar
Nash	8.58
Gumbel	5.24
Exponencial con b y x0	13.26
Log Normal 2	5.33
Gamma 2	4.52
Normal	3.81
Exponencial con b	40.11

### Obtención de las curvas IDTr

Luego en la Figura 5 se observa la estimación de los datos de lámina de precipitación (HP) correspondientes a cada uno de los periodos de retorno con diferentes intervalos de duración del evento de precipitación probable para la estación 11007 en particular. Finalmente, la Figura 6 muestra una gráfica de las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (IDTr) para la estación 11007, cabe mencionar que este proceso se realizó para cada una de las 7 estaciones que se encuentran dentro de la cuenca, con la finalidad de encontrar una intensidad generalizada para la cuenca, utilizando el método de isoyetas de ArcGIS e igualando el tiempo de concentración obtenido con el método de Kirpich con la duración de la tormenta en un periodo de retorno de 10 años.

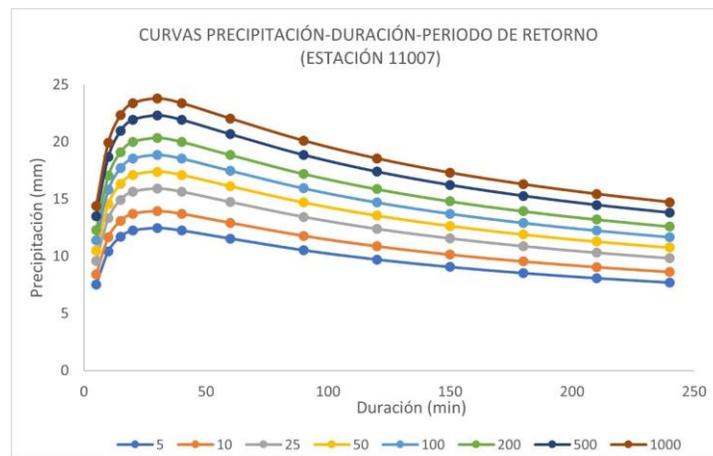


Figura 5. Lámina de precipitación para la estación 11007.

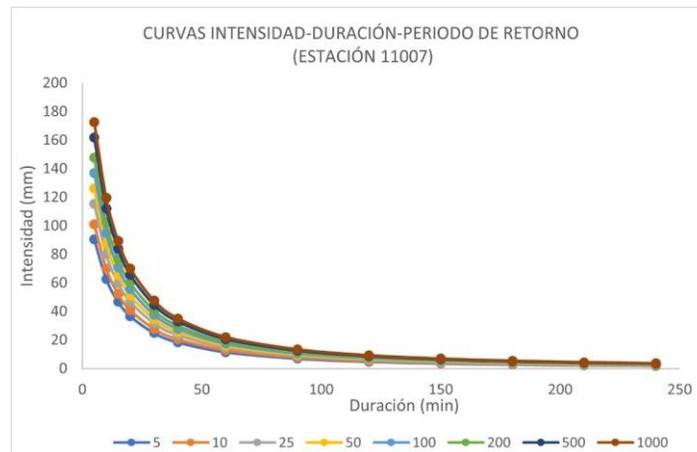


Figura 6. Curvas IDTr para la estación 11007.

### Obtención del modelo hidrológico

El modelo hidrológico se llevó a cabo siguiendo la metodología de García y Conesa (2011), el cual se basa en la obtención de diferentes características físicas del suelo para determinar las subcuencas dentro de un área total de la cuenca de estudio, luego aplicando el método racional y el método Tr 55 propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de USA se determinaron utilizando las características físicas de la cuenca obtenidas mediante el ArcGis, como lo fueron el área, las longitudes de cauce, las pendientes y aplicando el método de Kirpich se obtuvieron el tiempo de concentración para cada una de las subcuencas. En la tabla 3 se muestra un resumen de datos obtenidos con la aplicación de los modelos indicados anteriormente.

Tabla 3. Datos de estimación del escurrimiento superficial para la cuenca de estudio.

Método	Condiciones de suelo	Tc Kirpich	Intensidad (mm/hr)	Escurrimiento $\frac{m^3}{s}$
Racional	$C_{ponderado} = 0.36$	206.57 min	24.82	1223.735
Tr 55 SCS	$CN_{ponderada} = 66.24$	206.57 min	5.23	1019.496

### Conclusiones

La utilización de los sistemas de información geográfica en conjunto con un modelo de estimación del caudal que pasa por una corriente superficial son actualmente el medio más efectivo para poder conocer el volumen de agua que pasa por un punto en particular de una cuenca hidrológica, sobre todo, cuando se tiene una diferencia significativa en las áreas correspondiente a diferentes tipos y usos de suelo.

La obtención de los diferentes polígonos de superficie correspondientes a cada uno de los usos de suelo y vegetación presentes en una cuenca hidrológica de estudio, dan mayor certeza al cálculo del escurrimiento superficial ya sea que se encuentren asociados al coeficiente de escurrimiento C del método racional o al número de curva del modelo Tr55 del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos, por lo tanto, se requiere del empleo de imágenes de satélite lo más actuales posibles, para asegurar la delimitación de cada uso de vegetación y de suelo.

Los resultados obtenidos de este estudio ayudaran a identificar las zonas dentro de la ciudad con posibilidades de inundaciones lo que ayudará a que se elabore un esquema de prevención ante escenarios de eventos extremos de precipitación. Actualmente las precipitaciones ocurren con mayor intensidad con una duración menor lo que ocasiona que el proceso de infiltración se vea reducido y que el componente de escurrimiento superficial aumente aunado al cambio constante del uso de suelo en la cuenca hidrológica, el cual cada año representa mayor superficie de tipo urbano debido al crecimiento poblacional de la zona.

## Bibliografía/Referencias

- Andriani, J. M., Magnano, L., & Sanmarti, N. (2016). *Modelo «Cuanti-Cualitativo» de escurrimiento superficial del agua en suelos agrícolas de la región Pampeana Argentina*. 10.
- Ares, M. G., Chagas, C., & Varni, M. (2012). *Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada*. 11.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 282–286. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.001>
- Bohn, V. Y., & Campo, A. M. (2010). *Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas no aforadas en Corrientes, Argentina*. 12.
- Delgado, M. I. (2013). *Tendencia de cambio espacio—Temporal del escurrimiento superficial*. 2, 11.
- Flores-López, H. E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K. F., Ruiz-Corral, J. A., Martínez-Sifuentes, J. A., & Díaz-Mederos, P. (2003). *Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca el Jihuitle, México*. 13.
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., & Martínez-Menes, M. R. (2010). *Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México*. 8.
- Lorenzo, R. G., & García, C. C. (2011). Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e hidráulicos y técnicas s.i.g., estudio aplicado al LITORAL SUR DE LA REGIÓN DE MURCIA. *Papeles de Geografía*, 17.
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., Capurata, R. O., & López-López, R. (2012). *BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL ESTADO DE TABASCO, MÉXICO*. 14.
- Vargas, J., De La Fuente, L., & Arumí, J. L. (2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *Obras y proyectos*, 12, 32–41. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000200003>