

Reserva de biosfera Sierra de Manantlán, área productora de agua y su caracterización morfométrica

Morphometric Characterization of the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve Water Producing Area

Rubén Darío Guevara-Gutiérrez,* Oscar Arturo Barreto-García,** José Luis Olguín-López,**
Oscar Raúl Macilla-Villa,**** José Manuel Ramírez Romero,‡ Lucio Ancira Sánchez,§
Carlos Palomera-García¶ y Jonás Alan Luna Fletes‡‡

Recibido: 03/10/2024. Aceptado: 27/02/2025. Publicado: 29/04/2025.

Resumen. Las propiedades morfométricas de las áreas de captación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán son componentes esenciales en la dinámica hídrica y la estimación de la producción de agua. La metodología empleada en este trabajo para estimar el volumen escurrido fue la de

Curvas Numéricas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) de los Estados Unidos, apoyada en sistemas de información geográfica. La reserva se localiza en los estados de Jalisco y Colima, México, con 139,577-12-50 ha. Relevante por su diversidad natural y cultural, provee del recurso

* Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0940-7061>. Email: ruben.guevara@academicos.udg.mx

** Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7715-1673>. Email: oscar.barreto@posgrado.ecosur.mx. Autor de correspondencia.

*** Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6400-70393>. Email: jose.olguin@academicos.udg.mx

**** Departamento de Producción Agrícola, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7715-1673>. Email: oscarraulmancilla@gmail.com

‡ Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4698-7747>. Email: jmanuel.ramirez@academicos.udg.mx

§ Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1061-2310>. Email: lucio.ancira@academicos.udg.mx

¶ Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5338-91776>. Email: carlos.palomera@academicos.udg.mx

‡‡ Departamento de Producción Agrícola, Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, 48900, Guadalajara, Jalisco, México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6452-9523>. Email: jonas.luna@academicos.udg.mx

agua a comunidades locales y área de influencia mediante la red fluvial. Está conformada por cabeceras de las cuencas hidrográficas Ayuquila, Marabasco y Purificación. Presenta una altitud de 780 a 2800 msnm y pendiente promedio de 35.6%. Conformada por las unidades fisiográficas occidental de sistema fluvial dendrítico y la oriental con sistema kárstico. La red fluvial se encuentra asociada a elevadas pendientes, material geológico variado y suelos heterogéneos. El registro de precipitación promedio de 1252.8 mm y escorrentía superficial estimada de 105,699 hm³ distribuida por 3113 flujos superficiales con longitud de 3413.4 km. El orden máximo de corrientes 7, densidad de drenaje 2.42 y coeficiente orográfico 6.1 valores característicos de áreas montañosas con alto relieve y red fluvial ramificada. En conclusión, se establece que la estructura hidrográfica y dinámica hidrométrica de la reserva es influida por procesos geomorfológicos de cada unidad fisiográfica, por el ambiente local y dinámicas de actividades productivas, así como del cambio de patrón de cultivo y uso del suelo.

Palabras clave: red fluvial, área natural protegida, uso de suelo, cuencas colectoras.

Abstract. The morphometric properties of the catchment areas in the Sierra de Manantlan Biosphere Reserve are essential components in understanding the hydrological dynamics and the estimation of water production. The methodology used to estimate runoff volume was the Curve

Number (CN) method developed by the Soil Conservation Service (SCS) of the United States, supported by geographic information systems (GIS). The reserve is located in the states of Jalisco and Colima, Mexico, with 139,577 hectares and is notable for its natural and cultural diversity. It provides water resources to local communities and its area of influence through an extensive river network. It comprises the headwaters of the Ayuquila, Marabasco, and Purificación watersheds. The reserve's elevation ranges from 780 to 2,800 meters above sea level, with an average slope of 35.6%. The western portion features a dendritic fluvial system, while the eastern part consists of a karstic system. The fluvial network is highly dissected, associated with steep slopes, varied geological material, and heterogeneous soils. The average annual precipitation is 1,252.8 mm, and the estimated surface runoff is 105,699 hm³, distributed across 3,113 surface flows with a total length of 3,413.4 km. The river system reaches a maximum stream order of 7, with a drainage density of 2.42 and orographic coefficient 6.1—characteristics typical of mountainous areas with high relief and branched river networks. In conclusion, the hydrographic structure and hydrometric dynamics of the reserve are influenced by geomorphological processes of each physiographic unit, the local environment and productive activities, such as changes in crop patterns and land use.

Keywords: River network, Protected Natural Area, land use, catchment areas.

INTRODUCCIÓN

México es un país megadiverso, rico en recursos naturales y de diversos paisajes, resguardados por la ley la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, que identifica áreas con fines de protección de recursos naturales y en las que se encuentran las reservas, zonas forestales, zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y otros cuerpos de aguas nacionales, destinados al abastecimiento de este líquido para el servicio de las poblaciones (LGEEPA, 2018).

Por su parte, las áreas naturales protegidas (ANP) mantienen la integridad de los ecosistemas propios de una región, resguardan el germoplasma de la naturaleza, además de ser las principales reguladoras de los ciclos biogeoquímicos, como la captación de humedad, filtración de agua, absorción de contaminantes atmosféricos, producción de oxígeno, regulación térmica y la protección del suelo, además de servir como fuentes de inspiración y esparcimiento (SEMADET, 2019).

La Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM) es un ANP ubicada en la región Occidente y Pacífico Centro, una de las más importantes del Occidente de México debido a su riqueza natural, diversidad biológica, los servicios ambientales que brinda y su aportación de agua que abastece a más de 430 000 habitantes en la región (CONANP, 2020; SEMARNAT, 2018). Es considerada una provincia compleja por sus propiedades morfotectónicas; resulta una de las de mayor diversidad geológica del país (FMCN-CONANP, 2010).

La Sierra de Manantlán es reconocida como Reserva de Biosfera por decreto del Ejecutivo Federal, incorporada a la Red Internacional de Reservas del Programa del Hombre y la Biosfera (MAB) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), ubicada entre los estados de Jalisco y Colima en México. La conforman tres cuencas hidrográficas que presentan interrelaciones e interdependencia espaciotemporal entre el medio biofísico (biodiversidad, estructura geomorfológica, geológica, suelo, agua, vegetación,

ecosistemas acuáticos y terrestres), modos de apropiación (tecnología y mercados) e instituciones (organización social, cultura, reglas o leyes). Es un territorio definido naturalmente donde todos los procesos socioecológicos están fuertemente ligados entre sí (SEMARNAT, 2013). Este sistema es alterado por estructuras político-sociales a nivel municipal, que influyen en la modificación del uso del suelo y cobertura vegetal, y que repercuten en la dinámica de la energía captada en la red fluvial, condicionada por características físico-topográficas, propiedades morfométricas y dimensiones de cuencas o áreas tributarias, que influyen en la velocidad y volumen de los flujos superficiales (Guevara *et al.*, 2019).

Estos territorios se ven afectados con frecuencia por la deforestación, el deterioro de la calidad y cantidad del agua, así como por el efecto de las actividades antropogénicas que reducen la biodiversidad (INE, 2004). Las ANP son una alternativa para el uso sustentable de recursos naturales. Sin embargo, el crecimiento poblacional y actividades relacionadas han ocasionado la transformación del ciclo natural que propicia la pérdida de servicios ecosistémicos, lo que pone en riesgo la conservación de sus recursos y el bienestar humano (Jiménez *et al.*, 2014); las prácticas agropecuarias y, en menor proporción, el crecimiento urbano factores del cambio de uso del suelo (Benítez, 2010), modifican la morfodinámica y la respuesta hidrológica de cuencas y condicionada por sus parámetros morfométricos del sistema fluvial (Méndez *et al.*, 2015). El análisis de cuencas hidrográficas realizado través de la caracterización morfométrica y descripción de parámetros de forma, relieve y red de drenaje, es fundamental en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari *et al.*, 2012). Esta conversión de lluvia a escorrentía superficial es un proceso complejo que depende de la distribución espacio-temporal de la precipitación pluvial y sus características físicas presentes (Quevedo-Tiznado *et al.*, 2016). Este análisis permite establecer criterios para facilitar y entender el funcionamiento que impacta en la planeación, manejo y uso de recursos, siendo una base importante en el análisis integrado de cuencas hidrográficas (Guevara *et al.*, 2019). Estas

áreas están constituidas por un complejo mosaico de ecosistemas naturales que presentan vínculos entre zonas altas y bajas, cuyas externalidades son transportadas por los flujos de agua creando una conexión física entre poblaciones (Cotler, 2010). Debido a esta situación, las cuencas de montaña constituyen unidades de estudio para la gestión, conservación y manejo en las que se analizan los ciclos del agua y sedimentos en suspensión ante la presencia del fenómeno geodinámico torrencial, causado por precipitaciones extremas o desprendimientos de aludes (UNESCO, 2008). En ambientes montañosos, la morfometría fluvial y las características morfológicas del relieve influyen en su dinámica, lo que condiciona el comportamiento hidráulico e hidrológico, así como la estabilidad relativa de los materiales en las vertientes a través de la activación de procesos de remoción en masa (Méndez, 2016). El objetivo del presente estudio es la descripción morfométrica de las áreas hidrográficas que configuran la RBSM, tributarias a las cuencas colectoras de los ríos Ayuquila, Marabasco y Purificación. Además de estimar la producción de escurrimiento superficial con base a los registros pluviométricos, topografía, tipo de suelo y cobertura vegetal dominante.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la RBSM distribuida entre los estados de Jalisco (90 %) y Colima (10 %), que forma parte de la Sierra Madre del Sur, Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. Su población aproximada es de 8416 habitantes (Instituto Nacional de Ecología, 2000). Situada en las regiones hidrológicas 15 y 16, sobre las cuencas de los ríos Marabasco, Purificación y Ayuquila, con una superficie de 139,57-12-05 ha, se distribuye en los municipios de Autlán de Navarro, Tuxcacuesco, Tolimán, Cuautitlán de García Barragán y Casimiro Castillo en Jalisco, y Comala, Minatitlán y Villa de Álvarez en Colima (Figura 1).

La RBSM abastece de agua a comunidades ubicadas dentro del ANP y a las cabeceras municipales de Casimiro Castillo, El Grullo y El Limón, así como a los municipios de Cuautitlán, Cihuatlán y

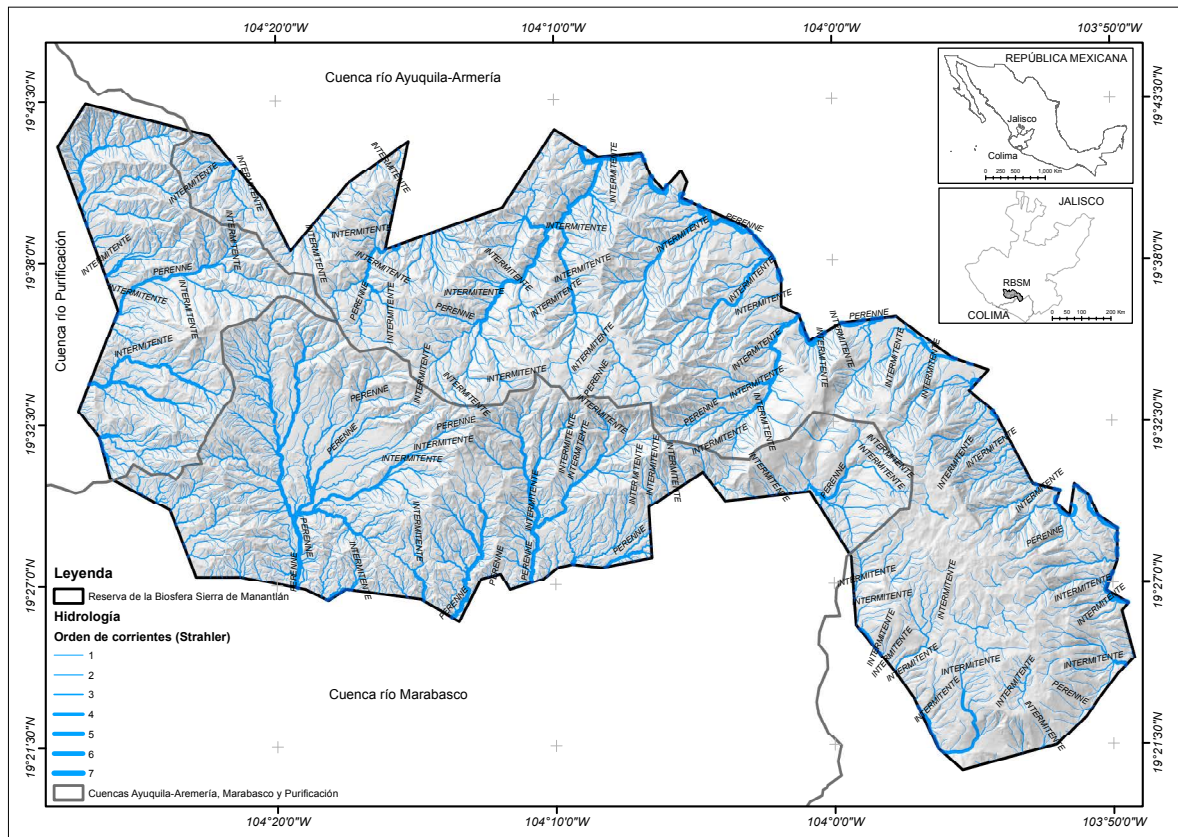


Figura 1. Ubicación de la RBSM y distribución de la red fluvial, Jalisco-Colima, México.

Minatitlán en Jalisco, parcialmente a Manzanillo, Armería en Colima, y las ciudades de Colima, Villa de Álvarez y Comala (FMCN-CONANP, 2010). Los grupos climáticos que la conforman son cálidos y templados subhúmedos (A y C) y seis subgrupos climáticos, A, A (C), (A) Ca, (A) Cb, Ca y Cb, influidos por la ubicación latitudinal, la cercanía a la costa, relieve, sombra orográfica y la amplitud del gradiente altitudinal. El rango de temperatura promedio anual es de 16 a 22 °C con gradiente altotérmico de 0.4 °C 100 m⁻¹. El registro de lluvias es de junio a octubre, con registros extremos de 600 a 1700 mm y estiaje de febrero a mayo (Martínez *et al.*, 1991).

Cuenta con 13 tipos de suelos, identificados con base al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), donde sobresalen Regosoles (38.2 %), Litosol (28 %) y Cambisol (18.2 %). En zonas de planicie predominan los Feozem, Fluvisol

y Andosol. Las coberturas vegetales y el uso de suelo se identificaron con base en la interpretación de la imagen de satélite SPOT (1987) falso color RGB 4 3 2, escala 1:100 000, apoyado en cartas escala 1:50 000, editadas por el INEGI (1972) y proyectados sobre una malla 20 x 20 km. Se agruparon en bosque de encino y encino-pino (41.7 %), selva baja caducifolia (15.7 %), bosque de pino y pino-encino (14.3 %), bosque mesófilo de montaña

MÉTODOS

La estimación de los escurrimientos superficiales medios (Q), generados por eventos de lluvia, se realizó mediante el método de las Curvas Numéricas (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN), basado en datos de precipitación y la retención máxima potencial del suelo (S) (Francisco-Nicolás

et al., 2009). La ecuación utilizada para calcular el escurrimiento superficial es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Dónde:

- Q, escurrimiento medio diario (mm);
- S, retención máxima potencial (mm) y
- P, precipitación pluvial efectiva diaria (mm).

La condición para la aplicación de esta ecuación es que $Q > 0$ cuando $P > 0.2S$; de lo contrario $Q = 0$. Los registros de precipitación pluvial se obtuvieron a partir de datos históricos de las estaciones ubicadas dentro del ANP y su zona de influencia, reconocidas por el Servicio Meteorológico Nacional. La determinación del parámetro S se realizó a partir del contenido de humedad del suelo, utilizando la siguiente relación:

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

Dónde:

CN, Curva Numérica, parámetro adimensional que depende de las características del suelo, uso de la tierra y condición hidrológica. Las condiciones de humedad del suelo se clasificaron en tres categorías: I (seco), II (normal) y III (húmedo). Las relaciones para determinar las CN en las condiciones de humedad I y III son las siguientes:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{(2.334 - 0.0133 - CN_{II})}$$

$$CN_{III} = 16.91 + 1.384(CN_{II}) - 0.01379(CN_{II})^2$$

Para la aplicación del método SCS-CN se consideró la clasificación edafológica (Figura 2), la condición hidrológica determinada con base a la cobertura, tipo de vegetación y estado de conservación (Figura 3) obtenido a partir de imágenes satelitales y trabajo de campo. Estas variables permitieron ajustar las CN a las condiciones específicas de la RBSM.

El análisis morfométrico (Cuadro 1) partió de la identificación de las áreas hidrográficas hasta la

límitrofe de la RBSM, situación por la que no se realizó el análisis a nivel de cuencas hidrográficas tributarias a las cuencas colectoras Ayuquila, Marabasco y Purificación. Para el análisis se consideró la red fluvial, topografía, orientación y estimación de la escorrentía superficial de cada área, proyectadas sobre cartas digitales, escala 1:50 000, editadas por el INEGI y digitalizadas en el programa ATLAS GIS (V. 2.1), y editadas en Arc Gis (V. 9.3) e IDRISI (V. 2.0). Se consideraron curvas de nivel cada 20 m a escala 1:50 000 (INEGI, 2018) e imágenes vectoriales con extensión DXF representadas como líneas en el sistema de referencia UTM-13N, unidad de referencia a un metro como unidad de distancia y coberturas digitales (modelo digital de elevación, pendiente e hidrología) que permitió analizar y definir las zonas altimétricas. Además, se identificaron las zonas funcionales (Garrido et al., 2010) tomando como base la hipsometría, el modelo digital de elevación (MDE), el porcentaje de inclinación de la pendiente y la red fluvial, proyectados sobre los SIG. Vidal-Abarca et al. (1987) reconocen la importancia de esta información para la planeación, sistematización del recurso e interpretación de la dinámica del sistema y la diferenciación entre áreas.

RESULTADOS

La RBSM es un área de relieve accidentado, conformada por dos unidades fisiográficas (UF), la occidental de altitudes irregulares y planicies aluviales de importancia agrícola y pecuaria, constituida por rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Y la UF oriental, de origen calcáreo, incluye el Cerro de Enmedio con rango altitudinal de 700 a 2300 m y Cerro Grande de rango altitudinal de 600 a 2500 m con presencia de dolinas, depresiones y sistemas de cavernas, en la que se encuentra la quinta caverna vertical más profunda del continente (Lazcano, 1988), altitudes que a nivel de cuenca pueden reflejar heterogeneidad de paisajes y biodiversidad (Ortiz, 2010).

Los grandes volúmenes de agua se estiman en 105 699.0 hm³, producto de la precipitación pluvial anual promedio de 1252.8 mm, distribuida a través de la red fluvial de 3113 corrientes superficiales

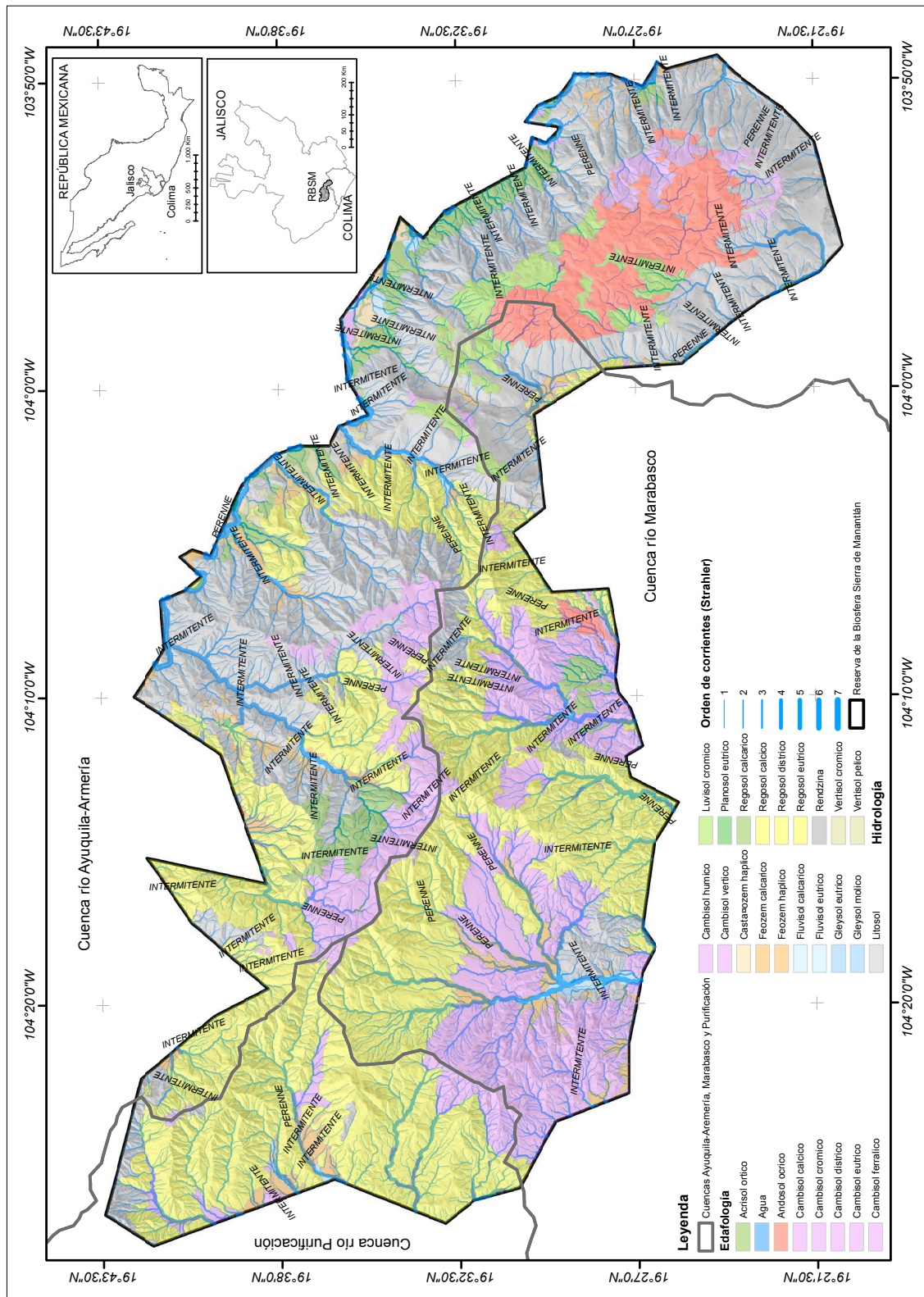


Figura 2. Clasificación edafológica de la RBSM.

Cuadro 1. Relaciones para la obtención de parámetros morfométricos.

Parámetro	Fórmula	Parámetro	Fórmula
Número de orden	Strahler	Área	Arcmap 10.5
Altura media	$hm = \frac{Ac}{Lc}$	Coefficiente de masividad	$Cm = \frac{hm}{A}$
Relación de bifurcación	$Rb = \frac{Nc}{Na + 1}$	Coefficiente orográfico	$Co = \frac{hm}{A} hm$
Frecuencia de corrientes	$Fc = \frac{\sum 1^k Nu}{A}$	Coefficiente de rugosidad	$Rn = R Dd$
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{Le}{A}$	Pendiente media	Algebra de mapas
Longitud de corrientes	Arcmap 10.5		

Ac, área bajo la curva hipsométrica; Lc, longitud máxima de la cuenca; Ic, Índice de compacidad; P, perímetro de la cuenca; Nc, número de escurrimientos de orden determinado; Na, Número de escurrimientos de orden inmediato superior; Le, longitud total de cauces; A, área de la cuenca; R, relieve.

(91 permanentes de 527.67 km de longitud), aprovechados por comunidades dentro y fuera de la RBSM para uso doméstico, agrícola, pecuario y empresarial, hasta desembocar a los ríos Ayuquila, Marabasco y Purificación. Flores-López *et al.* (2003) reconocen esta información como necesaria para planificar el manejo y uso del recurso a nivel de cuencas. La red fluvial presenta un orden máximo de siete, que refleja alta magnitud de ramificación, con extensión de 3413.4 km (Figura 4), densidad de drenaje 2.42 y frecuencia de corrientes de 2.22. Estos valores, en conjunto con la relación de bifur-

cación de 5.27, reflejan una alta probabilidad de incremento de avenidas. Los parámetros de altitud promedio de 1438.56 m, y pendiente promedio de 35.6 %, adicional a las dimensiones de las áreas de captación y características pluviométricas, sugieren hidrogramas de picos elevados con reducido tiempo de concentración, incremento del grado de erodabilidad del suelo y arrastre significativo de sedimentos. Estos resultados indican una red fluvial disectada, 76 % conformada por corrientes de primer orden, que aunadas al segundo orden representan más de 80 % de la red fluvial. Dichas

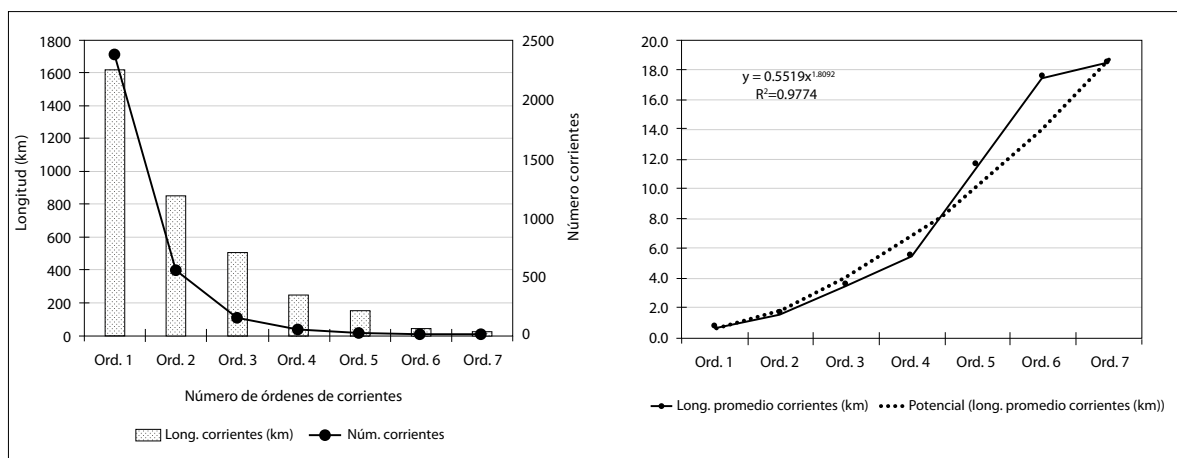


Figura 4. Longitud de corrientes superficiales con base al orden de bifurcación.

características, relacionadas con elevadas pendientes, una geología heterogénea y un coeficiente orográfico de 6.1, son consideradas propias de zonas de montaña. En su conjunto son propiedades que propician condiciones críticas sobre actividades productivas (Delgado y Gaspari, 2010).

Estos valores, junto con el manejo del suelo, el uso y cambio de uso del suelo, sugieren el incremento del arrastre de material edáfico (Figura 5), además del incremento de la pendiente y de valores altimétricos (Figura 6), adicional a las formas dendríticas del sistema fluvial asociado al material



Figura 5. Uso de suelo y deforestación de la RBSM.

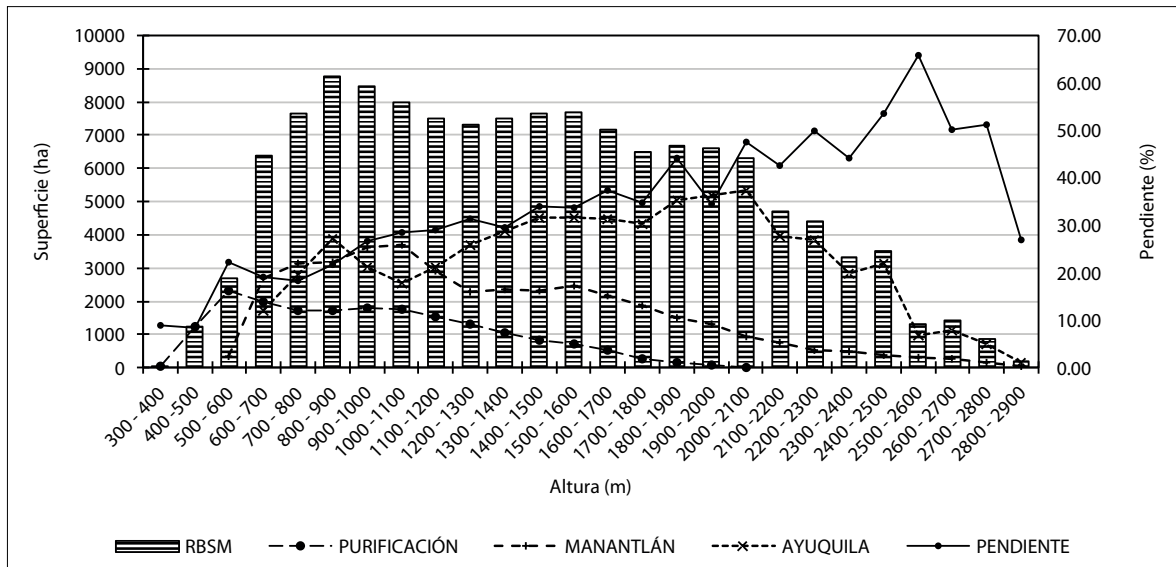


Figura 6. Altimetría de la RBSM y cuencas colectoras en relación de superficie y pendiente.

homogéneo de granulación fina del suelo y roca dura de baja permeabilidad que se distribuye principalmente sobre la UF occidental. Otros sistemas identificados incluyen cauces subdendríticos, pinados, asimétricos y paralelos con tributarios rectos, controlados por la estructura y estratificación de las rocas desarrolladas frecuentemente sobre fallas paralelas, pendientes fuertes y uniformes.

Los sistemas fluviales centrifugos, enrejado kárstico y kárstico, se distribuyen principalmente en la UF oriental, dominados por formaciones de kars, característicos de material de alta permeabilidad y grano grueso, estructuras de fallas y fracturas. Doffo y González (2005) mencionan que estos sistemas reciben influencia de la litológica. Sánchez (1987) reconoce la influencia de la interacción del suelo, grado de fracturación, la estratificación y su topografía.

La Sierra de Manantlán actúa como una barrera natural que captura la humedad proveniente del océano Pacífico. Su influencia está determinada por su índice altotérmico y modulada por factores como las características edáficas, geológicas, la vegetación y las actividades agropecuarias en las zonas media y baja del ANP (Guevara *et al.*, 2019), adicional a fenómenos geomorfológicos manifiestos con base al tamaño y forma de la cuenca,

estructura, variaciones climáticas y dinámica poblacional (SEMARNAT-INE, 2010). La estimación del escurrimiento superficial en tiempo y espacio para cada área tributaria consideró los registros de precipitación pluvial de cada cuenca colectora, así, para el río Ayuquila osciló de 800 a 1290 mm y para los ríos Marabasco y Purificación de 1100 a 1670 mm.

En este contexto, la RBSM se dividió en 20 áreas tributarias a las cuencas colectoras. Para cada una se estimó el volumen escurrido (Figura 7), describiendo su morfometría en consideración a la dirección de los escurrimientos y su agrupación a través de su parteaguas hasta el límite de la reserva, principalmente en las zonas sur y suroeste (Cuadro 2).

Las áreas tributarias presentan formas irregulares de dimensiones diferentes, de topografía accidentada y fuertes pendientes, con una altitud promedio de 1302.7 m y una pendiente media del 35.6%, con valores extremos que oscilan entre un mínimo del 20% y un máximo cercano al 50% (Figura 8).

Río Ayuquila. Doce áreas tributarias conforman la cuenca, con una superficie de 804.784 km² (57.6% de la RBSM), rangos altitudinales de 500 a 2900 m, y cuyo grupos climáticos identificados son: cálido semiárido, cálido subhúmedo, semicálido

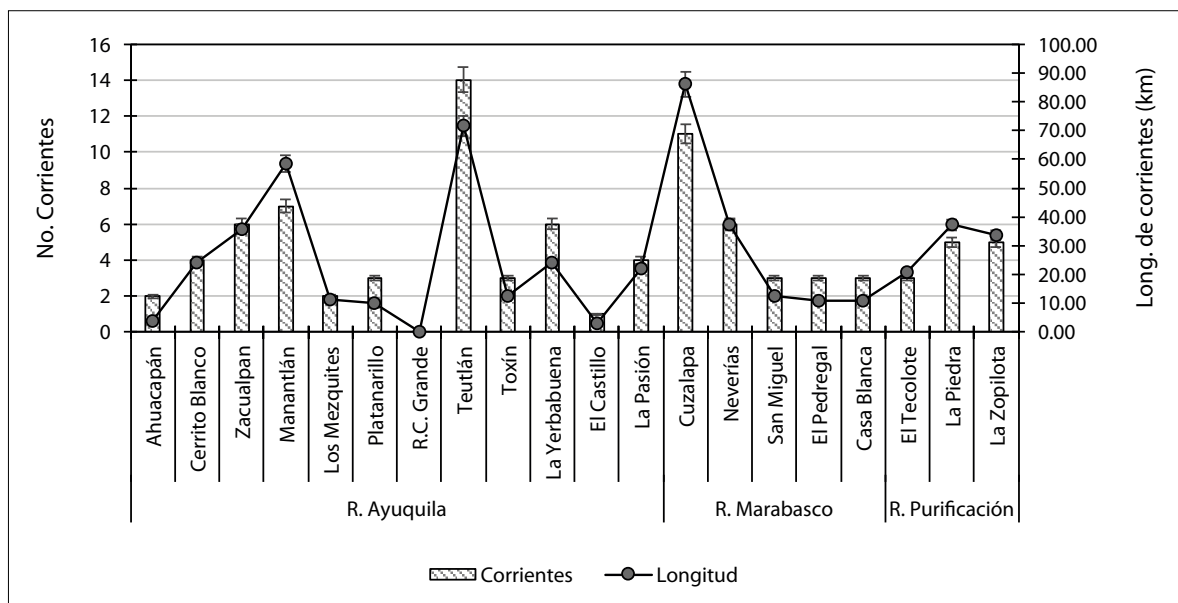


Figura 7. Número de corrientes y longitud por área tributaria a las cuencas colectoras.

Cuadro 2. Morfometría de las áreas tributarias de la RBSM.

Cc	At	A (ha)	P (km)	Nc	No	Lc (km)	Lcp (km)	Dd	Fc	Drenaje	Rb	Cm	Co
	Ahuacápán	3,473.3	47.0	84	3	88.5	3.5	2.23	0.95	D	10.96	0.04	2.4
	Cerrito Blanco	4,233.0	33.3	66	4	90.3	12	1.56	0.73	D, As	5.37	0.03	3.0
	Zacualpan	7,163.0	41.5	122	5	156.3	12	1.73	0.78	D	3.31	0.02	4.6
	Manantlán	16,393.0	68.8	350	6	381.3	19.5	2.14	0.92	D	2.2	0.01	8.8
	Los Mezquites	4,404.0	37.0	65	4	69.5	7.0	1.48	0.94	Plo, Trs, D	5.02	0.03	3.5
	Platanarillo	6,851.0	53.5	99	5	136.0	7.5	1.45	0.73	Trs, D	2.58	0.03	4.4
	R. C. Grande	7,194.6	48.8	57	2	7.9	--	0.89	0.12	K	0.66	0.03	3.1
	Teutlán	13,450.5	71.0	303	5	391.0	6	2.25	0.77	C, E, K	4.36	0.01	9.8
	Toxín	5,772.0	33.5	58	4	73.0	6	1.48	0.94	D	4.57	0.03	4.6
	La Yerbabuena	5,512.0	57.0	151	5	135.0	10.3	2.74	1.12	D, Sd	3.47	0.03	3.1
	ElCastillo	622.0	1.2	4	3	9.75	3.5	0.64	0.41	D	2.71	0.03	0.4
	La Pasión	5,410.0	38.8	122	5	139.8	10.0	2.25	0.87	D	3.47	0.03	4.1
	Cuzalapa	19,983.00	67.0	456	7	527.8	18.5	2.28	0.86	D	2.28	0.02	12.2
	Neverías	10,978.00	50.3	271	5	307.0	15.5	2.47	0.88	D, Pdo, Trs	4.13	0.01	9.7
	San Miguel	3,966.00	34.0	115	5	111.8	9.3	2.9	1.03	D, Pdo, Trs	3.21	0.03	2.9
	El Pedregal	2,096.00	21.8	50	3	51.0	4.0	2.39	0.98	D, Sd7	10.96	0.06	1.2
	Casa Blanca	2,792.00	27.5	93	4	84.3	4.5	3.33	1.1	D	6.20	0.03	3.3
	El Tecolote	6,218.00	58.3	145	5	165.0	26.0	2.32	0.82	Sd, Pdo, Trs	6.82	0.019	5.6
	La Piedra	7,019.90	36.0	250	4	209.5	11.0	2.32	1.19	D	5.98	0.013	7.6
	La Zopilora	6,261.00	34.8	165	5	178.3	13.0	2.32	0.93	C, E, K	3.87	0.014	7.2

Cc, Cuenca colectora; At, Área tributaria; A, Área; P, Perímetro; Nc, Número de corrientes; No, Número de orden; Lc, Longitud de corrientes; Lcp, Longitud de corriente principal; Dd, Densidad de drenaje; Fc, Frecuencia de corrientes; D, Dendrítico; As, Asimétrico; Plo, Paralelo; Trs, Tributarios rectos; C, Centrifuga; E, Enrejada; K, Kársica; Sd, Subdendrítico; Pdo, Pinado; Rb, Relación de bifurcación; Cm, Coeficiente de masividad; Co, Coeficiente orográfico.

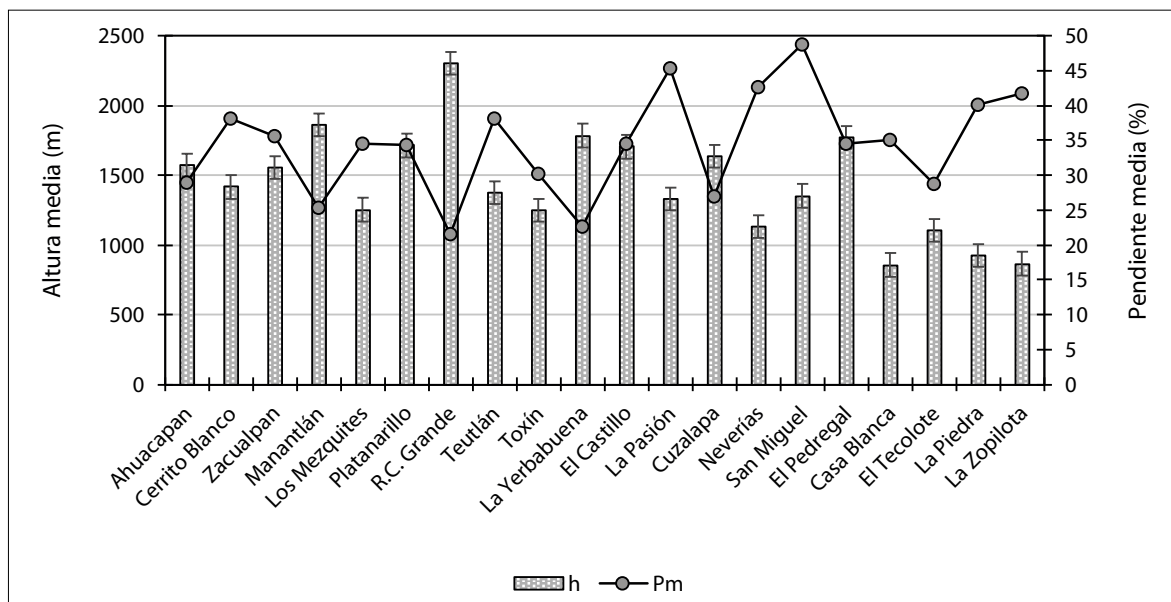


Figura 8. Altura media (h) y pendiente media (Pm) de las áreas tributarias a la RBSM.

subhúmedo, templado subhúmedo y templado semicálido, influidos por la heterogénea distribución pluvial con valor promedio de 1105 mm y temperaturas oscilantes de 16 a 23 °C (Martínez *et al.*, 1991).

La red fluvial está conformada por drenaje dendrítico y subdendrítico, con tributarios rectos, enrejado-kárstico y kárstico (estos últimos distribuidos principalmente en Cerro Grande), una longitud de 1749.45 km, con 1563 flujos intermitentes y perennes (50% del total de las corrientes del ANP) de orden máximo seis, densidad de drenaje 1.82 y frecuencia de corrientes 0.91, con una relación de bifurcación de 5.09, una pendiente media de 34.31 % y un coeficiente orográfico de 7.7, valores relacionados a relieves pronunciados. El volumen anual del escurrimiento superficial es de 36 180.1 hm³, que representa 34.2 % del volumen total de la reserva, influido por la conformación geológica y por las actividades antropogénicas.

Río Marabasco. Esta cuenca está conformada por cinco áreas tributarias que se distribuyen sobre una superficie de 395.997 km² (28.4 % de la RBSM), con alturas extremas de 500 a 2900 m, de clima cálido subhúmedo, precipitación promedio de 1492.8 mm y temperaturas extremas de 18 a

24 °C (Martínez *et al.*, 1991). La red fluvial incluye drenaje dendrítico, subdendrítico, pinado y algunos tributarios rectos, con longitud de 1081.9 km y 985 corrientes intermitentes y perennes (32 % del total de corrientes), orden máximo de corrientes siete, densidad de drenaje 2.67, frecuencia de corrientes 0.97 y relación de bifurcación 5.36. La pendiente promedio es de 37.6 % y coeficiente orográfico cinco. La producción anual del volumen escurrido es de 48,803.9 hm³ representando 46 % del volumen total del ANP.

Río Purificación. Esta cuenca colectora la conforman tres áreas tributarias que abarcan una superficie de 194.99 km² (14 % de la RBSM); registra una pendiente promedio de 36.9 % y alturas extremas de 300 a 2100 m, que propician climas semicálido subhúmedo, templado subhúmedo y cálido subhúmedo, con registro pluviométrico promedio de 1444 mm y temperaturas extremas de 20 a 36°C (Martínez *et al.*, 1991). La red fluvial tiene una longitud de 552.8 km con 560 corrientes intermitentes y perennes que representan 18 % del número total de la RBSM. La configuración hidrológica es dendrítica, subdendrítica y pinado con tributarios rectos. El orden máximo de corrientes es cinco, con densidad de drenaje 2.32, frecuencia

de corrientes 0.98, coeficiente orográfico 1.5 y relación de bifurcación de 5.56. La estimación del escurrimiento anual es de 20,715 hm³ (20 % del volumen total escurrido de la RBSM).

Con base en los resultados descritos, se identifica que la mayor respuesta hidrológica por unidad de superficie corresponde a la agrupación de las áreas tributarias al río Marabasco, con un volumen estimado de 123 hm³ km⁻²; las áreas del río Purificación con 106 hm³ km⁻², y para las áreas del río Ayuquila 45 hm³ km⁻².

La rapidez de concentración de la escorrentía superficial es favorecida por la dinámica fisiográfica de cada área de captación, en especial la pendiente y longitud del cauce principal, influenciada por la densidad de drenaje y litología, pero modificada por los tipos de cobertura vegetal, uso y manejo del suelo. Es por ello, que se establece que la modificación de la estructura y reducción de las zonas boscosas propician la pérdida de los servicios hidroeosistémicos en tiempo y espacio, dependientes de perturbaciones naturales o antropogénicas.

En este sentido, Méndez *et al.* (2015) evidencian la influencia del ambiente montañoso y magnitudes de eventos extremos de precipitación pluvial. González (2004) reconoce que esta condición favorece elevadas tasas de infiltración que alimentan el flujo subsuperficial y reducen el tiempo de concentración. Jones *et al.* (2020) establecen que el aumento de la cobertura forestal acelera la infiltración, incrementa el almacenamiento de humedad en el suelo, así como los registros pluviométricos y promueve la reducción de la energía cinética de la precipitación pluvial y de la escorrentía superficial, lo que reduce la erosión del suelo y mejora la calidad y cantidad del agua (seguridad hídrica).

Estos resultados son característicos de grandes altitudes y pendientes escarpadas, típicas de montaña que influyen en la respuesta hidrológica, por favorecer la velocidad de los flujos superficiales (UNESCO, 2008), ya que flujos cortos (orden de corrientes uno y dos) exhiben fuertes cambios de pendiente y elevados gradientes hidráulicos, típicos de sistemas torrenciales de ambientes montañosos, gran influencia en hidrogramas de pronunciados picos máximos instantáneos de avenidas y tiempos de concentración cortos (Méndez *et al.*, 2015).

La RBSM es una fuente significativa de recursos hídricos tanto de recarga como descarga a escala regional que varía en tiempo y espacio, distribuidos a través de la red fluvial hasta las cuencas colectoras. Este volumen se incrementa de junio a octubre, efecto de registros pluviométricos extremos de 869 mm a 1670 mm, que producen un volumen anual de 1121.3 hm³ a 3814.4 hm³ (Figura 9), siendo para las áreas colectoras los valores extremos de 182.4 hm³ para El Castillo y 24 914.8 hm³ para Cuzalapa. Para la reserva, el valor promedio es de 5284.95 hm³. En este sentido, el escurrimiento estimado para las áreas tributarias no refleja la proporcionalidad con relación a la superficie, ya que 46.2 % del volumen escurrido es captado en áreas de la cuenca del río Marabasco, que representa solo el 28.4 % de la superficie de la reserva. En contraste, 34.2 % del volumen estimado es captado en áreas tributarias al río Ayuquila que abarcan 57.6 % de la superficie de la reserva. Esta cuenca colectora, de acuerdo con Bunge (2010), experimenta una fuerte presión hídrica debido al uso y extracción en relación con su disponibilidad media total. Ante ello Zarco *et al.* (2010) la consideran prioritaria para la atención y conservación ecológica debido a su riesgo potencial, a diferencia de las otras cuencas colectoras que registran una presión hídrica moderada sin ser consideradas prioritarias. Finalmente, la cuenca del río Purificación representa 13.9 % de la superficie de la RSMB, y sus áreas tributarias producen 19.6 % del volumen total escurrido. Estos resultados están estrechamente relacionados con el grado de disección de cada área descrita, influida por las condiciones fisiográficas, edáficas y geológicas.

Las áreas tributarias se caracterizan por su relieve montañoso que muestran relación directa a las comunidades humanas ubicadas en zonas de topografía regular y plana, en las que se desarrollan actividades agropecuarias que reflejan la necesidad humana por utilizar los recursos suelo y agua, que lleva en la actualidad a un alto porcentaje de cambio de uso del suelo, incluso en áreas de topografía irregular y pendientes pronunciadas, definidas por grandes desniveles altitudinales, geoformas, relieves, red fluvial de bajos niveles de orden de corrientes y elevadas pendientes de perfiles longitudinales de ríos permanentes.

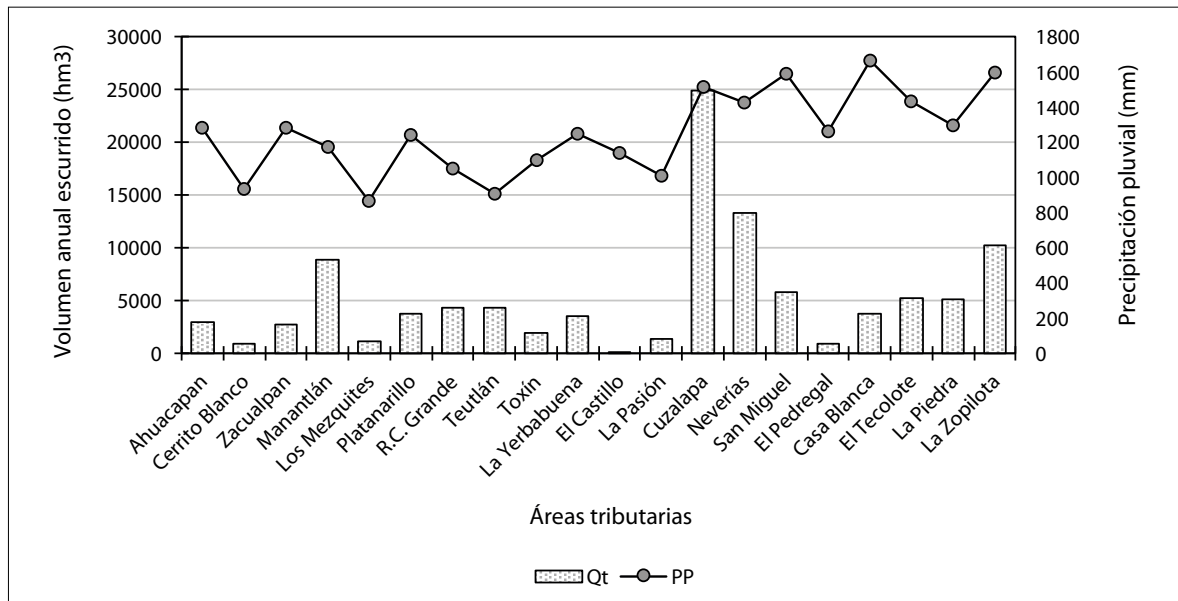


Figura 9. Volumen escurrido y registros de precipitación pluvial por área tributaria.

La correlación manifiesta entre las propiedades de la red fluvial con relación a las variables de superficie, manifiestan relaciones significativas positivas entre parámetros y sus correspondencias (Figura 10), resultado de las relaciones matemáticas y geométricas inherentes entre ellos.

Demissie (2022) reconoce que las actividades agrícolas y la reducción de la cobertura forestal son alteraciones que reducen la evapotranspiración y la infiltración, por ende, la recarga del agua subterránea. En este sentido, el uso del suelo con fines de explotación y el cambio del tipo de cobertura vegetal son reconocidos como los principales impulsores del cambio ambiental que afectan las condiciones hidráulicas de la red fluvial, deslizamientos e incremento del material sólido en suspensión, sedimentación de zonas bajas, incremento de caudales y humedad del suelo, propiciando inundaciones y desbordamientos de ríos que favorece el aislamiento de comunidades.

Es entonces que la respuesta hidrométrica con relación a las variables morfométricas manifiesta diferencias estadísticas significativas ($P < 0.001$, $H = 190.903$, 10 g.l.) entre grupos de tratamiento. Mediante la prueba de Tukey se observa que la dinámica hidrológica es influida por la densidad

de drenaje, la relación de bifurcación, el orden de corrientes y longitud de la corriente principal (Tabla 3).

Mediante la jerarquización de la red fluvial y el modelo digital de elevación (MDE) se identificaron tres zonas funcionales del ANP (Figura 11). La zona funcional alta (ZFA) representa 26.8% de la superficie total, se distribuye al centro de la reserva entre las UF occidental y oriental, 84.3% de esta zona se encuentra en las áreas de captación del río Ayuquila, 15.1% sobre la cuenca del río Marabasco y 0.6% en la cuenca del río Purificación. La ZFA se caracteriza por ser la zona de captación hídrica con laderas de montaña, pendientes predominantes del 60 a 90%, altitudes superiores a 1700 msnm y corrientes de primer y segundo orden que dirigen la humedad captada a las zonas funcionales media y baja. En ésta se distribuye más de 90% de la zona núcleo de la RBSM, circundada por la zona funcional media (ZFM), que representa 45.9% de la reserva identificada como zona de transición entre las zonas de captación y distribución, ya que almacena y distribuye el volumen captado de la precipitación pluvial. Su red fluvial está compuesta por corrientes de segundo, tercero y cuarto orden, ubicadas en zonas de montaña

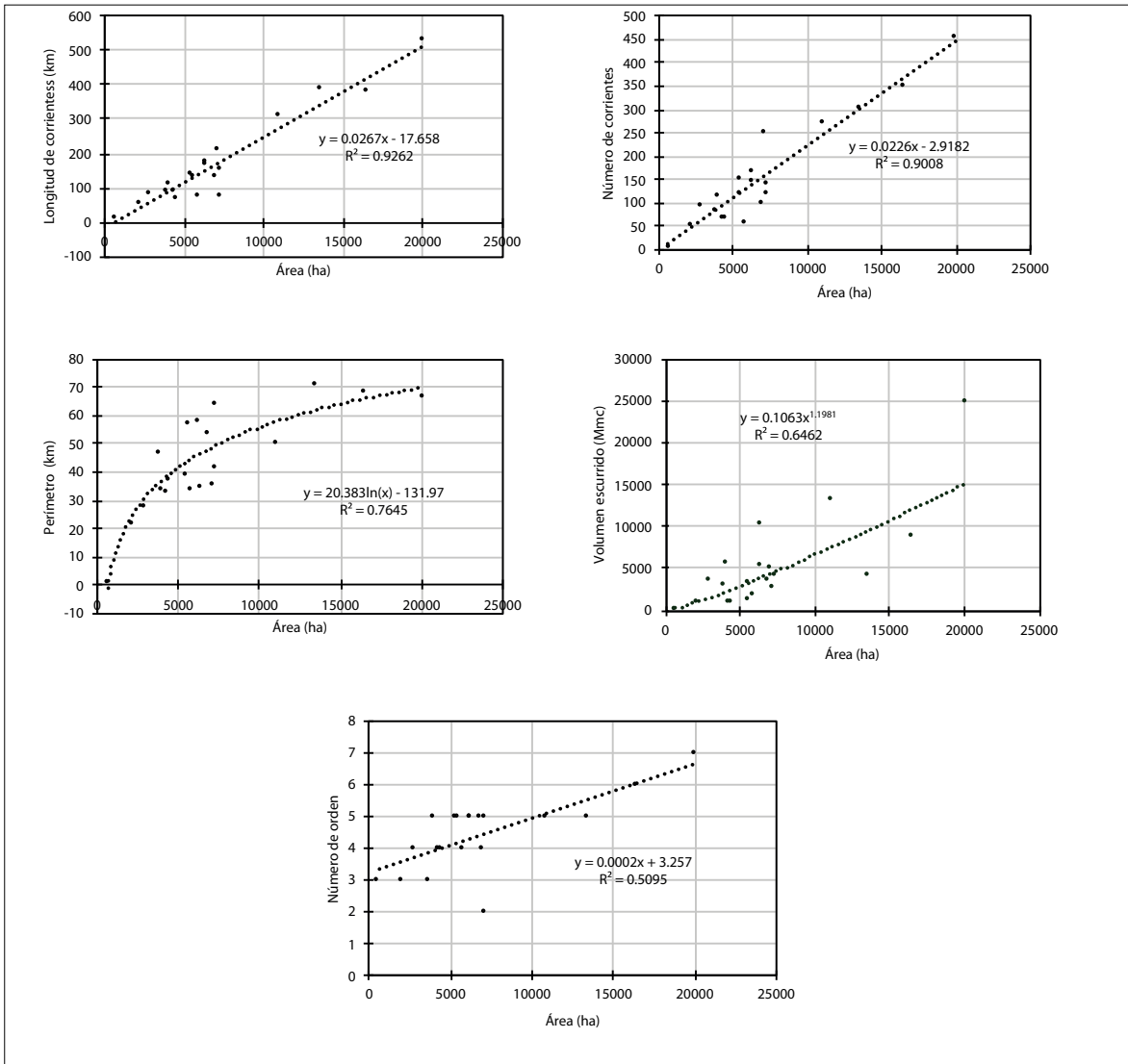


Figura 10. Correlaciones entre parámetros de forma y de corrientes.

con pendientes de 35 a 50%. En ésta se incluyen lomeríos, colinas y áreas interfluviales, así como piedemontes entre de 1000 a 1850 msnm. El 57.3% de esta zona se encuentra en las áreas de captación al río Ayuquila, 30.8% corresponden a la cuenca del río Marabasco y 12% a la cuenca del río Purificación.

Finalmente, la zona funcional baja (ZFB) cubre 27.3% del ANP, distribuida en los bordes de las áreas de captación de la reserva, 37.4% de la ZFB se distribuye en áreas tributarias al río Marabasco,

Tabla 3. Comparación múltiple mediante prueba de Tukey.

Comparación	Diferencia	q	P<0.05
Vol (hm3) vs Dd	3165.500	11.120	Yes
Vol (hm3) vs Rb	2452.500	8.615	Yes
Vol (hm3) vs No	2371.500	8.331	Yes
Vol (hm3) vs Lcp (km)	1931.000	6.783	Yes
Vol (hm3) vs P (km)	1327.500	4.663	Yes
Vol (hm3) vs Nc	817.500	2.872	No
Vol (hm3) vs Lc (km)	768.500	2.700	No

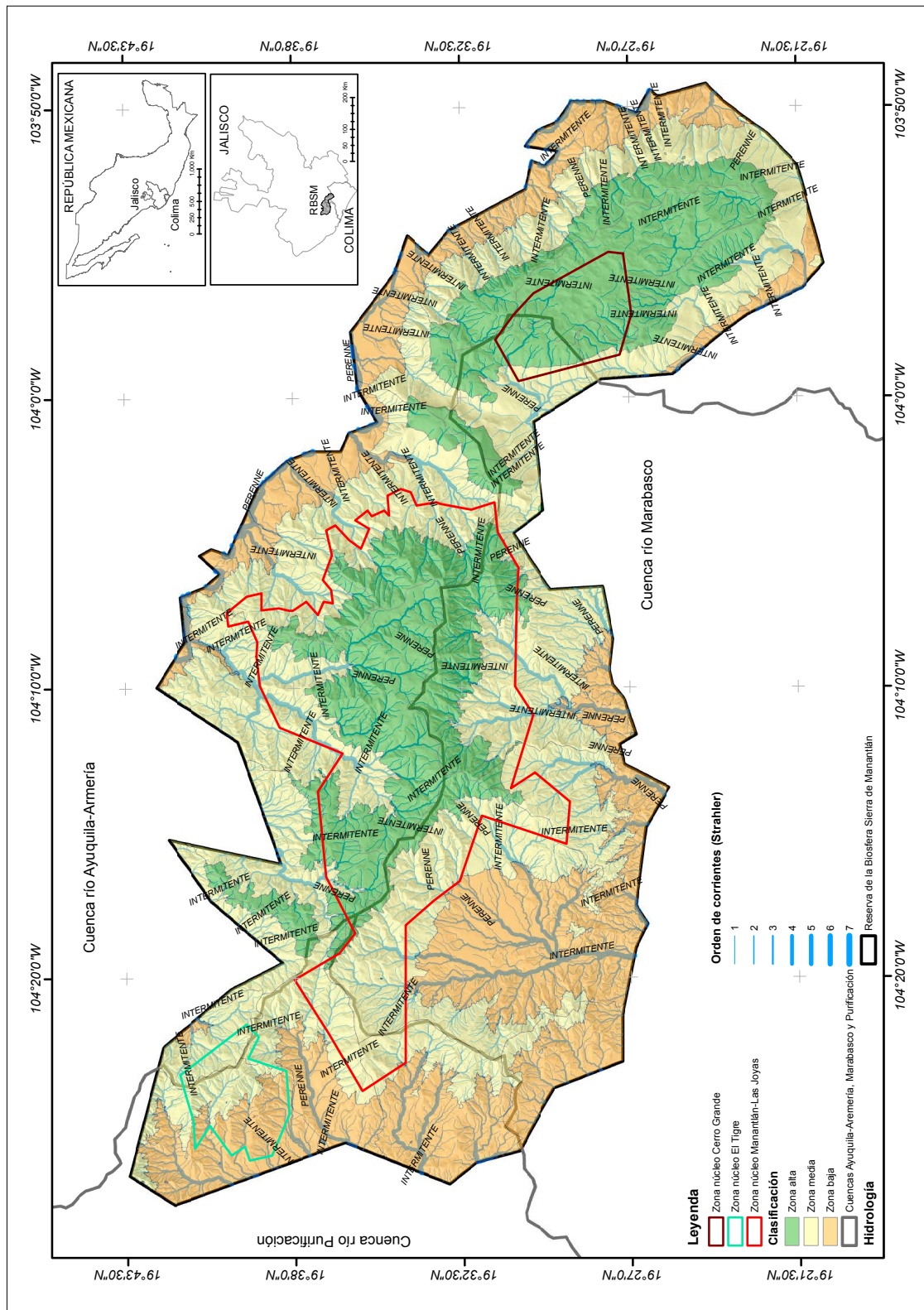


Figura 11. Distribución de zonas funcionales de la RBSM.

32.1% al río Ayuquila y 30.5% en el río Purificación. Esta zona es considerada la zona de recepción y emisión del sistema fluvial, compuesta por corrientes de quinto, sexto y séptimo orden que desembocan a cauces principales que drenan valles productivos a la zona de influencia de la RBSM. Condiciones que sugieren áreas propensas a inundación y deposición de suelos, acelerada por las actividades productivas, cambios de patrón de cultivos y deforestación. Oreano-Hernández y Hernández-Guerrero (2022) reconocen que cualquier alteración que se realice en alguna de las zonas funcionales, repercutirá en todo el sistema de captación. Valdés-Carrera y Hernández-Guerrero (2018) destacan que estas zonas, permiten explicar la dinámica y evolución de sus componentes a diferentes escalas, además de facilitar el análisis integral de planificación de las actividades de manejo.

CONCLUSIONES

La estructura hidrográfica y dinámica hidrométrica de la RBSM está influenciada por procesos geomorfológicos, el ambiente local y las actividades productivas. Se identifica el uso de los SIG como una herramienta eficaz para la planificación del uso del suelo en zonas de montaña y planicies dentro del ANP y su área de influencia. La conservación de áreas hidrográficas es vital para garantizar la seguridad hídrica de las comunidades locales que contribuyen a la resiliencia frente al cambio climático.

El análisis morfométrico e hidrológico de la RBSM revela una interacción compleja entre factores geológicos, topográficos y climáticos, que aumentan la susceptibilidad a eventos extremos. Por esto, las cuencas de los ríos Ayuquila, Marabasco y Purificación presentan respuestas hidrológicas diferenciadas. Y la primera de estas resulta prioritaria para su conservación debido a la sobreexplotación hídrica por actividades agrícolas y domésticas.

La zonificación funcional de la RBSM en áreas de captación, transición y distribución enfatiza la importancia de mantener la cobertura forestal en zonas altas para asegurar la infiltración y recarga de acuíferos. Alteraciones como la deforestación tie-

nen repercusiones significativas, ya que aumentan el riesgo de inundaciones y reducen la seguridad hídrica a corto, mediano y largo plazo. Por ello, la gestión de la RBSM requiere un enfoque holístico que equilibre la conservación de recursos naturales con las actividades humanas, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y la protección de bosques.

Limitaciones del estudio

La caracterización morfométrica y estimación de escurrimientos en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM) reveló limitaciones que dificultan la generalización de resultados y sugieren áreas para futuras investigaciones. La falta de estaciones hidrométricas y meteorológicas afectó la precisión de los cálculos al aplicar el método de Curvas Numéricas. Además, la variabilidad espacial y temporal del uso del suelo, influenciada por cambios en los patrones de cultivo y deforestación, así como las condiciones hidrológicas y tipos de suelos, complicaron los análisis. El método SCS-CN, aunque útil, no consideró procesos como la infiltración profunda o la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, lo que pudo afectar la precisión de las estimaciones de escurrimientos a nivel microcuencas.

Propuestas de direcciones futuras

Se propone, en tanto líneas de investigación próximas, la evaluación de impactos antrópicos en la dinámica hidrológica para identificar áreas críticas para la conservación y manejo holístico. También se plantea el estudio de la seguridad hídrica, los factores que impactan el cambio climático en la disponibilidad de agua y la dinámica de los escurrimientos de futuros escenarios.

REFERENCIAS

- Benítez, J. A. (2010). Situación actual de las cuencas de los ríos Candelaria y Hondo. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización*. (pp. 203-209). SEMARNAT, Fundación Río Arronte.
- Bunge, V. (2010). La presión hídrica en las cuencas de México. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográ-*

- ficas de México diagnóstico y priorización. (pp. 88-91). SEMARNAT, Fundación Río Arronte.
- CONANP. (2020). *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2014-2018*. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/programa-nacional-de-areas-naturales-protegidas>.
- Cotler, A. H. (2010). Perspectiva sobre las cuencas hidrográficas de México: Introducción. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización*. (pp. 4-7). SEMARNAT, Fundación Río Arronte.
- Flores-López, H. E., Ramírez-Vega, H., Byerly-Murphy, K. F., Ruiz-Corral, J. A., Martínez-Sifuentes, J. A., Díaz-Mederos, P., y Alemán-Martínez, V. (2003). Estimación de escurrimiento superficial en la cuenca El Jihuite, México. *Terra Latinoamericana*, 21(3), 389-400.
- Francisco-Nicolás, N., Turrent-Fernández, A., Flores-López, H. E., Martínez-Menes, M. R., y Enríquez-Quiroz, J. F. (2009). Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71-78.
- Delgado, M. A., y Gaspari, F. J. (2010). Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia*, IV(3), 154-163.
- Demissie, T. A. (2022). Land use and land cover change dynamics and its impact on watershed hydrological parameters: the case of Awetu watershed Ethiopia. *Journal of Sedimentary Environments*, (7), 79-94. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43217-021-00084-1>
- Doffo, N., y González, B. G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 60(1), 16-22.
- Gaspari, F. J., Rodríguez, V. A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., y Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augmodus*, (4), 143-158.
- González, M. A. I. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicados a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la A.G.E.*, (38), 311-329.
- Guevara, G. R. D., Olguín, L. J. L., Mancilla, V. O. R., Barreto, G. O. A. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *GeoFocus*, (24), 141-139. DOI: <http://dx.doi.org/10.21138/GF.62>
- Instituto Nacional de Ecología. (2000). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.
- Jiménez, S. C. L., Sosa, R. J., Cortés-Calva, P., Breceda, S. C. A., Íñiguez, D. L. I., y Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 16-22.
- Jones, J. A., Wei, X., Archer, E., Bishop, K., Blanco, J. A., Ellison, D., Gush, M. A., McNulty, S. G., Van Noordwijk, M., & Creed, I. F. (2020). Forest-Water Interactions Under Global Change. *Forest-Water Interactions. Ecological Studies*, (240) 589-624. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_24
- Lazcano, S. C. (1988). *Las cavernas de Cerro Grande. Estados de Jalisco y Colima*. Laboratorio Natural Las Joyas, Universidad de Guadalajara.
- Martínez, R. L. M., Sandoval, L. J. J., y Guevara, G. R. D. (1991). El clima de la Reserva de Biósfera Sierra de Manantlán (Jalisco-Colima, México) y en su área de influencia. *Agrociencia*, 2(4), 107-119.
- Méndez, M. W. J. (2016). Análisis cuantitativo del relieve en cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (estado Vargas, Venezuela) y su significado hidro geomorfológico. *Investigaciones Geográficas*, (91), 25-42. DOI: <http://doi.org/10.14350/rig.4772>
- Méndez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., y León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 133-156.
- Méndez, M. W. J., Carrera, R. J. M., y Rivas, R. L. J. (2015). Geomorfometría de cuencas de drenaje de la vertiente norte del macizo "El Ávila" (Estado Vargas, Venezuela): Implicaciones hidromorfo dinámicas. *Revista Brasileira de Geomorfología*, (16), 3 501-530.
- Oreano-Hernández, S. y Hernández-Guerrero, J. (2022). Inundaciones por zonas funcionales en la subcuenca Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, México. *Revista Geográfica de América Central*, (68), 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.9>
- Ortiz, P. M. A. (2010). Clasificación ecogeográfica de cuencas hidrográficas: El caso de México. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización* (pp. 25-27). SEMARNAT, Fundación Río Arronte.
- Quevedo-Tiznado, J. A., Mobayed-Khodr, N., Fuentes-Ruiz, C., González-Sosa, E., y Chávez-García, C. A. (2016). Simulación del escurrimiento directo de eventos en cuencas pequeñas con el modelo Hidras. *Agrociencia*, 50(7), 787-798.
- Sánchez, V. A. (1987). Conceptos elementales de hidrología forestal, agua, cuenca y vegetación. Chapingo.
- Valdés-Carrera, A., y Hernández-Guerrero J. A. (2018). Zonas funcionales y unidades de paisaje físico-geográ-

fico en la microcuenca Potrero de la Palmita, Nayarit, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(60), 189-229. DOI: <https://doi.org/dx.doi.org/10.15359/rgac.60-1.7>

Zarco, A. A. E., Espinosa, G. A. C., y Mazari, H. M. (2010). Riesgo potencial de las actividades del sec-

tor del sector económico sobre la biodiversidad y la salud humana. En H. Cotler (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización* (pp. 112-19). SEMARNAT, Fundación Río Arronte.