

Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México

Morphometric analysis of El Salto watershed, Durango, México

América Guadalupe Méndez-Gutiérrez¹ , Sacramento Corral-Rivas^{1*} ,
Juan Abel Nájera-Luna¹ , Francisco Cruz-Cobos¹  y Marín Pompa-García² 

¹ Programa de Maestría en Ciencias en Desarrollo Forestal Sustentable, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de El Salto. Calle Tecnológico 101, Col. La Forestal, El Salto. 34942 Pueblo Nuevo, Durango, México.

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n, Col. Valle del Sur, Victoria de Durango. 34120 Durango, Durango, México.

*Autor para correspondencia (sacra.corral@gmail.com)

RESUMEN

El manejo integral de las cuencas hidrográficas requiere una caracterización adecuada para identificar su problemática ambiental y consecuentemente establecer los lineamientos de solución pertinentes. El presente estudio describe detalladamente las características morfométricas e hipsométricas de la cuenca El Salto, Durango. A través de un Sistema de Información Geográfica y robustecido con datos de campo, se analizaron parámetros de forma, relieve y red hidrográfica; además, se realizó la curva hipsométrica y se calculó la integral hipsométrica para determinar la fase evolutiva de la cuenca. Los resultados sugieren que la cuenca es alargada, además el relieve evidencia un desnivel bajo (303 m) con una pendiente media de 2.23% considerada como moderadamente inclinada. La red de drenaje es considerada de cuarto orden, y está formada por 94 cauces cuya longitud total es 90.53 km. La densidad e intensidad de drenaje presentaron valores de 2.02 km/km² y 1.04 km respectivamente, con una frecuencia de corrientes de 2.09 cauces/km²; éstos valores se consideran bajos para cuencas con estas dimensiones. De acuerdo al valor de la integral hipsométrica (0.5), la cuenca se encuentra en la fase de equilibrio o madurez. El orden de corrientes que predomina es 1, por lo que la cuenca es más susceptible a presentar erosión hídrica durante los eventos de lluvia. Por otro lado, debido a la forma alargada de la cuenca esta debería ser menos susceptible a presentar

inundaciones; sin embargo, se observaron valores bajos de densidad e intensidad de drenaje y frecuencia de corrientes, lo cual sugiere que el escurrimiento no es eficiente. Este estudio será útil para el desarrollo de proyectos de manejo y conservación de los recursos naturales, en especial para aquellos cuyo objetivo sea reducir la pérdida de suelo por erosión y realizar acciones de captación de agua.

Palabras clave: curva hipsométrica, SIG.

SUMMARY

The integral watershed management requires an adequate characterization to identify related environmental problems and, consequently, to establish the pertinent solution guidelines. This study describes in detail the morphometric and hypsometric characteristics of El Salto watershed, Durango. This research was conducted by using a “Geographical Information System” which was strengthened with field data, shape parameters, relief and the hydrographic network were analyzed. In addition, the hypsometric curve was performed, and the hypsometric integral was calculated to determine the evolutionary phase of the watershed. The results suggest that the watershed is elongated; in addition, the relief shows a low slope (303 m) with an average slope of 2.23%, it considered moderately inclined. The drainage network is considered as fourth order; it is formed by 94 channels

Cita recomendada:

Méndez-Gutiérrez, A. G., Corral-Rivas, S., Nájera-Luna, J. A., Cruz-Cobos, F. y Pompa-García, M. (2021). Análisis morfométrico de la cuenca El Salto, Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-11. e641. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.641>

Recibido: 29 de septiembre de 2019. Aceptado: 21 de abril de 2021.
Artículo. Volumen 39, mayo de 2021.

with a 90.53 km total length. Density and intensity drainage showed values of 2.02 km/km² and 1.04 km, respectively, with a current frequency of 2.09 channels/km²; these are considered low values for watersheds with these dimensions. According to the value of the hypsometric integral (0.5), the watershed is in an equilibrium or maturity phase. The prevailing order of currents is 1, thus, the watershed is more susceptible to water erosion during rain events. On the other hand, due to the elongated shape of the watershed, it should be less susceptible to flooding, however, low values in density and intensity of drainage and frequency of currents were observed, it suggest that the runoff is not efficient. This study will be useful for the development of projects focused on management and conservation of natural resources, especially those aiming to reduce the loss of soil by erosion and to prescribe actions to water catchment.

Index words: *hypsometric curve, GIS.*

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua dulce que demanda la sociedad para usos domésticos, agrícolas e industriales depende de los caudales que se producen y regulan en las cuencas hidrográficas. La cuenca es reconocida como la unidad territorial más adecuada para el manejo integral de los recursos hídricos y forestales; en ella los sistemas físicos, bióticos y socioeconómico se encuentran interrelacionados (Dourojeanni, Jouravlev y Chávez, 2002). La descripción de las características geomorfológicas de una cuenca, puede obtenerse a través de técnicas morfométricas e hipsométricas. Es muy útil para estudios con modelos hidrológicos, priorización de las subcuencas de aporte, conservación y restauración de los recursos naturales (Choudhari, Nigam, Singh y Thakur, 2018).

El análisis morfométrico permite medir y analizar cuantitativamente la forma, estructura y extensión de las cuencas. Resulta determinante para comprender la relación entre las características geohidrológicas del terreno y sus respectivos patrones de flujo. Ello permite determinar el grado de infiltración y escorrentía en la cuenca, así como la producción y el transporte de sedimentos. Estas variables recobran importancia en la conservación de los recursos naturales (Asfaw y Workineh, 2019).

Por su parte, el análisis hipsométrico utiliza como parámetro la integral hipsométrica (*Hi*), cuyo valor indica la etapa de desarrollo geológico de una cuenca (Said, Siddique y Shakeel, 2018); la técnica ha sido desarrollada y dirigida para evaluar la tasa de erosión de las cuencas, las etapas geomórficas de la evolución del paisaje y los procesos de disección y, más en general, para identificar y explicar los procesos de denudación en una región (Siddiqui y Soldati, 2014). Recientemente, con el avance de las técnicas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Percepción Remota (PR), la estimación de parámetros morfométrico e hipsométrico de las cuencas resulta mucho más fácil debido al ahorro de tiempo e incremento en la precisión.

En la actualidad, es necesario realizar el ordenamiento y uso racional de los recursos naturales disponibles en las cuencas hidrográficas para evitar que las actividades socio-económicas provoquen más cambios irreversibles en los ecosistemas, debiendo encaminar dichas acciones al crecimiento sostenible (Gaspari, Delgado y Denegri, 2009). La gestión de las cuencas hidrológicas forestales de la Sierra Madre Occidental requiere de herramientas cuantitativas que caractericen de una manera eficiente sus atributos (p.ej.: relieve, forma y red de drenaje de las principales áreas de aportación de los escurrimientos superficiales); sin embargo, a la fecha, no se han realizado estudios de esta índole para la región forestal del sur del estado de Durango. Los trabajos reportados se refieren únicamente a cuencas de gran escala de paisaje (Meza-Rodríguez y Martínez-Rivera, 2010; Salas-Aguilar, Pinedo, Viramontes, Báez y Quintana, 2011), que difícilmente son útil para resolver problemas de planificación y manejo de los recursos hidrológicos y ordenamientos del territorio a nivel municipal.

La cuenca El Salto abastece de agua a la ciudad del mismo nombre (El Salto, Pueblo Nuevo, Durango), localizada dentro de sus límites y es la quinta ciudad más poblada a nivel estatal, cuya población corresponde a 26 678 habitantes que representa el 52.04% del total municipal (INEGI, 2021). A pesar de contar con dos presas (La Rosilla I y II), para el abasto de agua de uso doméstico e industrial, durante varios años la población ha sufrido de escasez de este vital líquido; por lo que es de suma importancia generar información que permita caracterizar a detalle esta cuenca y con ello establecer líneas de acción para conservar los recursos hidrológicos. En este contexto, la hipótesis planteada

es que el presente estudio contribuye a mejorar el entendimiento de los procesos hidrogeográficos para favorecer el desarrollo de planes de manejo y conservación de los recursos naturales.

Los objetivos del presente estudio son; (i) determinar los parámetros morfométricos a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con la integración de técnicas de PR y SIG y, (ii) evaluar los parámetros hipsométricos para obtener información útil sobre el tipo de conformación de los procesos de erosión en la cuenca El Salto, Durango.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca El Salto, se localiza en el municipio de Pueblo Nuevo al suroeste del estado de Durango, México; concretamente, en la parte alta de la región hidrológica número 11 (Presidio – San Pedro), entre las coordenadas 23° 40' 30" y 23° 46' 54" N, y 105° 25' 19" y 105° 21' 42" O (Figura 1). Comprende una superficie de 44.87 km² con un rango de altitud que oscila entre 2557 y 2860 m y forma parte de la Sierra

Madre Occidental (SMO) dentro de la subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses (INEGI, 2001).

El clima que prevalece es $C(E)(W_2)$ correspondiente a semifrío subhúmedo con temperaturas que oscilan entre -16.5 °C como mínima en el mes de diciembre, hasta los 33 °C en los meses de abril y mayo, con un régimen de precipitación media anual que varía de 500 a 1500 mm (García, 2004). El tipo de vegetación predominante corresponde a bosques mezclados con especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*, principalmente.

Datos

El presente estudio utilizó como información base el Mapa Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), cuya resolución espacial es 15 m por pixel; generado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013). El procesamiento de la información para delimitar la cuenca de drenaje se realizó mediante el software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2011), haciendo uso de la herramienta Hydrology (módulo Spatial Analysis) (Figura 2).

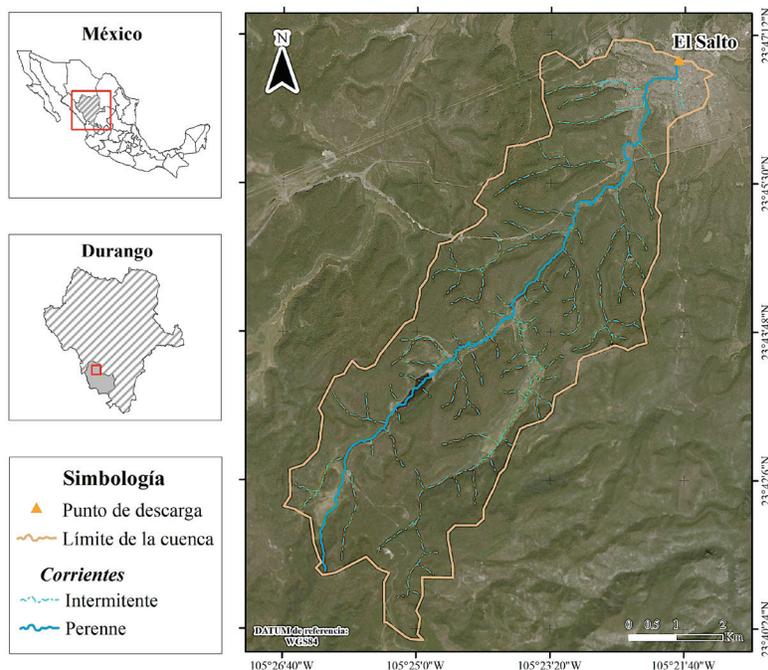


Figura 1. Ubicación del área de estudio, cuenca El Salto, Durango, México (Fuente: Elaboración propia).

Figure 1. Location of the study area, El Salto watershed, Durango, Mexico (Source: Author design).

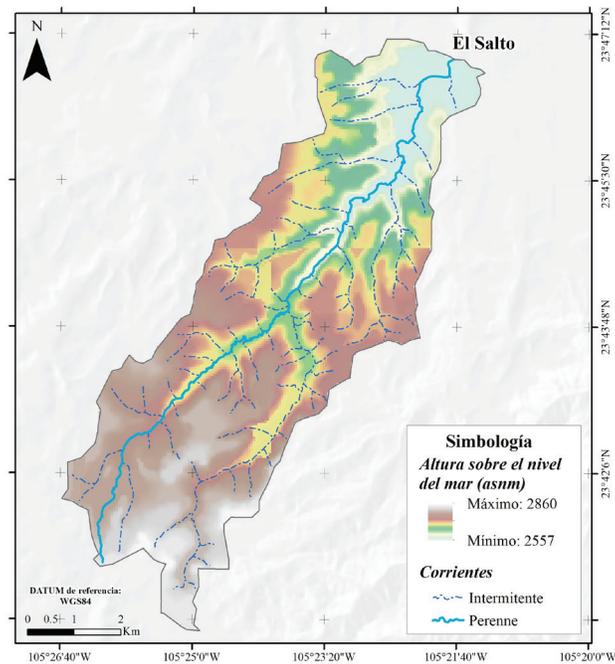


Figura 2. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca El Salto, Durango, México (Fuente: Elaboración propia).
Figure 2. Digital Elevation Model (DEM) of El Salto watershed, Durango, Mexico (Source: Author design).

Análisis Morfométrico

Se integraron los datos vectoriales y ráster de la cuenca al software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2011). Mediante el entorno SIG se determinaron los siguientes parámetros de la cuenca: siendo básicos (área, perímetro, longitud y ancho), cota mínima y máxima, orden de corrientes y número de cauces, longitud del cauce principal y longitud total de las corrientes de la red de drenaje; en tanto, otros parámetros relacionados a la forma, relieve y red de drenaje se obtuvieron mediante las fórmulas que los definen, mismas que se describen detalladamente en los Cuadros 1 y 2.

Análisis Hipsométrico

Para elaborar la curva hipsométrica de la cuenca, se reclasificó el rango altitudinal del MDE en intervalos iguales (25 m) mediante el software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2011), posteriormente el archivo generado se convirtió a topología de polígono para calcular el área dentro de cada intervalo, la curva hipsométrica se creó graficando el área acumulada (%) en el eje de las abscisas y la elevación media (m) en el eje de las ordenadas.

Para estimar la integral hipsométrica (H_i) se utilizó el método de relación elevación-relieve propuesto por Pike y Wilson (1971), cuya expresión es la siguiente Ecuación (1):

$$E \approx H_i = \frac{(Elev_{prom} - Elev_{mín})}{(Elev_{máx} - Elev_{mín})} \quad (1)$$

donde: E es la relación elevación-relieve equivalente a la integral hipsométrica H_i ; $Elev_{prom}$ es la elevación media ponderada de la estimación de la cuenca a partir de los contornos identificables de los intervalos altitudinales, $Elev_{mín}$ y $Elev_{máx}$ son las elevaciones mínima y máxima dentro del intervalo altitudinal respectivamente.

Existen tres criterios para determinar la fase evolutiva en la que se encuentran las cuencas, siendo los siguientes: (i) la cuenca se encuentra en desequilibrio (fase juvenil), si el valor de H_i es ≥ 0.60 ; (ii) se considera que la cuenca ha alcanzado la etapa de equilibrio, si H_i se encuentra dentro del rango 0.30 y 0.60; y (iii) la cuenca se encuentra en etapa de vejez si H_i es ≤ 0.30 (Martínez-Ramírez, Steinich y Tuxpan, 2017).

Cuadro 1. Fórmulas para calcular los parámetros morfométricos de la cuenca y sus valores observados.
Table 1. Formulae to calculate watershed morphometric parameters and their observed values.

No.	Parámetro	Fórmula y descripción	Referencia	Valor
Básicos				
1	Área de la cuenca (A , km^2)	Área total de la cuenca de aportación	Horton (1945)	44.87
2	Perímetro de la cuenca (P , km)	Longitud de la línea divisoria que rodea la cuenca	Schumm (1956)	39.09
3	Longitud de la cuenca (Lb , km)	Distancia entre la salida y el punto de descarga de la cuenca	Schumm (1956)	13.57
4	Ancho máximo de la cuenca (As , km)	Distancia horizontal de la dimensión más larga de la cuenca perpendicular a la línea de la corriente principal	Cruz-Romero, Gaspari, Rodríguez, Carrillo y Téllez (2015)	5.15
Forma				
5	Factor de forma (R_f)	$R_f = A / (Lb)^2$	Horton (1932)	0.24
6	Relación de elongación (Re)	$Re = (2 / Lb) * (A / \pi)^{0.5}$	Schumm (1956)	0.56
7	Relación de circularidad (Rc)	$Rc = 4\pi * (A / P^2)$	Miller (1953)	0.37
8	Constante de compacidad (Cc)	$Cc = 0.2821 * (P / A^{0.5})$	Horton (1945)	1.65
Relieve				
1	Altitud mínima (h , $msnm$)	Elevación mínima de la cuenca	Horton (1932)	2557
2	Altitud máxima (H , $msnm$)	Elevación máxima de la cuenca	Horton (1932)	2860
3	Desnivel (R , $msnm$)	$R = H - h$	Horton (1932)	303
4	Relación de relieve (Rh)	$Rh = R / Lb$	Schumm (1956)	0.02
5	Número de robustez (Rn)	$Rn = R * Dd$	Melton (1957)	0.61
Red hidrológica				
14	Orden de corrientes (u)	Orden jerárquico	Strahler (1964)	4
15	Número de cauces (Nu)	Orden jerárquico	Horton (1945)	94.00
16	Frecuencia de corrientes (Fs , número de corrientes / km^2)	$Fs = Nu / A$	Horton (1945)	2.09
17	Longitud del cauce principal (Ls , km)	Longitud del cauce principal desde su origen hasta desembocadura	Cruz-Romero <i>et al.</i> (2015)	16.87
18	Longitud total de las corrientes (Lu , km)	Longitud total de los cauces presentes en la red de drenaje	Horton (1945)	90.53
19	Densidad de drenaje (Dd , km/km^2)	$Dd = Lu / A$	Horton (1945)	2.02
20	Gradiente medio (Gr , $m \cdot km$)	$Gr = (a - b) / Ls$ donde; $a =$ elevación de origen del cauce principal, $b =$ elevación del punto de descarga del cauce principal	Sreedevi, Subrahmanyam y Ahmed (2005)	16.66
21	Intensidad de drenaje (Di)	$Di = Fs / Dd$	Faniran (1968)	1.04
22	Número de infiltración (If)	$If = Fs * Dd$	Faniran (1968)	4.23
23	Textura del drenaje (Dt)	$Dt = Nu / P$	Horton (1945)	2.40
24	Canal de mantenimiento (Ch)	$Ch = 1 / Dd$	Schumm (1956)	0.50

Cuadro 2. Fórmulas para calcular los parámetros de la red hidrológica por orden de corriente y sus valores observados.
Table 2. Formulae to calculate the parameters of hydrological network by stream order and their observed values.

No.	Parámetro	Fórmula y descripción	Referencia	Orden de corriente				Total
				1	2	3	4	
Red hidrológica (continuación)								
15	Número de cauces (Nu)	Orden jerárquico	Strahler (1964)	76	14	3	1	94
18	Longitud total de las corrientes (Lu , km)	Longitud total de los cauces presentes en la red de drenaje (km)	Horton (1945)	53.24	18.04	10.95	8.29	90.53
25	Longitud media de las corrientes (Lsm)	$Lsm = Lu / Nu$	Horton (1945)	0.70	1.29	3.65	8.29	-
26	Relación de la longitud de la corriente (Rl)	$Rl = Lu / Lu - 1$ donde; $Lu =$ longitud total de las corrientes del orden "u", $Lu - 1 =$ longitud total de las corrientes del siguiente orden inferior	Horton (1945)	-	0.34	0.61	0.76	-
27	Relación de bifurcación (Rb)	$Rb = Nu / Nu + 1$ donde; $Nu =$ número de corrientes del orden "u", $Nu + 1 =$ número de corrientes del siguiente orden superior	Horton (1945)	5.43	4.67	3.00	-	-
28	Relación de bifurcación media (Rbm)	$Rbm =$ Promedio de la razón de bifurcación (Rb) de todos los órdenes	Schumm (1956)			4.37		

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Morfométrico

Las dimensiones que ocupa la cuenca en estudio corresponden a un área (A) de 44.87 km² que la clasifica como pequeña, ya que su valor oscila entre los 25 y 250 km² (Campos-Aranda, 1998), el perímetro (P) fue 39.09 km y una longitud (Lb) paralela al cauce principal de 13.57 km con un ancho máximo (As) de 5.15 km. Esper-Angillieri y Perucca (2014) reportaron valores similares y lo relacionaron con menores tiempos de concentración del escurrimiento superficial y por lo tanto, susceptibilidad a crecidas con picos atenuados y corta duración.

Respecto a los parámetros que describen la forma, el factor de forma (Rf) resultó en 0.24, se considera que valores cercanos a cero indican una forma alargada (Horton, 1932). Generalmente, para

este tipo de cuencas, se puede afirmar que el flujo superficial de un evento de lluvia presentará avenidas con picos atenuados y de larga duración, en contraste con cuencas circulares cuyas avenidas presentan picos de corta duración (Biswas, Sudhakar y Desai, 1999). Además, otorga a las cuencas una naturaleza propicia para una mayor recarga de agua subterránea, lo que ayuda a gestionar las inundaciones fácilmente, incluso con mayor probabilidad de inundación que una cuenca circular (Abdulkareem, Pradhan, Sulaiman y Jamil, 2018).

En relación con el valor de la relación de elongación (Re) (0.56), se confirmó que se trata de una cuenca alargada de acuerdo con la clasificación propuesta por Abdulkareem *et al.* (2018), esta característica también la reveló el parámetro relación de circularidad (Rc) cuyo valor fue menor a 0.5 (0.37), indicando una descarga baja de los escurrimientos con condiciones del subsuelo altamente permeables (Singh, Gupta y

Singh, 2014). Así mismo, la constante de compacidad (C_c) resultó en 1.65, indicando que se trata de una cuenca en forma de oval-oblonga a rectangular-oblonga (Campos-Aranda, 1998); dicha forma puede significar menos susceptibilidad a avenidas, si los flujos laterales que alimentan el cauce principal son pequeños debido a reducidas áreas de captación (José-Ríos *et al.*, 2018). En contraste, si existen áreas de aportación más grandes que fluyen hacia la corriente principal, pueden implicar un riesgo potencial de inundaciones, en particular para poblaciones que se establecen cerca del cauce principal aguas abajo.

Análisis del Relieve

La cota más alta de la cuenca de estudio es 2860 m y la más baja corresponde a 2557 m. Por lo tanto, el desnivel (R) resultó en 303 m. Sakthivel, Jawarhar-Raj, Sivasankar, Akhila y Omine (2019) sugieren que valores menores a 400 indican un desnivel bajo. Este es un factor de importancia para estimar el tiempo de concentración de los escurrimientos y comprender las particularidades de las inundaciones (Sreedevi, Owais, Khan y Ahmed, 2009). La relación de relieve (Rh) indicó una pendiente media de 2.23%, considerada baja según la clasificación de Sakthivel *et al.* (2019). Este parámetro es de utilidad para medir la inclinación total de la cuenca y también es considerado como un indicador de la intensidad del proceso de erosión que se produce en ella (Abdulkareem *et al.*, 2018). Por su parte, el valor del número de robustez (Rn) fue de 0.61 lo cual indica que se trata de una cuenca moderadamente accidentada. Javarayigowda, Basavaraju y Jayaram (2018) encontraron valores similares de Rh y Rn , mismos que relacionaron con aquellas áreas con menos riesgo a presentar erosión hídrica del suelo.

Análisis de la Red de Drenaje

De acuerdo con el método propuesto por Strahler (1964) para clasificar la red de drenaje, la cuenca es de cuarto orden, con una longitud del cauce principal de 16.87 km desde su origen hasta el punto de descarga de interés. El número total de cauces (Nu) presentes en la red de drenaje (incluyendo todos los órdenes) corresponde a 94, de los cuales, los cauces de primer orden representan el 58.8%, seguidos por el segundo orden con 19.9%, el tercer orden con 12.1% y finalmente el cuarto orden con 9.2%.

En el Cuadro 2, se muestra el número de cauces y longitud para cada orden de corriente. Se observa que el primer orden presenta la mayor longitud y conforme aumenta el orden de las corrientes la longitud de los cauces es menor. La mayoría de los cauces en la red de drenaje son de primer orden (es decir, no cuentan con afluentes), los cuales solo transportan agua durante un evento de lluvia, Navarro-Lozano, Nava, Troyo y Cadena (2012) mencionan que en este tipo de cauces se inicia el transporte de sedimentos hacia la parte baja de la cuenca; lo anterior sugiere que se debe realizar un manejo adecuado de la cobertura vegetal; ya que el cambio de uso de suelo de bosques autóctonos para uso agropecuario o establecimiento de plantaciones forestales aumenta el escurrimiento superficial y consecuentemente la pérdida de suelo (Návar y Synnott, 2000).

Del análisis de los escurrimientos en la cuenca, la frecuencia de corrientes (F_s) es de 2.09 cauces/km², valor considerado bajo (Sakthivel *et al.*, 2019), cuya longitud de drenaje (Lu) es 90.53 km considerada moderada de acuerdo a la clasificación propuesta por (Sakthivel *et al.*, 2019).

Por su parte, el valor de la densidad de drenaje (Dd) fue de 2.02 km/km², que revela una moderada densidad para la cuenca (Choudhari *et al.*, 2018). Valores similares de este parámetro los reportaron Vittala, Govindaiah y Honne-Gowda (2004) donde concluyen que se trata de cuencas con un subsuelo altamente permeable (altos valores de infiltración) y una cubierta vegetal densa, que influyen positivamente en la recarga de agua subterránea. Un aspecto relevante de este parámetro es que, a mayor densidad de drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca a la precipitación, ya que se evacuará el escurrimiento en menor tiempo (Gaspari *et al.*, 2012).

El valor de la textura de drenaje (Dt) (2.40) evidencia que la cuenca tiene una textura gruesa con alto grado de permeabilidad (Smith, 1950). Tomando en cuenta que actualmente, parte de la población de El Salto utiliza el agua que surge de manantiales presentes en la cuenca para consumo humano; y considerando la interpretación de los parámetros Dd y Dt , se puede deducir que mantener una adecuada cubierta vegetal es de suma importancia para propiciar la infiltración de agua al subsuelo con la finalidad de promover la permanencia de este servicio; lo que también permitirá que los escurrimientos superficiales presenten menor cantidad de sedimentos. En este sentido, Návar,

Lizárraga y Jiménez (2017) mencionan que el método intensivo de manejo forestal (Método de Desarrollo Silvícola) que se aplica en la Sierra Madre Occidental, tiende a cambiar el volumen de macroporos en el suelo y consecuentemente modifica los componentes del ciclo hidrológico (especialmente la infiltración y escurrimiento). Por su parte, Dueñez-Alanís, Gutiérrez, Pérez y Nívar (2006) reportaron que la reducción en la infiltración, aumento en el escurrimiento y erosión solo son temporales, posterior a la aplicación de actividades silvícolas; sin embargo, sugieren que se realicen prácticas de conservación de suelo y agua inmediatamente después de su ejecución.

Al analizar la red hidrográfica, se observó que existen dos afluentes que se originan en la parte alta de la cuenca, cuya longitud es similar y ambas se unen en la parte media de la cuenca para formar un solo cauce; Gaspari *et al.* (2012) mencionan que cuencas con esta configuración de drenaje triangular pueden generar avenidas significativas. El valor del gradiente medio (Gr) (16.66 m km^{-1}), indicó que la altura del cauce principal de la cuenca disminuye 16.66 m por cada km recorrido aguas abajo; por tanto, el área de drenaje es clasificada de alta incidencia a la escorrentía (Choudhari *et al.*, 2018).

En cuanto a la intensidad de drenaje (Di), se estimó un valor de 1.04. Pareta y Pareta (2011) reportaron un valor similar y lo consideraron bajo, sugiriendo que la escorrentía superficial no es eliminada rápidamente del área de aportación, consecuentemente la cuenca es altamente susceptible a inundaciones, erosión y deslizamientos. El valor del número de infiltración (If) estimado fue de 4.23, de acuerdo a Fenta, Yasuda, Shimizu, Haregeweyn y Woldearegay (2017) se considera bajo, sugiriendo que la cuenca presenta material subsuperficial permeable con una buena cobertura vegetal y bajo relieve que resultaría en una mayor capacidad de infiltración y en consecuencia sitios con una buena recarga de agua en el subsuelo.

Respecto al valor del canal de mantenimiento (Ch) que indica las unidades de superficie de la cuenca hidrográfica necesarias para soportar una unidad de longitud de canal (Schumm, 1956); generalmente, valores altos de este parámetro significan que se requiere un área más grande para producir un flujo superficial, ya que el agua precipitada puede perderse mediante evaporación, percolación, etc., en contraste con valores bajos que reflejan menores posibilidades de infiltración y por ende más escorrentía superficial

(Kumar y Joshi, 2015). Este parámetro resultó en 0.50 para el área de estudio, indicando una infiltración y permeabilidad de cubierta vegetal moderada con rocas moderadamente resistentes (Sakthivel *et al.*, 2019).

Del análisis de los cauces de la cuenca respecto a su orden, los valores de longitud media de las corrientes (Lsm) fueron de 0.7, 1.29, 3.65 y 8.29 para el primer, segundo, tercer y cuarto orden respectivamente. Se observa que cada valor fue mayor respecto al valor del orden inmediato inferior e inversamente proporcional al número de corrientes (Nu) de ese orden jerárquico (Javarayigowda *et al.*, 2018); este hecho podría relacionarse con variaciones en la topografía de la cuenca (Swetha y Reddy, 2019).

Para el parámetro relación de la longitud de las corrientes (Rl) los valores fueron 0.34, 0.61 y 0.76 para el primer, segundo y tercer orden de corriente respectivamente; considerados en los rangos bajo (<0.5) y moderado ($0.5-1.5$) (Sakthivel *et al.*, 2019). De acuerdo con Horton (1945) la variación de los valores de Rl podría atribuirse a cambios en la pendiente y el relieve. Por su parte, la relación de bifurcación (Rb) mostro valores que oscilaron entre 3.00 y 5.43, con un valor promedio (Rbm) de 4.37. Este valor fue similar al reportado por Choudhari *et al.* (2018), revelando que se trata de una región montañosa, con una pendiente moderada del terreno, cuya escorrentía puede ser de moderada a alta y que las rocas del lecho presentan una permeabilidad moderada. Ello evidencia que el patrón de drenaje de la cuenca no ha sido afectado por perturbaciones estructurales (antrópicas o naturales).

Análisis Hipsométrico

El gráfico de la Figura 3 revela claramente que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio o madurez, corroborándose con el valor de la integral hipsométrica (0.5) que se encuentra entre el rango de 0.35 y 0.6 (Martínez-Ramírez *et al.*, 2017). Kumar y Joshi (2015) reportaron un valor similar para la integral hipsométrica y lo relacionaron con una cuenca tectónicamente estable. Otra interpretación del valor de este parámetro es que el 50% de las masas rocosas originales de la cuenca aún se encuentran presentes en ella. Strahler (1952) sugiere que, la etapa de madurez es común en las cuencas de tercer o cuarto orden donde existen rocas relativamente homogéneas; en esta etapa existe equilibrio entre la erosión presente y las fuerzas resistivas de cohesión que proporciona la roca madre,

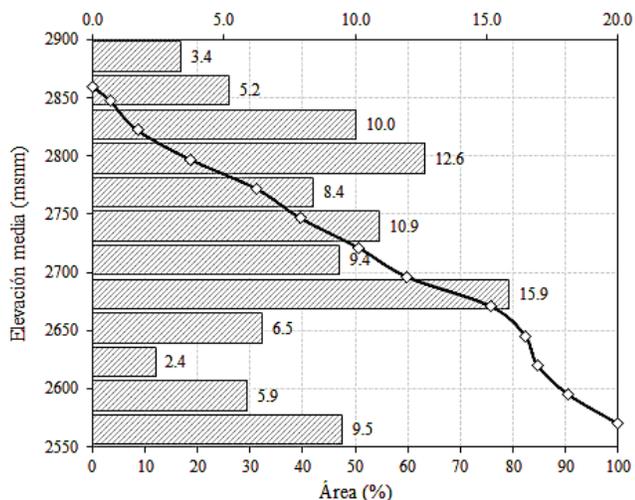


Figura 3. Curva hipsométrica y frecuencias altitudinales de la cuenca El Salto, Durango, México (Fuente: Elaboración propia).

Figure 3. Hypsometric curve and altitudinal frequencies of El Salto watershed, Durango, Mexico (Source: Author design).

el suelo y la cubierta vegetal. Ritter, Kochel y Miller (2002) menciona que estas cuencas son adecuadas para la gestión del agua mediante la ejecución de proyectos, ya que la tasa de erosión es alta solo cuando se presenta un evento de lluvia significativamente fuerte que genera altas tasas de escorrentía.

Del análisis de la curva hipsométrica, se observa una pendiente moderada y constante que va de la cota altitudinal 2670 a 2820 m. La pendiente más pronunciada ocurre de la cota altitudinal 2800 a 2683 m abarcando el 15% del área de la cuenca. Finalmente se observa otro punto de inflexión que cambia rápidamente la pendiente de la curva entre las cotas altitudinales 2600 a 2670 m abarcando 14.5% de la superficie (Figura 3).

CONCLUSIONES

Se determinó que la cuenca estudiada es alargada con un tiempo de descarga de los escurrimientos e infiltración moderado. Por otra parte, los parámetros que caracterizan el relieve revelan que se trata de una cuenca moderadamente accidentada con bajo riesgo de erosión.

En cuanto a la caracterización de la red de drenaje la cuenca presenta una baja densidad con 4 órdenes jerárquicos, es decir se trata de una superficie con una

cubierta vegetal densa donde el mayor porcentaje de escurrimientos (59%) lo aportan los cauces efímeros (orden 1). De acuerdo a su forma, la cuenca no debería ser susceptible a inundaciones; sin embargo, analizando sus pequeñas dimensiones y dado que la configuración de drenaje presenta dos ramificaciones en la cabecera que convergen en el mismo punto a la mitad de esta, podrían presentarse fuertes avenidas en la parte baja de la cuenca de presentarse un evento extraordinario de lluvia. Cabe destacar que la respuesta de la cuenca ante un suceso de dicha índole, dependerá de la intensidad de la lluvia y en que parte de la cuenca se presente. Finalmente, la curva hipsométrica reveló que la fase evolutiva de la cuenca está en equilibrio o madurez.

Este estudio contribuye a mejorar el conocimiento de los procesos geomorfológicos en la cuenca El Salto, mismo que incidirá en las políticas de planeación y desarrollo regional de los recursos naturales en el área, sobre todo en su conservación para que los servicios ambientales que brinda a la sociedad se mantengan. Información que también cobra relevancia ante los cambios en los regímenes hidrológicos pronosticados que enfrentarán los ecosistemas de la Sierra Madre Occidental.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Las fuentes de financiamiento económico del presente estudio fue el Tecnológico Nacional de México y el Instituto Tecnológico de El Salto mediante el proyecto denominado: Estimación de la precipitación y caudales máximos en la región de El Salto, Durango.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis formal, curación de datos, preparación del borrador original, visualización: A.G.M.G. Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, curación de datos, preparación del borrador original, visualización, supervisión, administración del proyecto, adquisición de fondos: S.C.R. Validación, revisión y edición, supervisión: J.A.N.L, M.P.G. y F.C.C.

LITERATURA CITADA

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2018). Quantification of runoff as influenced by morphometric characteristics in a rural complex catchment. *Earth Systems and Environment*, 2, 145-162. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0043-0>
- Asfaw, D., & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.003>
- Biswas, S., Sudhakar, S., & Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155-166. <https://doi.org/10.1007/BF02991569>
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. S.L.P., México: Libros de la Editorial Universitaria.
- Choudhari, P. P., Nigam, G. K., Singh, S. K., & Thakur, S. (2018). Morphometric based prioritization of watershed for groundwater potential of Mula river basin, Maharashtra, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(4), 256-267. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452482>
- Cruz-Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez-Vagaría, A. M., Carrillo-González, F. M., & Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23(64), 26-34.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. CEPAL-Serie de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, Chile: Publicación de las Naciones Unidas. ISBN: 92-1-322070-7.
- Dueñez-Alanis, J., Gutiérrez, J., Pérez, L., & Nívar, J. (2006). Manejo silvícola, capacidad de infiltración, escurrimiento superficial y erosión. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 233-240.
- Esper-Angillieri, M. Y., & Perucca, L. P. (2014). Caracterización morfométrica de la Cuenca del río Seco a propósito de las fuertes precipitaciones de enero de 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66(2), 235-245.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2011). *ArcGIS Desktop: Release 10.5*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, CA, USA.
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity - A provisional new drainage factor. *Australian Journal of Science*, 31, 328-330.
- Fenta, A. A., Yasuda, H., Shimizu, K., Haregeweyn, N., & Woldearegay, K. (2017). Quantitative analysis and implications of drainage morphometry of the Agula watershed in the semi-arid northern Ethiopia. *Applied Water Science*, 7, 3825-3840. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0534-4>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F. Instituto de Geografía, UNAM.
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & Denegri, G. A. (2009). Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 43-51.
- Gaspari, F. J., Rodríguez-Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.
- Horton, R. E. (1932). Drainage basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos, escala 1: 1 000 000. Serie I*. Consultado el 10 de diciembre, 2018, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Consultado el 10 de diciembre, 2018, desde <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). *Censo de población y vivienda 2020*. Consultado el 17 de mayo, 2021, desde <https://www.inegi.org.mx/>
- Javarayigowda, N. H., Basavaraju, G. K. S., & Jayaram, S. H. (2018). Morphometric analysis of Karadya micro watershed: A case study of Mandya District. *American Journal of Remote Sensing*, 6(1), 15-22. <https://doi.org/10.11648/j.ajrs.20180601.13>
- José-Ríos, M., Mendoza-Ramírez, R., Silva-Casarin, R., Simuta-Champo, R., Reyes-López, D., & Pascual-Ramírez, F. (2018). Elementos para gestión del agua en la cuenca del lago de Zirahuén. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 431-439. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.418>
- Kumar, P., & Joshi, V. (2015). Characterization of hydro geological behavior of the upper watershed of River Subarnarekha through Morphometric analysis using Remote Sensing and GIS approach. *International Journal of Environmental Sciences*, 6, 429-447. <https://doi.org/10.6088/ijes.6049>
- Martínez-Ramírez, Á., Steinich, B., & Tuxpan, J. (2017). Morphometric and hypsometric analysis in the Tierra Nueva Basin, San Luis Potosí, México. *Environmental Earth Sciences*, 76, 444. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6766-7>

- Melton, M. (1957) *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology*. Department of Geology, Columbia University, Technical Report, 11, Project NR 389-042. New York, NY, USA: Office of Navy Research.
- Meza-Rodríguez, D., & Martínez-Rivera, L. M. (2010). *Análisis morfométrico de las cuencas de la Red Mexlter: estudio de diez cuencas a nivel nacional en México*. Guadalajara, Jal., México: Universidad de Guadalajara.
- Miller, V. C. (1953). *Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*. Technical report no. 3. New York, NY, USA: Dept. of Geology, Columbia University.
- Návar, J., & Synnot, T. J. (2000). Surface runoff, soil erosion, and land use in Northeastern Mexico. *Terra Latinoamericana*, 18(3), 247-253.
- Návar, J., Lizárraga-Mendiola, L., & Jiménez-Gómez, M. A. (2017). Modelación de caudales en función de los macroporos del suelo en una microcuenca forestal de Durango, México. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 89-100.
- Navarro-Lozano, J. O., Nava-Sánchez, E., Troyo-Dieguez, E., & Cadena-Zamudio, J. L. (2012). Tasas de erosión e índices geomorfológicos en tres cuencas costeras al sur de la península de Baja California, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), 229-241.
- Pareta, K., & Pareta, U. (2011). Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna basin, India using ASTER (DEM) data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 248-269.
- Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079-1084. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1971\)82\[1079:ERHIAG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1079:ERHIAG]2.0.CO;2)
- Ritter, D. F., Kochel, R. C., & Miller, J. R. (2002). *Process geomorphology*. New York, NY, USA: Mc Graw-Hill.
- Said, S., Siddique, R., & Shakeel, M. (2018). Morphometric analysis and sub-watersheds prioritization of Nagmati River watershed, Kutch District, Gujarat using GIS based approach. *Journal of Water and Land Development*, 39, 131-139. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0068>
- Sakthivel, R., Jawarhar-Raj, N., Sivasankar, V., Akhila, P., & Omine, K. (2019). Geo-spatial technique-based approach on drainage morphometric analysis at Kalrayan Hills, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 9, 24. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0899-7>
- Salas-Aguilar, V. M., Pinedo-Álvarez, C., Viramontes-Olivas, Ó. A., Báez-González, A. D., & Quintana-Martínez, R. M. (2011). Morfometría de la cuenca del río Nazas- Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 5(1), 34-42.
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597-646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Siddiqui, S., & Soldati, M. (2014). Appraisal of active tectonics using DEM-based hypsometric integral and trend surface analysis in Emilia-Romagna Apennines, northern Italy. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 23(3), 277-292. <https://doi.org/10.3906/yer-1306-12>
- Singh, P., Gupta, A., & Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(2), 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.09.003>
- Smith, K. G. (1950). Standards for grading textures of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9), 655-668. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.9.655>
- Sreedevi, P. D., Subrahmanyam, K., & Ahmed, S. (2005). The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. *Environmental Geology*, 47, 412-420. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1166-1>
- Sreedevi, P. D., Owais, S., Khan, H. H., & Ahmed, S. (2009). Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. *Journal of the Geological Society of India*, 73(4), 543-552. <https://doi.org/10.1007/s12594-009-0038-4>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In V. T. Chow (Ed.). *Handbook of applied hydrology* (pp. 439-476). New York, NY, USA: McGraw Hill.
- Swetha, K., & Reddy, G. J. (2019). Morphometric analysis of mun river basin, Thailand: A geographical information system approach. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 8, 2939-2954. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.403>
- Vittala, S. S., Govindaiah, S., & Honne-Gowda, H. (2004). Morphometric analysis of sub-watersheds in the pavagada area of Tumkur district, South India using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 32, 351-362. <https://doi.org/10.1007/BF03030860>