

Regionalización hidrológica de una cuenca en Veracruz, México mediante técnicas multivariadas

Hydrological regionalization of a basin in Veracruz, Mexico using multivariate
techniques

Recibido: 22/07/2024 | Aceptado: 29/05/2025

 <https://doi.org/10.48162/rev.55.074>

Juan Carlos Olivo Escudero

Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social Unidad Regional Golfo
Veracruz, México

 <https://orcid.org/0000-0002-5123-9949>
juan.olivo@ciesas.edu.mx

Ricardo Pérez Indoval

Universitat Politècnica de València, Spain

 <https://orcid.org/0009-0003-7661-8384>
hidroindoval@gmail.com

Cómo citar: Olivo Escudero, J. C. y Pérez Indoval, R. (2025). Regionalización hidrológica de una cuenca en Veracruz, México mediante técnicas multivariadas. *Revista Proyección, Estudios Geográficos y de Ordenamiento Territorial*, (37), Instituto CIFOT, Universidad Nacional De Cuyo, 145-164, ISSN 1852-0006.

Resumen: La clasificación de paisajes y la regionalización hidrológica son herramientas clave para la planificación territorial y el análisis de los recursos hídricos. Este estudio presenta una metodología para delimitar regiones hidrológicas en la subcuenca del río Misantla, Veracruz, México, mediante un sistema de información geográfica y análisis estadístico multivariado. Se consideraron siete variables cuantitativas relacionadas con la geomorfología, el clima y la textura/permeabilidad del sustrato. Se identificaron cinco regiones con patrones diferenciados de flujo hídrico, donde predomina la escasa infiltración profunda en la mayor parte de la cuenca. Las regiones medias y bajas presentan flujos principalmente superficiales y subsuperficiales someros, con capacidad limitada de recarga al acuífero. Solo en la desembocadura se observa una infiltración significativa hacia el subsoil. Esta caracterización hidrológica ayuda a explicar la vulnerabilidad del territorio ante avenidas extraordinarias e inundaciones. La técnica propuesta constituye una herramienta útil para la gestión del territorio y puede replicarse en otras cuencas con condiciones ambientales similares.

Palabras clave: paisajes hidrológicos, análisis de componentes principales, análisis de clúster, planificación del territorio

Abstract: Landscape classification and hydrological regionalization are key tools for territorial planning and water resource analysis. This study presents a methodology to delineate hydrological regions in the Misantla River sub-basin, Veracruz, Mexico, using a geographic information system and multivariate statistical analysis. Seven quantitative variables were analyzed, including geomorphology, climate, and substrate

texture/permeability. Five regions with distinct hydrological patterns were identified, where limited deep infiltration predominates throughout most of the basin. Middle and lower areas are characterized by surface and shallow subsurface flows, with restricted aquifer recharge. Only near the outlet is deep infiltration notably present. This hydrological characterization explains the basin's vulnerability to flash floods and extreme runoff events. The proposed technique offers a practical tool for territorial management and can be adapted to other basins with similar environmental conditions.

Keywords: Hydrological Landscapes, Principal Component Analysis, Cluster Analysis, Territorial Planning

Introducción

La integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el análisis estadístico multivariado ha emergido como un enfoque eficaz para la regionalización hidrológica, al ofrecer un marco robusto para evaluar y gestionar los recursos hídricos a escala de cuenca. Este estudio se centra en la subcuenca del río Misantla, en Veracruz, México, una región históricamente afectada por inundaciones y deforestación (González, 2023), lo que ha aumentado la vulnerabilidad de las comunidades locales ante eventos hidrológicos extremos. Mediante el uso del concepto de paisaje hidrológico propuesto por Wolock, Winter y McMahon (2004) y Winter (2001), esta investigación delimita cinco regiones hidrológicas (RH) con base en parámetros geomorfológicos, climáticos y de permeabilidad del sustrato. La metodología no solo mejora la comprensión de los patrones hidrológicos espaciales, sino que también ofrece insumos útiles para la planificación territorial y la gestión del riesgo de la localidad y replicables en otras latitudes.

La regionalización hidrológica es una herramienta clave para identificar zonas homogéneas dentro de una cuenca, cada una caracterizada por dinámicas específicas de flujo de agua, como escorrentía superficial, flujo subsuperficial y recarga de acuíferos (Álvarez-Olguín, Hotait-Salasy Sustaita-Rivera, 2011). Los enfoques tradicionales suelen basarse en segmentaciones altitudinales como "cuenca alta", "media" y "baja" (Paré y Geréz, 2012; Cruz-Cárdenas et al., 2017) o en criterios morfológicos, que pueden ignorar procesos hidrológicos funcionales. En contraste, este estudio adopta un marco holístico que integra topografía, geología y clima para definir Unidades Fundamentales de Paisaje Hidrológico (UFPHE) similar al de geocomplejos ya que utiliza aspectos simultáneamente fisionómicos y funcionales (Priego, Bocco, Mendoza y Garrido, 2008). Estas unidades capturan la interacción entre los flujos de agua atmosféricos, superficiales y subterráneos, en línea con el modelo Tothiano gravitacional de flujo subterráneo (Tóth, 1970, 2016) y ofrecen una base más precisa para la modelación hidrológica y gestión de cuencas (Ortega-Guerrero, 2023). Lo cual es útil para definir espacios homogéneos dentro de las cuencas hidrográficas, facilitando la comprensión de la dinámica del sistema hidrológico (Cotler y Priego, 2007).

En el ámbito internacional se ocupó el enfoque de paisaje hidrológico en Brasil para proponer un indicador de producción y almacenamiento de agua (Mortene y Machado, 2020). Adicionalmente se han usado los paisajes hidrológicos para la caracterización hidrogeológica en Ontario y para describir las dinámicas de los flujos de agua subterránea en tres lagos en la provincia de Alberta en Canadá (Hokanson *et al.*, 2022; Sharpe, 2022).

La subcuenca del Misantla ejemplifica los desafíos de conservar los recursos hídricos frente a presiones antrópicas. Con una superficie de 585 km², alberga ecosistemas diversos, desde bosques mesófilos en las zonas altas hasta planicies agrícolas costeras. Sin embargo, la deforestación y los cambios en el uso del suelo han alterado los servicios hidrológicos, aumentando el riesgo de inundaciones en áreas urbanas aguas abajo, como en la ciudad de Misantla (Centro Nacional de Prevención de Desastres –CENAPRED–, 2017; Zamora-Castro, 2016; Hansen *et al.*, 2013). Aunque estudios previos han modelado zonas propensas a inundaciones con herramientas como SWAT (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2020) y HEC-RAS (Zamora-Castro *et al.*, 2022), la regionalización funcional basada en paisajes hidrológicos no había sido explorada, limitando intervenciones dirigidas para aumentar la resiliencia ante eventos climáticos extremos.

Para abordar esta limitación, el estudio combina SIG y estadística multivariada (análisis de componentes principales y agrupamiento k-means) para clasificar 127 unidades de escurrimiento superficial (UES) en cinco regiones hidrológicas (RH). Los parámetros clave incluyen amplitud altitudinal, pendiente, precipitación menos evapotranspiración y permeabilidad del suelo/subsuelo.

Los resultados muestran comportamientos hidrológicos específicos por región:

- RH1 (zona media-alta): alta humedad y permeabilidad moderada favorecen flujos subsuperficiales.
- RH2 (zona media): escorrentía superficial predominante por baja permeabilidad.
- RH3 (zona alta): pendientes pronunciadas y permeabilidad media con flujos subsuperficiales someros.
- RH4 (zona media-baja): baja infiltración y alta escorrentía.
- RH5 (desembocadura): alta infiltración a acuífero con baja humedad, riesgo de intrusión salina.

Esta regionalización desafía supuestos tradicionales, como asociar zonas altas con recarga de acuíferos. Por ejemplo, RH3, aunque montañosa, aporta principalmente escorrentía superficial, mientras que RH1, en la parte media, es crucial para la recarga. Estos hallazgos son fundamentales para localizar

acciones de conservación, como la reforestación en RH1 para mitigar inundaciones y conservar aguas subterráneas.

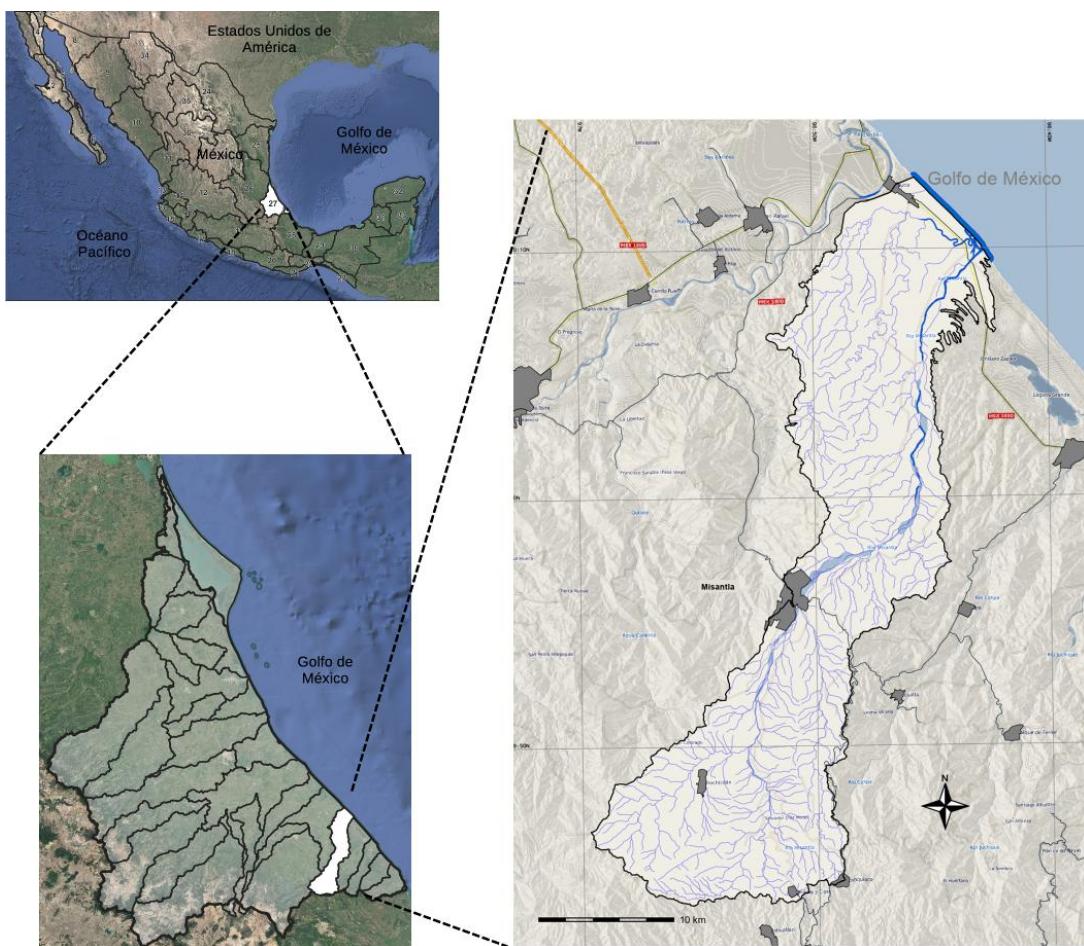
La metodología del estudio, alineada con aplicaciones internacionales (Sharpe, 2022; Mortene y Machado, 2020), se adapta a la geodiversidad mexicana y supera limitaciones de esfuerzos previos basados en morfometría estática. Futuros estudios deberán validar las RH con datos de campo y evaluar impactos del cambio en el uso del suelo, dado que datos preliminares sugieren una recuperación forestal en zonas altas (Hansen *et al.*, 2013; Instituto Nacional de Estadística y Geografía –INEGI–, 2021).

Al vincular marcos teóricos con necesidades de planificación, esta investigación promueve insumos técnicos valiosos para una gobernanza hídrica sostenible en la subcuenca del Misantla y ofrece un enfoque replicable para otras regiones con desafíos hidrológicos y climáticos similares.

Metodología

Zona de estudio

La subcuenca del río Misantla es el área de estudio del presente artículo y se localiza en la región central del estado de Veracruz, México, dentro de la Región Hidrológica 27 "Tuxpan-Nautla" y forma parte de la cuenca del río Nautla. Con una extensión de 585 km², presenta un gradiente altitudinal que va desde los 0 msnm en su desembocadura en el Golfo de México hasta los 2,680 msnm en sus zonas más elevadas (INEGI, 2010). Limita al norte con el Golfo de México, al oeste con las subcuenca de los ríos Nautla y Bobos, al sur con la subcuenca del río Sedeño y al este con la del río Colipa (INEGI, 2010) (Figura N.^o 1).

Figura N.º 1. Ubicación general de la subcuenca del río Misantla

Fuente: Elaboración propia a partir de (INEGI 2010, 2013).

De acuerdo con el FIRCO y la SAGARPA (Casillas-González, 2010), la subcuenca del Río Misantla está dividida en seis microcuencas: Tenochtitlán, Landero y Coss, Misantla, Gutiérrez Zamora, Venustiano Carranza y el Ciervo o San José Buena Vista. La corriente principal de la subcuenca tiene una longitud total de 65.7 km y se origina en el arroyo Suspiro, muy cerca del punto de máxima altitud de la subcuenca, a 3 km de la localidad de Monte Real en el municipio de Tonayán.

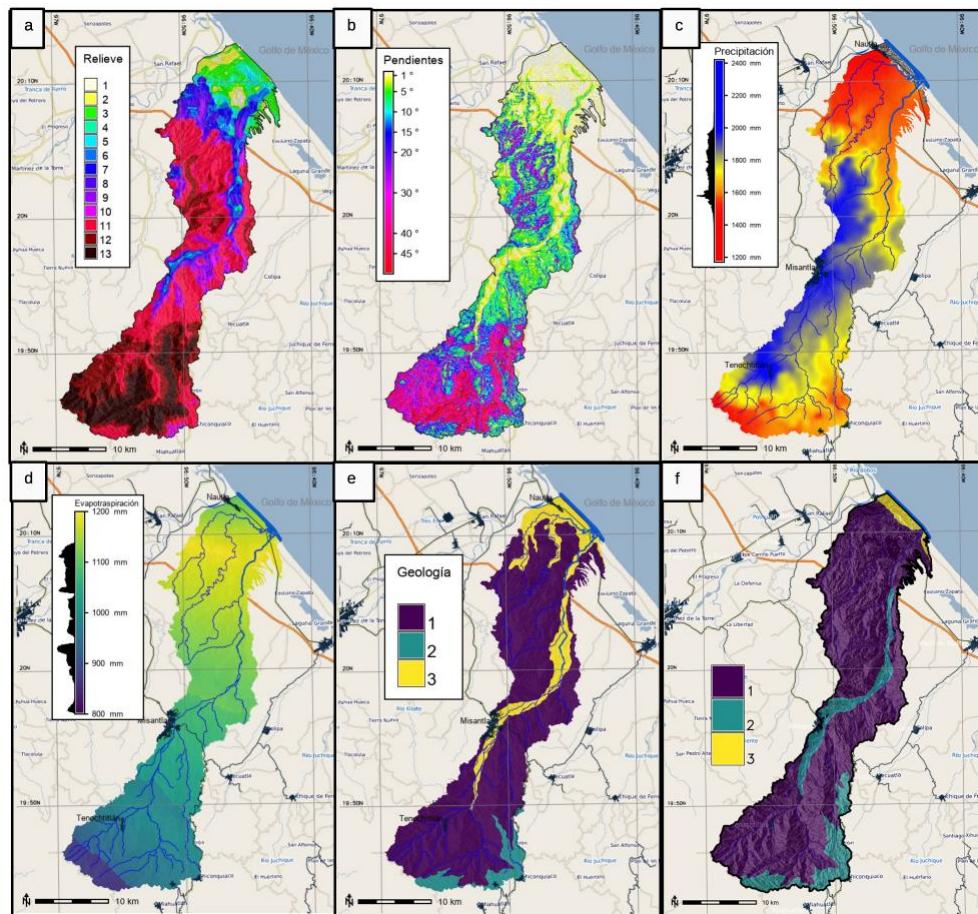
La subcuenca presenta un variado conjunto de usos del suelo y vegetación. Según los datos de la carta de Uso del Suelo y Vegetación serie VII del INEGI (2021), en la parte sur, la más alta, cuenta con 8,989 ha de bosque mesófilo de montaña en buen estado de conservación y vegetación secundaria derivada de este; además, hay superficies dedicadas a la ganadería como pastizales cultivados (3,298 ha). En la parte media 752 ha son de bosque de galería, sin embargo, tanto en esta como en las zonas bajas el grado de antropización es alto, debido a la existencia de grandes superficies (24,327 ha) de pastizal

cultivado y agricultura de temporal, así como un área mínima de vegetación secundaria arbustiva y herbácea de selva mediana (2,726 ha).

Por otra parte, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (2001), en la subcuenca se presentan cinco tipos de climas desde Cálido subhúmedo Aw(x') en la parte baja; hasta Templado húmedo C(fm) en la parte alta. Predomina el tipo (A)C(fm), es decir, Semicálido húmedo del grupo C en la parte media alta con una temperatura media anual mayor de 18 °C, una mínima de 18 °C en el mes más frío y una máxima mayor de 22 °C en el mes más caliente.

El relieve o la disección vertical de la subcuenca del Río Misantla, atendiendo a la clasificación de la morfometría (Bocco, Priego y Cotler, 2005) (ver **Tabla N.º 1**); está compuesta principalmente por montañas (63 %), desde ligeramente diseccionadas hasta fuertemente diseccionadas: la parte alta se distingue por presentar terrenos montañosos fuertemente diseccionados, mientras que la parte baja va de llanuras planas a llanuras colinosas (ver **Figura N.º 2a**; los números de la leyenda corresponden a las categorías de pendiente de la **Tabla N.º 1**).

Figura N.º 2. Características de la subcuenca del río Misantla a) Amplitud de relieve o disección vertical del paisaje; b) Pendientes; c) Precipitación; d) Evapotranspiración; e) Geología; y f) Tipos de suelos.



Fuente: Elaboración propia a partir de a) INEGI (2013); b) INEGI (2013); c) Fernández-Eguiarte et al. (2012); d) Mederey (1990); e) INEGI (2017); f) INEGI (2013, 2014).

Tabla N.º 1. Categorías de relieve de la subcuenca del río Misantla

	Categoría de relieve	Hectáreas	%
1	Planicies subhorizontales	340	0.6
2	Planicies onduladas, ligeramente diseccionadas	1254	2.1
3	Planicies onduladas, medianamente diseccionadas	3002	5.0
4	Planicies onduladas, fuertemente diseccionadas	1769	3.0
5	Planicies acolinadas, ligeramente diseccionadas	892	1.5
6	Planicies acolinadas, medianamente diseccionadas	2263	3.8
7	Planicies acolinadas, fuertemente diseccionadas	2260	3.8
8	Lomeríos, ligeramente diseccionados	2872	4.8
9	Lomeríos, medianamente diseccionados	2775	4.7
10	Lomeríos, fuertemente diseccionados	3167	5.3
11	Montañas, ligeramente diseccionadas	19309	32.5
12	Montañas, medianamente diseccionadas	11297	19.0
13	Montañas, fuertemente diseccionadas	8293	13.9

Fuente: Elaboración propia a partir de la clasificación de Bocco, Priego y Cotler (2005).

La subcuenca del Río Misantla tiene una pendiente media de 14.7° con un rango que va de los 0° a los 72.2°. En la Figura N.º 2b se muestran los tipos de

pendientes en la superficie total de la subcuenca. Se puede apreciar también en la Tabla N.º 2 que predominan las áreas con pendientes menores a 1° catalogadas como “superficies subhorizontales (22.18 %), le siguen las “ligeramente inclinadas” de 1° a 3° (14.42 %) y finalmente las “Muy fuertemente inclinadas” de 45° (12.45 %).

Tabla N.º 2. Resumen de tipos de pendientes en la subcuenca del río Misantla

	Categoría de pendientes	Hectáreas	%
1	Superficies subhorizontales < 1°	13170	22.18
2	Muy suavemente inclinadas 1°- 3°	7125	12.00
3	Suavemente inclinadas 3°-5°	4286	7.22
4	Ligeramente inclinadas 5°-10°	8561	14.42
5	Ligera a medianamente inclinadas 10°- 15°	5950	10.02
6	Medianamente inclinadas 15°-20°	4257	7.17
7	Fuertemente inclinadas 20°-30°	6324	10.65
8	Muy fuertemente inclinadas 30°-45°	7389	12.45
9	Abruptas > 45°	2303	3.88

Fuente: Elaboración propia a partir de la clasificación de Bocco, Priego y Cotler (2005).

En cuanto al régimen de precipitación, la subcuenca presenta lluvias entre verano e invierno; el mes más seco es mayor de 40 mm y porcentaje de lluvia invernal menor al 18 % del total anual (INEGI, 2006). De conformidad con los datos de la UNAM (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2012) la precipitación media anual en la subcuenca va de los 1170 mm a los 2421 mm, presentando las cifras más altas en la parte central de la cuenca en donde se ubican valores superiores a 1900 mm (ver **Figura N.º 2c**).

La subcuenca presenta una evapotranspiración anual entre los 800 mm y 1100 mm con valores más altos en la parte norte con menor altitud, cerca de su desembocadura al Golfo de México. Las cifras más bajas de evapotranspiración se concentran al sur que coincide con la parte alta de la cuenca montañosa con menores temperaturas (Maderey, 1990) (ver **Figura N.º 2d**).

Los datos hidrometeorológicos fueron tomados de cartografía procesada por la Universidad Nacional Autónoma de México (Fernández-Eguiarte *et al.*, 2012; y Maderey, 1990) mismas que usan información de la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (Comisión Nacional del Agua –CONAGUA–, 2010). En particular son relevantes los datos base de las estaciones: El Raudal (30054) del municipio de Nautla, Yecuatla (30398), Misantla (30108) y Tenochtitlán (30462) en los municipios del mismo nombre.

Según el Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana escala 1:250,000 (INEGI, 1986) (Servicio Geológico Mexicano, 2005) y el Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I. (INEGI, 2017) una gran superficie (79 %) de la subcuenca tiene sustratos de origen volcánico y aluviones y una pequeña porción (15 %) está compuesto por

las lutitas y areniscas (ver **Figura N.º 2e**; los números corresponden a: 1) sustratos de origen volcánico; 2) lutitas y areniscas y 3) aluviones.

En cuanto a las características edafológicas de la subcuenca tenemos que en ella se presentan 19 tipos de suelos de acuerdo con el Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional (INEGI, 2014) con tres tipos de textura que definen su permeabilidad de 1 poco permeable, 2 medianamente permeable y 3 permeable (**ver Figura N.º 2f y Tabla N.º 3**).

Tabla N.º 3. Tipos de suelo presentes en la subcuenca del río Misantla categorizados por su permeabilidad

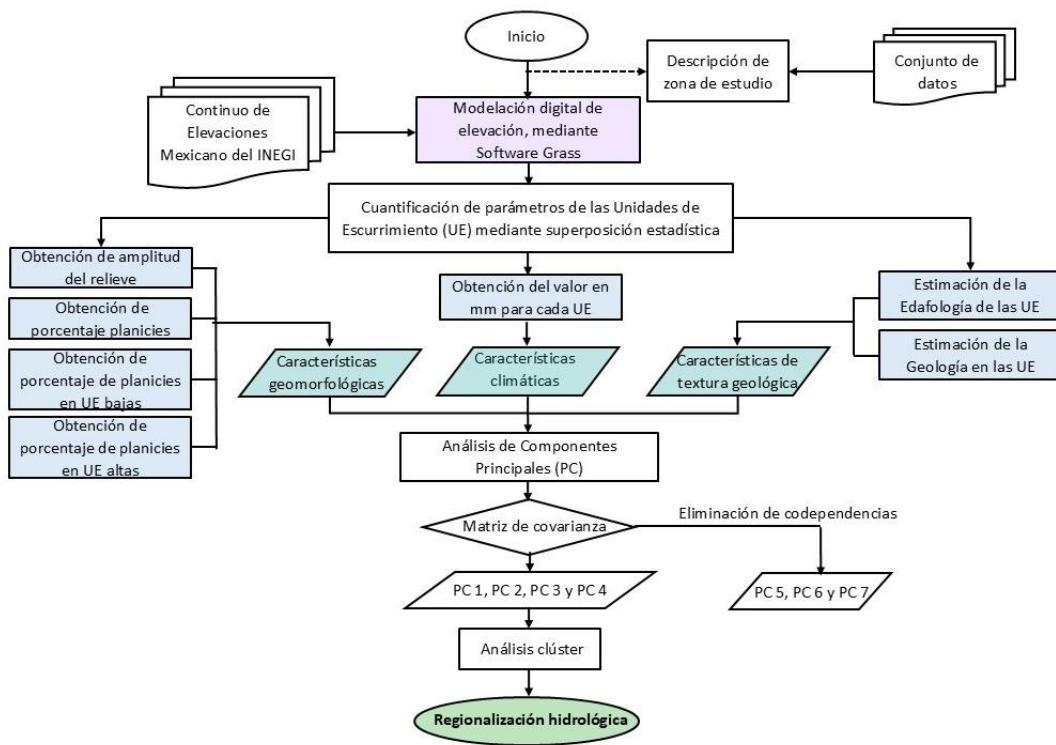
Tipo de suelo		Permeabilidad
1	Luvisol	Húmico/ Esquelítico 1
2	Vertisol	N/Pélico 1
3	Gleysol	N 1
4	Andosol	N/ Pquico 2
5	Phaeozem	N 2
6	Regosol	N 3

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2014).

Diseño metodológico

Modelación hidrológica mediante análisis multivariado

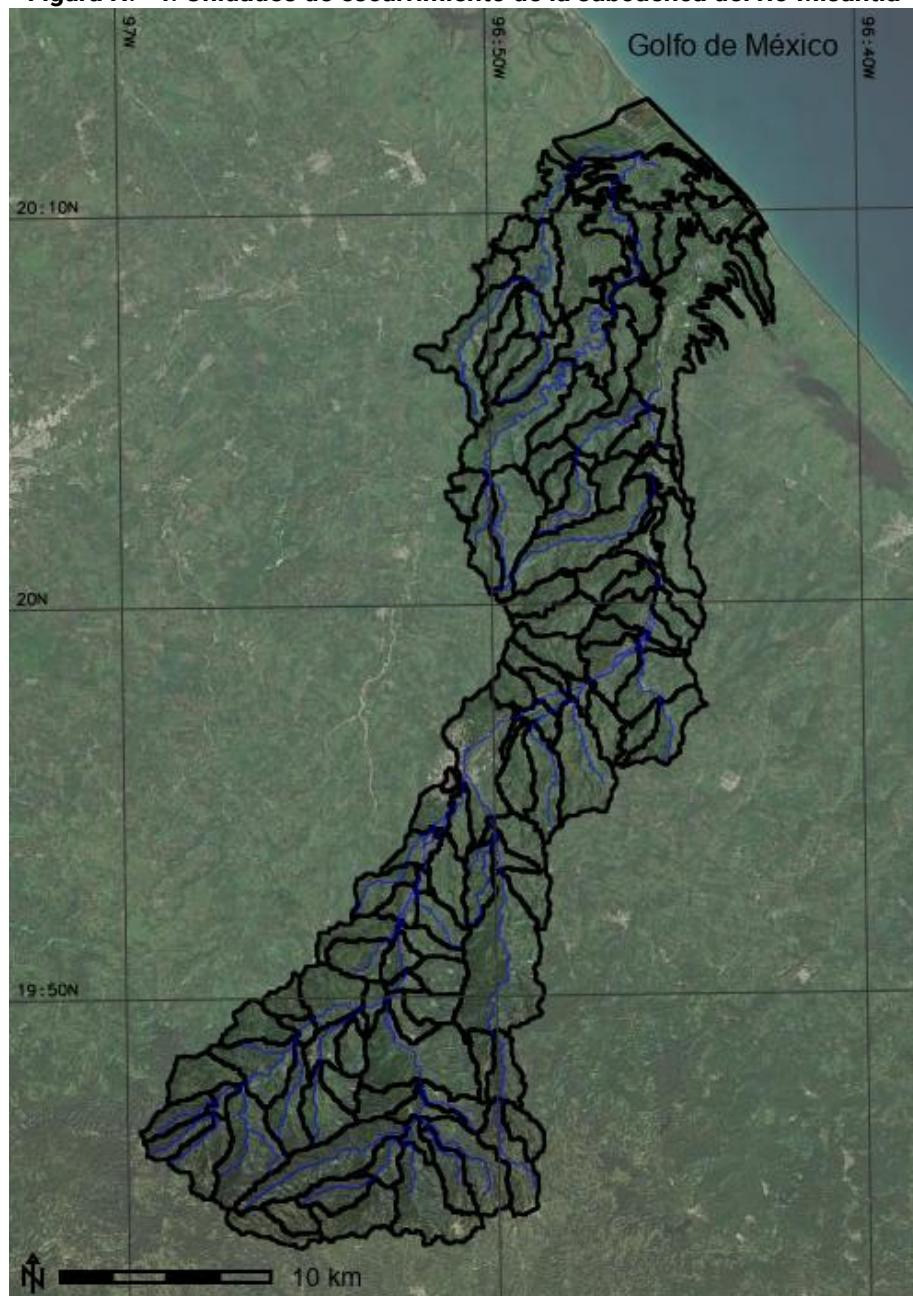
El objetivo central de la metodología fue regionalizar la subcuenca en unidades hidrológicas funcionales mediante un enfoque multivariado, utilizando el concepto de Unidad Fundamental de Paisaje Hidrológico (UFPH) propuesto por Winter (2001) y operacionalizado por Wolock, Winter y McMahon (2004). Este concepto considera la interacción de variables topográficas, geológicas y climáticas como base para identificar unidades homogéneas en términos de dinámica hidrológica. La metodología combinó el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con técnicas de análisis estadístico multivariado para lograr una delimitación objetiva y reproducible de regiones hidrológicas (RHs). A continuación, se presenta un diagrama de flujo que sintetiza los pasos metodológicos empleados.

Figura N.º 3. Diagrama de flujo de metodología

Fuente: Elaboración propia con base en Wolock, Winter y McMahon (2004).

Subdivisiones hidrográficas (Unidades de Escurrimiento)

Se comenzó con un preproceso que consiste en la delimitación de Unidades de Escurrimiento (UE en adelante) aplicando el algoritmo de búsqueda de menor costos (Ehlschlaeger, 1989) implementado en el software GRASS, con datos del Continuo de Elevaciones Mexicano del INEGI con una resolución de 15 m y el parámetro “límite” configurado en 10,000 m. El proceso arrojó la delimitación de 127 UE que cuentan con una superficie de entre 50 y 2,385 ha. (ver **Figura N.º 4**) y se usaron para la cuantificación de los parámetros morfológicas de la superficie del terreno, textura geológica y características climáticas, mismas que definen las UFPH y a su vez son la base de la regionalización hidrológica.

Figura N.º 4. Unidades de escurrimiento de la subcuenca del río Misantla

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2010, 2013).

Caracterización geomorfológica, climática y de textura geológica de las UE

La caracterización se realizó mediante el procesamiento y análisis espacial de cartografía temática digital, con el propósito de definir parámetros que sustentan la regionalización hidrológica. Se consideraron tres características principales: geomorfología, clima y textura geológica.

Características geomorfológicas del relieve

La evaluación geomorfológica se fundamentó en un Modelo Digital de Elevación (MDE) proveniente del Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2013), con una

resolución espacial de 15 metros. Los análisis se realizaron en el entorno del software GRASS GIS (2023), empleando herramientas de superposición estadística zonal. Los atributos calculados fueron los siguientes:

Amplitud del relieve o disección vertical: Se definió como la diferencia entre los valores máximos y mínimos de altitud dentro de cada UE.

Pendiente del terreno: Fue calculada mediante el algoritmo de modelación de superficies de Mitasova (1985). A partir de esta información y del valor medio de altitud de cada UE, se derivaron tres indicadores complementarios:

- Porcentaje de planicie: Superficie con pendiente menor al 1 %, expresada como porcentaje del total de la UE.
- Planicies en zonas altas: Porcentaje de planicies situadas por encima de la altitud media de la UE.
- Planicies en zonas bajas: Porcentaje de planicies ubicadas por debajo del valor medio de altitud.

Características climáticas

Para cada UE se estimó mediante análisis zonal la disponibilidad hídrica potencial mediante un balance hídrico simple. Se restó la evapotranspiración potencial media anual, reportada por Maderey (1990), del valor de precipitación media anual proporcionado por Fernández-Eguiarte *et al.* (2012).

Textura geológica y permeabilidad

Este componente permitió estimar la capacidad de infiltración del terreno, influenciada tanto por la textura del suelo como por las propiedades del sustrato geológico subyacente.

Permeabilidad del suelo: Se derivó a partir del porcentaje de arena informado en la Carta de Suelos a escala 1:250,000 del INEGI (2014). Se establecieron tres clases texturales: fina (baja permeabilidad, valor 1), media (valor 2) y gruesa (alta permeabilidad, valor 3). El valor modal por UE fue obtenido por análisis zonal.

Permeabilidad del sustrato litológico: Se utilizaron las clasificaciones del Diccionario de Datos Hidrológicos de Aguas Subterráneas (INEGI, 1997), asignando valores adimensionales del 1 (muy baja permeabilidad) al 6 (muy alta), según la litología dominante. Se identificó el valor más representativo en cada UE mediante análisis espacial.

Regionalización hidrológica

Se aplicaron métodos estadísticos en GRASS GIS, mediante los módulos “i.pca” e “i.cluster”. El primero realiza un análisis de componentes principales (Shlens, 2005) y el segundo, una agrupación tipo K-means modificada (Harmon y Shapiro, 1995), asignando las 127 UE a cinco grupos con base en similitudes.

Los valores de los vectores, eigen-valores e importancia se muestran en la matriz de componentes en la **Tabla N.º 4**. Se puede observar que el componente principal 1 (PC1) agrupa las características morfológicas del relieve relacionadas con el porcentaje de planicies (valores de 0.5103 y 0.5108); el componente principal 2 (PC2) agrupa la propiedad de la textura geológica (permeabilidad de la roca y el suelo; valores de 0.7686 y 0.5580 respectivamente); el componente 3 (PC3) agrupa el rasgo morfológico del relieve con los atributos del clima (valores de -0.8046 y -0.3972 respectivamente); el componente 4 (PC4) está dominado principalmente por las condiciones climáticas (valor de 0.7300). Los componentes PC5, PC6 y PC7 arrojan una importancia de por debajo de 4 % por lo cual no fueron considerados en el siguiente paso de agrupamiento.

Tabla N.º 4. Matriz del Análisis de Componentes Principales

Componente	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Eigenvalor	20363.57	3647.72	2435.48	1209.53	885.99	446.62	0.0800
Características climáticas	-0.3391	0.1344	-0.3972	0.7300	-0.4141	0.0699	0.0000
Permeabilidad litológica	0.2930	0.7686	-0.0817	-0.0287	0.1297	0.5469	0.0000
Permeabilidad del Suelo	0.0764	0.5580	-0.0539	-0.0579	-0.0702	-0.8195	0.0000
% de planicie en tierras bajas	0.5103	-0.1679	-0.0754	0.5372	0.5227	-0.1445	0.3508
% de planicie en tierras altas	0.3497	-0.0227	0.3527	-0.0157	-0.6510	0.0508	0.5712
Disección Vertical	-0.3870	0.2043	-0.8046	0.3403	0.2126	0.0079	-0.0009
% de Planicie	0.5108	-0.0970	0.2348	0.2415	-0.2542	-0.0292	-0.7421
Importancia	70.25	12.58	8.4	4.17	3.06	1.5.4	0

Fuente: Elaboración propia en la metodología de Shlens (2005).

Para clasificar las UE en cinco regiones hidrológicas, se aplicó un algoritmo de agrupamiento sobre los cuatro componentes principales, utilizando el módulo “i.cluster” de GRASS GIS, basado en el método de promedios grupales (Harmon y Shapiro, 1995). Se seleccionó un valor de $k = 5$ para equilibrar entre una baja varianza intra-grupo y una adecuada diferenciación hidrológica. A diferencia de estudios en grandes territorios, como el de Wolock, Winter y McMahon (2004) con 20 categorías para EE. UU., la subcuenca analizada presenta menor variabilidad. Así, cinco clases resultan suficientes para reflejar diferencias significativas sin fragmentar en exceso. La elección se realizó de forma heurística, observando la distribución de los parámetros hidrológicos entre las UE.

Resultados

La combinación de las características morfológicas del relieve, textura geológica y clima permitió caracterizar el funcionamiento hidrológico de la subcuenca. Las UE, ahora denominadas Unidades Funcionales de Paisaje Hidrológico (UFPH), fueron agrupadas en cinco Regiones Hidrológicas (RH) con base en su similitud funcional y espacial.

La **Tabla N.^o 5** describe la interpretación de los procesos hidrológicos predominantes en cada RH. La **Tabla N.^o 6** resume sus principales características: superficie, disección vertical, porcentajes de planicies altas y bajas, permeabilidad del suelo y de la roca, y condiciones climáticas.

La RH2 presenta la mayor superficie; en contraste, la RH5 es siete veces menor, pero destaca por contener el mayor porcentaje de planicies (84 %), al ubicarse en la parte baja de la cuenca, cercana al litoral y la desembocadura del río Misantla.

Las UFPH muestran permeabilidad del suelo baja a media (valores 1 y 2), y del sustrato rocoso entre 1 y 4. Esto indica escasa infiltración general, predominando el escurrimiento superficial en RH2, RH3 y RH4, mientras que en RH5 podría darse flujo hacia capas profundas.

Tabla N.^o 5. Procesos hidrológicos que ocurren en cada tipo de región hidrológica en la subcuenca del río Misantla

	Descripción del paisaje hidrológico	Rutas primarias de flujo hidrológico		
		Superficial	Subterráneo somero	Subterráneo profundo
RH1	Llanuras de valles con alta humedad y con permeabilidad media de suelo y sustrato litológico.	ausente	presente	presente
RH2	Montañas con alta humedad y con suelo y sustrato rocoso poco permeables.	presente	ausente	ausente
RH3	Montañas abruptas con humedad alta y con permeabilidad media del suelo y sustrato litológico poco permeable.	ausente	presente	ausente
RH4	Llanuras de valles con humedad media y con suelo y sustrato rocoso poco permeables.	presente	ausente	ausente
RH5	Llanuras con poca humedad, con suelos con permeabilidad media y sustrato litológico permeable.	ausente	presente	ausente

Fuente: Elaboración propia con base en Wolock, Winter y McMahon (2004).

Tabla N.º 6. Valores medios o modales de las características de las unidades de escurrimiento dentro de las regiones hidrológicas de la subcuenca del río Misantla

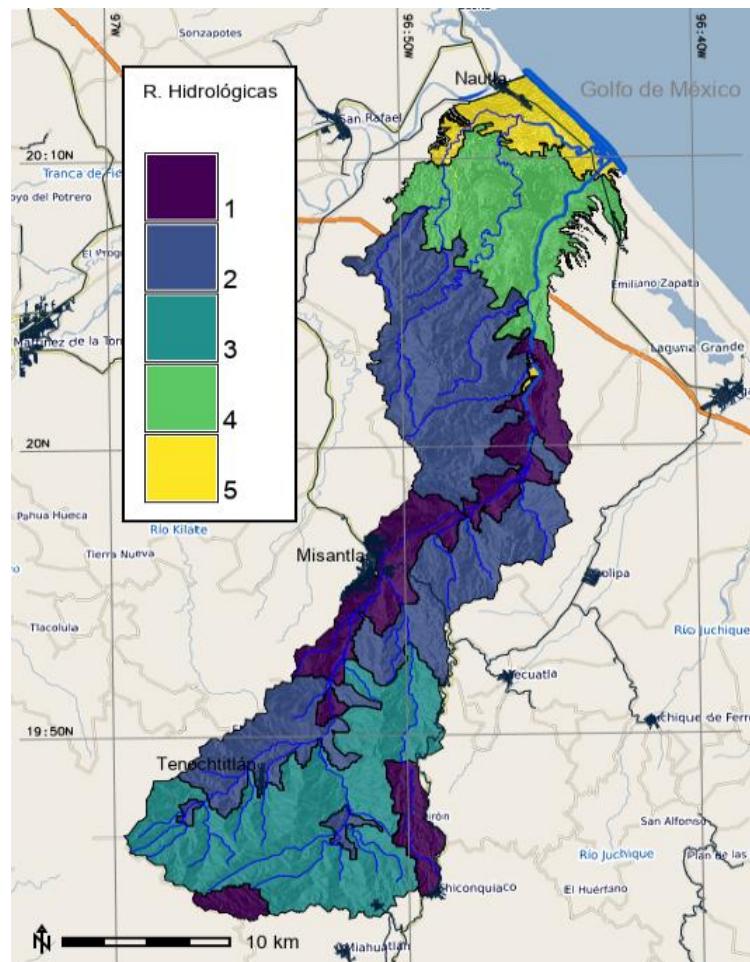
Región Hidrológica (RH)	Superficie Ha	% de superficie	Disección vertical (m)	% de planicies	% de planicies altas	% de planicies bajas	Clase de permeabilidad del Suelo	Clase de permeabilidad de la roca	Características climáticas
1	9346	16	340	23	4	18	2	3	728
2	22367	38	502	9	2	7	1	1	734
3	14734	25	1323	1	1	0	1	1	742
4	8827	15	122	64	31	32	1	2	390
5	3181	6	21	84	50	0	2	4	333

Fuente: Elaboración propia.

Atributos hidrológicos de las regiones hidrológicas de la subcuenca del Río Misantla

A continuación, se describen los atributos hidrológicos de los 5 tipos de regiones hidrológicas de la subcuenca del Río Misantla (v. **Figura N.º 5**).

Figura 5. Regiones hidrológicas en la subcuenca del río Misantha



Fuente: Elaboración propia con base en Wolock, Winter y McMahon (2004).

La RH1 (15.9 % de la subcuenca) corresponde a llanuras de valle con alta humedad y permeabilidad media del suelo y del sustrato. Se ubica en zonas medias y altas de la cuenca, y puede contribuir a la recarga de acuíferos.

La RH2 (38.2 %) es la más extensa. Corresponde a zonas montañosas húmedas con baja permeabilidad en suelo y subsuelo. Actúa como área de captación superficial, sin recarga significativa a acuíferos profundos.

La RH3 (25.2 %) también es montañosa y húmeda, pero con permeabilidad media del suelo y baja del sustrato. Favorece la generación de flujos subsuperficiales someros que afloran como manantiales en zonas bajas, sin contribuir a acuíferos profundos.

La RH4 (15 %) se localiza al norte, en áreas bajas con llanuras suaves, humedad media y baja permeabilidad general. Predominan los escurrimientos superficiales, con poca infiltración y captación intermedia.

Finalmente, la RH5 (5.4 %) se ubica en la desembocadura. Es plana, con baja humedad, permeabilidad media del suelo y alta en el subsuelo, permitiendo infiltración hacia el freático, que interactúa con intrusión marina, lo que limita la disponibilidad de agua dulce (v. Figura N.º 5).

Discusión

Este trabajo representa un primer acercamiento para delimitar Regiones Hidrológicas Funcionales con base en la propuesta de Winter (2001) en la subcuenca del río Misantla. La zonificación obtenida ofrece una interpretación preliminar que requiere validación con datos de campo o teledetección y comparación con otras metodologías similares.

Los resultados revelan que los fenómenos hidrológicos no se distribuyen de forma estrictamente altitudinal. Por ejemplo, aunque la RH3 en la parte alta actúa como zona de captación, no muestra condiciones favorables para la recarga profunda. En contraste, la RH1, ubicada en la parte media y con alta precipitación, presenta condiciones más propicias para la recarga tanto superficial como subterránea.

Metodologías similares basadas en análisis multivariados han sido aplicadas en otras regiones de México (Carlón-Allende *et al.*, 2009; Pineda-Martínez y Carbal, 2017; Pérez-Aguilar *et al.*, 2021). En particular, Pérez-Aguilar *et al.* utilizaron análisis multicriterio ponderado, integrando factores aún no considerados aquí, como la clasificación de zonas áridas del PNUMA, lo que sugiere oportunidades de mejora y adaptación en esta metodología.

Carlón-Allende *et al.* (2009) destacaron la influencia del uso del suelo en la regionalización hidrológica. Aunque no se dispone de datos recientes precisos sobre cambios en el uso del suelo en la cuenca del Misantla, estudios como el

de Rodríguez-Hernández *et al.* (2020) han modelado escenarios hipotéticos. Análisis preliminares de datos del INEGI (2016, 2021) y Hansen *et al.* (2013) muestran recuperación de vegetación secundaria en áreas altas, lo cual podría modificar significativamente los patrones hidrológicos y justificar futuras modelaciones más detalladas.

Es importante señalar que pequeñas áreas en el extremo norte de la subcuenca no fueron clasificadas debido a efectos de borde con el Golfo de México, que generaron valores nulos en las capas ráster de entrada. No obstante, esta omisión no afecta los resultados principales.

Como señalan Wolock, Winter y McMahon (2004), aunque el enfoque estadístico y espacial utilizado aporta objetividad, la intervención experta sigue siendo esencial. La selección de variables, el número de grupos y las decisiones en los procedimientos geomáticos requieren juicio técnico bien fundamentado.

Los productos de esta regionalización pueden contribuir a la planeación territorial y a la gestión integral de recursos hídricos. Por ejemplo, programas de captura de carbono o retención de agua no deberían enfocarse solo en la parte alta de la cuenca, sino también en la media, donde la recarga es más significativa. Igualmente, la zona baja podría desempeñar un papel clave en la recarga de acuíferos costeros y la prevención de intrusión salina, por lo que requiere atención en políticas de manejo hídrico.

En suma, este trabajo ofrece una base para la identificación funcional de regiones hidrológicas, útil tanto para la investigación como para la toma de decisiones orientadas a la sustentabilidad hídrica y territorial en la cuenca del río Misantla y como modelo para posibles replicas en otras latitudes

Conclusiones

La regionalización hidrológica es una herramienta útil para identificar unidades funcionales del territorio que orienten el manejo ambiental y la gestión del agua. Como señalan Wolock, Winter y McMahon (2004), permite delimitar zonas con funciones hidrológicas diferenciadas, esenciales para conservar servicios ecosistémicos clave.

En la subcuenca del río Misantla, se identificó una alta disponibilidad de agua atmosférica (resultado del exceso de precipitación sobre la evapotranspiración) pero con baja o media capacidad de infiltración en la mayoría del territorio. Esta combinación favorece el predominio del escurrimiento superficial, especialmente en zonas montañosas, y limita la recarga de acuíferos profundos.

Dicha condición hidrológica incrementa la susceptibilidad de la cuenca a eventos extremos como inundaciones, al reducir la capacidad natural de amortiguamiento del sistema frente a lluvias intensas. Esta información es clave

para la planificación de medidas de prevención y adaptación ante riesgos hidrometeorológicos.

La regionalización aquí propuesta –la primera de este tipo en Veracruz– genera un mapa base para implementar acciones específicas de conservación, captación o control de agua, contribuyendo a un ordenamiento territorial más eficaz y resiliente en la subcuenca del río Misantla.

Referencias

- Álvarez-Olguín, G., Hotait-Salas, N. y Sustaita-Rivera, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(3), 277-284.
- Bocco, G., Priego, Á. y Cotler, H. (2005). *La geografía física y el ordenamiento ecológico del territorio. Experiencias en México. Gaceta Ecológica*, (76), 23-34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907604>
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., López-Granados, E. M., y Morales-Manilla y L. M. (2009). Hydrogeographical Regionalisation: An Approach for Evaluating the Effects of Land Cover Change in Watersheds. A Case Study in the Cuitzeo Lake Watershed, Central Mexico. *Water Resources Management*, 23(12), 2587-2603. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9398-6>
- Casillas-González, J. A. (2010). Programa Nacional de Microcuenca: Una Estrategia de Desarrollo Integral. SAGARPA y FIRCO. *Reporte Metodológico. Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, México. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/02/juan%20antonio%20casillas.pdf>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (8 de junio de 2017). Declaratoria de emergencia por la presencia de lluvia severa en el municipio de Misantla del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, y por granizada severa en el municipio de Tuxpan de dicha Entidad Federativa, ocurridas los días 23 y 24 de mayo de 2017. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5487318&fecha=19/06/2017
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). Base de datos climatológica nacional: Estaciones climatológicas en Google Earth. Información de Estaciones Climatológicas. Gobierno de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Cotler, H., y Priego, A. (2007). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. En R. M. Del Pont Lalli (Ed.), *El manejo integral de cuencas en México* (pp. 79-89). SEMARNAT.
- Cruz-Cárdenas, G., Silva, J. T., Ochoa-Estrada, S., Estrada-Godoy, F. y Nava-Velázquez, J. (2017). Delineation of Environmental Units by Multivariate Techniques in the Duero River Watershed, Michoacán, Mexico. *Environmental Modeling & Assessment*, 22(3), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9534-2>
- Ehlschlaeger C. (1989). Using the AT Search Algorithm to Develop Hydrologic Models from Digital Elevation Data. En *Proceedings of International Geographic Information Systems (IGIS) Symposium '89* (pp. 275-281). Baltimore, Maryland, Estados Unidos.
- Fernández-Eguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R. y Lobato-Sánchez, R. (2012). *Precipitación media anual 1902-2011*. UNIATMOS, Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM), Gerencia de Meteorología (SMN), CONAGUA. https://uniatmos.atmosfera.unam.mx/atlas/metadatos/kml_metadatos_xml/bio/bio12.htm
- García, E. (2001). *Catálogo de metadatos geográficos*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>

- González, A. (2 de diciembre de 2023). Tala inmoderada devasta la zona de Misantla ante la pasividad de autoridades: Tala inmoderada devasta zonas antaño productoras de café de altura en Misantla. *Imagen Del Golfo*. <https://imagendelgolfo.mx/estado/tala-inmoderada-devasta-zona-de-la-sierra-de-misantla/50314547>
- GRASS Development Team. (2023). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7*. Open Source Geospatial Foundation. <http://grass.osgeo.org>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O. y Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harmon, V. y Shapiro, M. (1995). *GRASS Tutorial: Image Processing*. US Army Construction Engineering Research Laboratory. https://grass.osgeo.org/gdp/imagery/grass4_image_processing.pdf
- Hokanson, K. J., Rostron, B. J., Devito, K. J., Hopkinson, C. y Mendoza, C. A. (2022). Landscape controls of surface-water/groundwater interactions on shallow outwash lakes: how the long-term groundwater signal overrides interannual variability due to evaporative effects. *Hydrogeology Journal*, 30(1), 251-264. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02422-z>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1986). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I. Coatzacoalcos*. Cartas de Hidrología Aguas Subterráneas (Serie I). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Coatzacoalcos, Veracruz de Ignacio de la Llave. <https://en.www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825681432>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1997). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas escala 1:250 000 serie I*. INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Precipitación media anual*. Instituto Nacional de Geografía y Estadística.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Documento Técnico Descriptivo de la Red Hidrográfica Escala 1:50 000 (Edición 2.0)*. Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), resolución de 15 m.* INEGI. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional*. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda250s2gw.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. En *Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-fisiograficos-continuo-nacional-escala-1-1-000-000-serie-i>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I*. Instituto Nacional de Geografía y Estadística. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/conjunto-de-datos-vectoriales-de-la-carta-de-aguas-subterreas-escala-1-250-000-serie-i>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional). Catálogo de metadatos geográficos*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Maderey, L. E. (1990). Evapotranspiración real Escala 14000000. En *Atlas Nacional de México* (Tom. 2). CONABIO, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. . https://geodigital.geografia.unam.mx/atlas_nacional/index.html/#tomoii
- Miller, S. N., Hernández, M., Goodrich, D. C., Miller, W. P., Kepner, W. G. y Semmens, D. J. (2002). *GIS-based Hydrologic Modelling: The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14887831>

- Mitasova, H. (1985). *Cartographic aspects of computer surface modeling*. Slovak Technical University.
- Mortene, M. H. y Machado R. E. (2018). Identificação de paisagens hidrológicas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí [Tesis de Maestría]. Universidade Estadual de Campinas Lameira, Brasil.
<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=481272&tipoMidia=0>
- Ortega-Guerrero, M. A. (2023). *Sistemas gravitacionales de flujo de agua subterránea: un paradigma*. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Gobierno de México.
<https://secihti.mx/sistemas-gravitacionales-de-flujo-de-agua-subterranea-un-paradigma/>
- Paré, L., y Geréz, L. (2012). *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiac*, Veracruz. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN 978-607-7908-89-0.
- Pérez-Aguilar, L. Y., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., Franco-Ochoa, C. y Zambrano-Medina, Y. G. (2021). The Identification and Classification of Arid Zones through Multicriteria Evaluation and Geographic Information Systems – Case Study: Arid Regions of Northwest Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 720-737. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110720>
- Pineda-Martínez, L. F. y Carbajal, N. (2017). Climatic analysis linked to land vegetation cover of Mexico by applying multivariate statistical and clustering analysis. *Atmósfera*, 30(3), 233-242.
<https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.04>
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes 2011* (serie Planeación territorial: Fundamentos y métodos). Instituto Nacional de Ecología
- Rodríguez-Hernández, L. D., Valdés-Rodríguez, O. A., Ellis, E. A. y Armenta-Montero, S. (2020). Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Misantla ante fenómenos hidrometeorológicos extremos. *Revista Bio Ciencias*, 7, 1-14. <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e900>
- Servicio Geológico Mexicano. (2005). *Continuo Nacional de Geología de la República Mexicana escala 1:250,000*. INEGI-SGM.
- Sharpe, D. R. (2022). Seven hydrogeological terrains characteristic of southern Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 59(12), 1006-1030. <https://doi.org/10.1139/cjes-2022-0035>
- Shlens, J. (2005). Tutorial on Principal Component Analysis. GrassWiki.
https://grasswiki.osgeo.org/wiki/Principal_Components_Analysis
- Tóth, J. (1970). A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, 10(2), 164-176. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90186-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90186-1)
- Tóth, J. (2016). The evolutionary concepts and practical utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow. *International Journal of Earth Environmental Science*, 1, 1-11.
<https://doi.org/10.15344/2456-351X/2016/111>
- Winter, T. C. (2001). The Concept of Hydrologic Landscapes. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(2), 335-349. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x>
- Wolock, D. M., Winter, T. C. y McMahon, G. (2004). Delineation and evaluation of hydrologic-landscape regions in the United States using geographic information system tools and multivariate statistical analyses. *Environmental Management*, 34, 71-88. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-5077-9>
- Zamora-Castro, S. A., Nani-González, G. E., Sangabriel-Lomelí, J., Sandoval-Herazo, M., Rivera, S. y Sandoval-Herazo, L. C. (2022). Digital methodology to detect vulnerable areas to flooding in urban zones located in the mountains. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability*, 4(2), 10-23.
<https://doi.org/10.56845/rebs.v4i2.73>