

Licencia Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Artículos Científicos

DOI: <https://doi.org/10.25009/uvs.vi17.2955>

Caracterización geomorfométrica de la cuenca Grijalva-Usumacinta en el sureste de México: Una clasificación automatizada del relieve

Geomorphometric characterization of the Grijalva and Usumacinta basins: An automated classification of the relief

Pablo Velázquez-Sánchez ^a | Ojilve Ramón Medrano-Pérez ^b
Alejandro Alcudia-Aguilar ^c

Recibido: 4 de julio de 2023.

Aceptado: 24 de noviembre de 2023.

^a División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Cunduacán, México. Contacto: pablovelsan04@gmail.com *Autor para correspondencia.

^b CONAHCYT–Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS). Villahermosa, México. Contacto: ojilve.medrano@hotmail.com | ORCID: [0000-0002-5445-1136](https://orcid.org/0000-0002-5445-1136)

^c Cultivo Land PBC. Pleasanton, EE.UU. Contacto: aalcudia.aguilar85@gmail.com | ORCID: [0000-0002-5445-1136](https://orcid.org/0000-0002-5445-1136)

Cómo citar:

Velázquez-Sánchez, P., Medrano-Pérez, O. R., Alcudia-Aguilar, A. (2024). Caracterización geomorfométrica de la cuenca Grijalva-Usumacinta en el sureste de México: Una clasificación automatizada del relieve, *UVserva*, (17), 94-120. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi17.2955>

Resumen: La geomorfometría desempeña un papel fundamental en el estudio y análisis de la superficie terrestre, proporcionando una base conceptual y metodológica para comprender las características del medio físico. En este contexto, las cuencas del río Grijalva y Usumacinta (CGyU), compartidas por México, Guatemala y Belice, destacan por su abundancia hídrica, riqueza natural y alta vulnerabilidad a los eventos hidrometeorológicos extremos. El objetivo principal de esta investigación es la caracterización geomorfométrica de las CGyU. Para ello, se desarrolló la clasificación jerárquica mediante el método de Hammond y se automatizó el proceso utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) adaptada por Dikau. Los resultados revelaron la existencia de cinco clases principales y dieciocho subclases de formas del terreno en ambas cuencas. Con base en estos hallazgos, podemos concluir que la metodología empleada demostró ser confiable para describir las formas del terreno en estas cuencas. Por tanto, este estudio contribuye al desarrollo de nuevas investigaciones y a la implementación de políticas públicas relacionadas al ordenamiento territorial, la protección civil, la biodiversidad, entre otros.

Palabras clave: Clasificación jerárquica de Hammond; geoforma; clasificación automatizada de Dikau; variables morfométricas; cuencas Grijalva y Usumacinta.

Abstract: *Geomorphometry plays a fundamental role in the study and analysis of the earth's surface, providing a conceptual and methodological basis for understanding the characteristics of the physical environment. In this context, the Grijalva and Usumacinta River basins (CGyU), shared by Mexico, Guatemala, and Belize, stand out for their water abundance, natural richness, and high vulnerability to extreme hydrometeorological events. The main objective of this research is the geomorphometric characterization of the CGyU. For this purpose, hierarchical classification was developed using Hammond's method and the process was automated using Geographic Information Systems (GIS) adapted by Dikau. The results revealed the existence of five main classes and eighteen subclasses of landforms in both watersheds. Based on these findings, we can conclude that the methodology employed proved to be reliable for describing landforms in these watersheds. Therefore, this study contributes to new research and the implementation of public policies related to land use planning, civil protection, and biodiversity, among others.*

Keywords: *Hammond Hierarchical Classification; Geoform; Dikau Automated Classification; Morphometric Variables; Grijalva and Usumacinta Watersheds.*

Introducción

La geomorfometría ha experimentado en los últimos años un notable aumento en su aplicación, lo que se atribuye a múltiples factores que subrayan su relevancia en la investigación geocientífica (Xiong *et al.*, 2022). Este campo se dedica a la descripción y cuantificación de las formas del terreno (Dehn *et al.*, 2001), las cuales son el producto de complejas interacciones entre procesos endógenos (la tectónica de

placas, actividad volcánica, etc.) y exógenos (el clima, la erosión, sedimentación, entre otros.) que han moldeado la superficie terrestre a lo largo del tiempo, dando lugar al paisaje actual (MacMillan y Shary, 2009; Minár *et al.*, 2016; Viers, 1973). Los estudios geomorfométricos han experimentado un aumento en popularidad debido a la disponibilidad de tecnologías avanzadas, como Sistemas de Información Geográfica (SIG), los datos y algoritmos de teledetección, que han facilitado la adquisición de datos topográficos detallados, lo que a su vez ha permitido un análisis más preciso de la geomorfología. En general, estos aspectos han llevado a una mayor precisión y resolución en los estudios geomorfológicos.

En el ámbito internacional, varios estudios han contribuido significativamente al desarrollo y aplicación de metodologías para la clasificación de las formas del terreno. Un hito fundamental en este campo fue el trabajo pionero de Hammond (1964), quien desempeñó un papel crucial al concebir una metodología exhaustiva que permitió la clasificación de las formas del terreno en todo el territorio de los Estados Unidos de América. Su enfoque riguroso agrupó las distintas configuraciones topográficas en cinco categorías principales que abarcan llanuras, mesetas, llanuras con colinas o montañas, colinas/montañas abiertas, y colinas y montañas.

Este enfoque de Hammond sirvió como punto de partida para investigaciones posteriores a nivel internacional. Un ejemplo destacado de adaptación y aplicación regional se encuentra en el trabajo de Dikau *et al.*, (1991), quienes realizaron ajustes específicos para la clasificación de las formas del terreno del estado de Nuevo México, Estados Unidos. Su estudio contribuyó a establecer una base sólida para la posterior aplicación de la metodología en la región.

Además, Gallant *et al.* (2005) llevaron a cabo un avance significativo al automatizar la metodología de Hammond utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este enfoque permitió una clasificación eficiente de las formas del terreno y, lo que es más importante, facilitó la comparación de los resultados con las formas del terreno de Alaska, validando así la aplicación de la metodología en diferentes contextos geográficos. A nivel internacional, otros estudios también han optado y adaptado esta metodología, como el de Irigaray *et al.* (1997) que llevó a cabo un análisis cuantitativo del medio físico en Córdoba, España, utilizando un SIG. Además, Martins *et al.*, (2016) exploran las macro-formas de relieve en la cuenca del Río Formosa, Portugal, siguiendo las directrices de Hammond.

Más allá de la clasificación del terreno, es notable cómo las formas de este se han consolidado como descriptores esenciales del relieve. Estos descriptores han tenido aplicaciones diversas, desde el cartografiado de vegetación, tal como lo demuestran Kirkby (1995) y Baartman *et al.* (2018), hasta la comprensión del comportamiento de incendios, como lo detallan Takaoka y Sasa (1996). Otros usos incluyen el cartografiado de suelo, la ecología del paisaje, los deslizamientos de laderas, la erosividad y la distribución potencial de especies forestales en áreas protegidas. Por otro lado, en México, los esfuerzos de investigación también han sido notables. Martínez-Zavala *et al.* (2005) emprendieron la tarea de clasificar las geoformas en la cuenca río Tepelcatepec, adoptando un método jerárquico de clasificación basado en Dikau *et al.* (1991). En una línea similar, Mora *et al.* (2016) se propusieron delimitar las principales unidades

geomorfológicas en la cuenca del Río Grande de Comitán, tomando como base la metodología de Hammond.

Si bien la metodología de Hammond (1964) ha sido ampliamente reconocida, no es la única opción para clasificar y analizar las formas del terreno. Drăguț y Braschke (2006) emplearon funciones de pertenencia para procesar la altitud relativa y el gradiente de pendiente a partir de un modelo digital del terreno. Por su parte, Iwahashi y Pike (2007) establecieron una secuencia programada cuyas variantes fueron mapas de partición doble del gradiente de pendiente, la textura de la superficie y la convexidad local y sus promedios como umbral de división. Adicionalmente, emergen otros enfoques como los “geomorfones” para la clasificación de formas de terreno basados en el patrón binario local y el principio de línea de visión (Jasiewicz y Stepinski, 2013; Libohova *et al.*, 2016; Stepinski y Jasiewicz, 2011). Tal como sugieren Mora *et al.* (2016), los métodos de clasificación del terreno son aquellos que facilitan un análisis sistemático del terreno representando cada componente de manera individual. En estos, el objetivo principal al analizar las geoformas es la clasificación objetiva de cada unidad de territorio (Moreno-Brotóns *et al.*, 2010). Es más, la metodología Hammond no solo clasifica, sino que jerarquiza las formas del terreno (micro, macro y mega formas), lo que permite incluir fases, elementos y paisajes y, por ende, ofrece múltiples aplicaciones. Como concluyen Mora *et al.* (2016), la clasificación espacial es considerada una herramienta eficaz para el estudio de las formas del terreno basándose en tamaño, orden y complejidad geométrica.

Las cuencas Grijalva y Usumacinta (CGyU) destacan como una de las regiones con mayor biodiversidad, riqueza hídrica y cultural del territorio mexicano (García-García y Kauffer, 2011; Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez, 2020). Esta riqueza, al ser un recurso natural, potencia significativamente su capacidad para fomentar el desarrollo sustentable (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2014). No obstante, esta área se caracteriza por una alta exposición y vulnerabilidad a fenómenos hidrometeorológicos extremos, tales como inundaciones y sequías (Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez, 2021; 2020; Valdés-Manzanilla, 2016; BID, 2014; García-García y Kauffer, 2011).

Es relevante mencionar que en las CGyU también se han reportado deslizamientos de laderas, vinculados tanto a causas naturales como antrópicas (Hinojosa-Corona *et al.*, 2011). Numerosos estudios han reportado perturbaciones ambientales en las (CGyU) (Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; De la Rosa-Velázquez *et al.*, 2017; Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra [GIMBOT], 2014). Estos impactos han derivado en transformaciones significativas en los cauces que caracterizan las CGyU (Muñoz-Salinas *et al.*, 2023; De la Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019; Herrera-Silveira *et al.*, 2019).

A pesar de las limitaciones de los datos climáticos disponibles para las CGyU han surgido investigaciones centradas en el análisis morfométrico en regiones específicas como las subcuencas Grijalva y Usumacinta (Castillo-Cruz y Medrano-Pérez, 2023), la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (Medrano-Pérez *et al.*, 2022), la subcuenca del río Mezcalapa (Álvarez-Soberano y Medrano-Pérez, 2020), y en la cuenca del río Huehuetán en Chiapas (López-Pérez *et al.*, 2015). Estas investigaciones buscan entender el comportamiento hidrológico a través de parámetros morfométricos. En este contexto, aunque existen estudios de clasificación geomorfométrica del relieve

mexicano (Hernández-Santana *et al.*, 2017), se identifica una laguna en el análisis geomorfológico específico y detallado para las cuencas Grijalva y Usumacinta (CGyU), al no disponerse de un estudio que describa cuantitativa y cualitativa las formas del terreno en las CGyU.

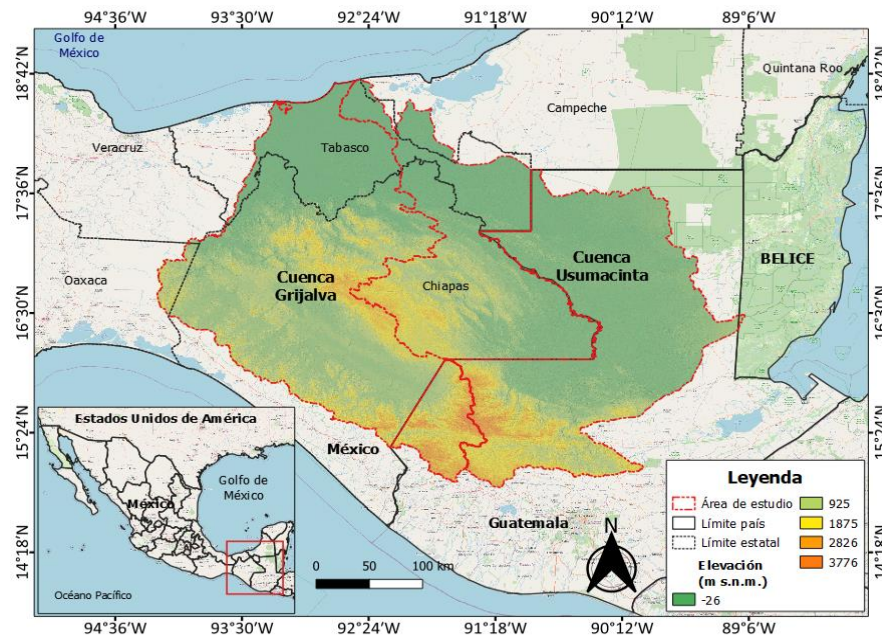
Ante esta carencia, se plantea un análisis geomorfológico de las CGyU, basándose en la metodología desarrollada por Hammond (1964) y la adaptación en SIG propuesta por Dikau *et al.* (1991). El propósito de este análisis es contribuir a una comprensión más profunda de la extensión y características físicas de los ambientes en estas cuencas transfronterizas. Se espera que esta investigación sienta las bases para futuros estudios y ayude a guiar acciones de gestión territorial, lo que permitirá un entendimiento más detallado sobre las características geomorfológicas y su interacción con los procesos hidrológicos en las CGyU.

1. Métodos

1.1. Área de estudio

Las CGyU, consideradas como unidad natural, constituyen un territorio hídrico compartido entre México, Guatemala y Belice, que abarca una extensión total de 82,434 km². Estas cuencas, dada su relevancia, extensión y desarrollo hidrológico concentra una parte significativa del capital natural de Mesoamérica (Andrade-Velázquez y Medrano-Pérez, 2020).

Figura 1a
Área de estudio



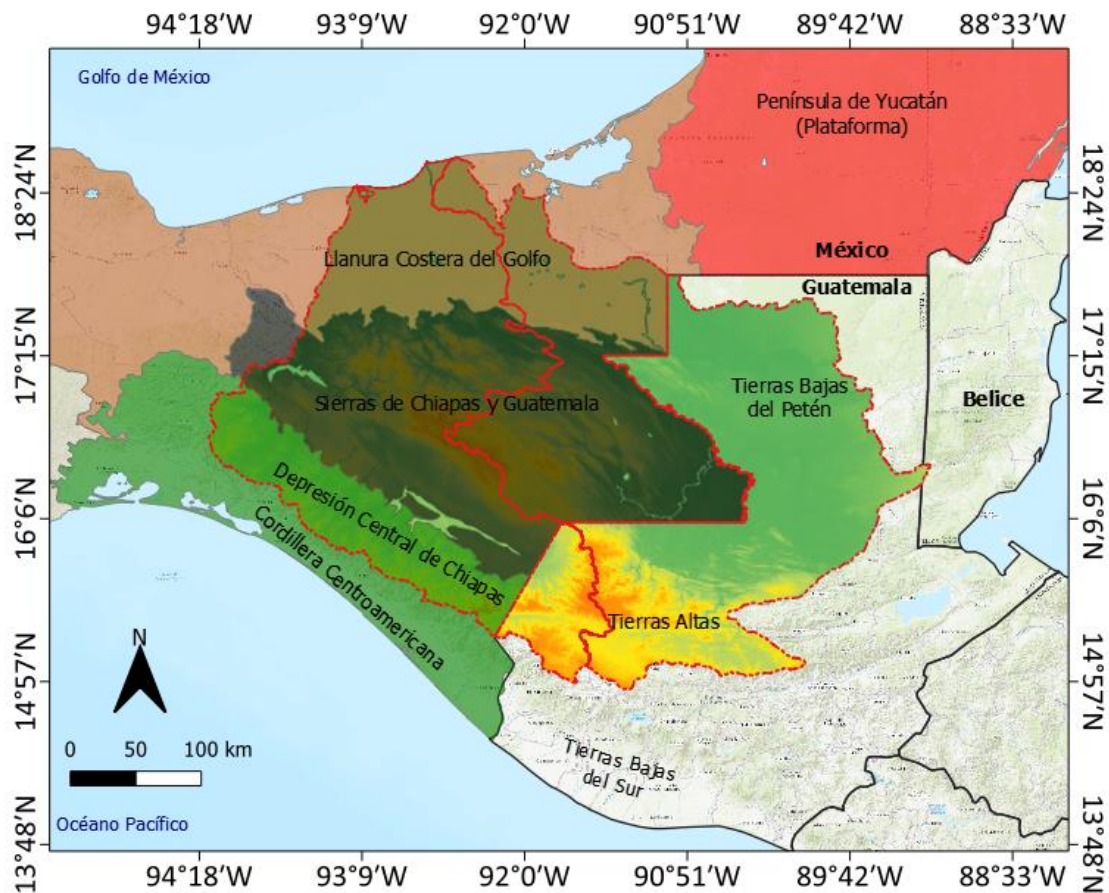
Fuente: Elaboración propia en QGIS Desktop 3.2.1 (QGIS Development Team, 2019) basada en datos espaciales de INEGI (2022), Organismo de Cuenca Frontera Sur, García-García y Kauffer-Michel (2011), y NASA *et al.*, 2009).

A partir de la propuesta de delimitación reportada en García-García y Kauffer-Michel (2011), las cuencas CGyU ocupan el 44 %, 4,2 % y 0.07 % del territorio de Guatemala, México y Belice, respectivamente (**Figura 1a**). La cuenca del río Grijalva comprende un total de 57,634 km², de los cuales el 90.5 % en el territorio mexicano y el 9.5% en Guatemala. En cuanto a la cuenca del Usumacinta, esta abarca 72,154 km², distribuyéndose el 42 % en México, el 58 % en Guatemala y en menor proporción en Belice con 16 km².

Debido a sus características de clima, ecosistemas, geología y geformas diversos, las cuencas albergan una alta biodiversidad (CONAGUA, 2014). La región cuenta con áreas protegidas como las Reservas de la Biosfera Pantanos de Centla, Lacan-tun, Montes Azules, el Triunfo, la Reserva de la Biosfera Maya, entre otras.

Figura 1b

Unidades del relieve



Nota. Los colores mostrados en territorio mexicano corresponden a la fisiografía de México disponible en INEGI; sin embargo, no se pudo obtener la misma información digital para Guatemala, y se optó por colocar etiquetas en toda el área, obviando colocar la leyenda para evitar detalle incompleto.

Fuente. Elaboración propia en QGIS Desktop 3.2.1 (QGIS Development Team, 2019) con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022; México) y la Municipalidad de Guatemala (<https://mapadeguatemala.org/relieve>).

Estas cuencas son la fuente de ríos caudalosos, incluidos el Usumacinta que ostenta caudal más alto de toda Mesoamérica, estimado en 1,700 m³/s (March-Mifsut y Castro,

2010). Aportando entre el 30 % y 40 % de la escorrentía superficial de México (García-García y Kauffer-Michel, 2011; March-Mifsut y Castro, 2010) y alberga actividades productivas variadas. En particular, la cuenca Grijalva retienen más del 40 % del agua total en México en su sistema de presas y produce más del 40 % de la energía hidroeléctrica nacional (BID, 2014), Mientras que la cuenca Usumacinta alberga la hidroeléctrica de mayor capacidad de Guatemala en el río Chixoy (CEPAL *et al.*, 2018).

El Grijalva se extiende desde la Llanura Costera del Golfo hasta la Sierra de Cuchumatanes en Guatemala, atravesando principalmente la Sierra Norte de Chiapas, la Depresión Central y la Sierra Madre de Chiapas (Hinojosa-Corona *et al.*, 2011; Rubio y Triana, 2006). Por otro lado, el Usumacinta recorre la Llanura Costera del Golfo, Sierra de Lacandón, Sierra Cuchumatanes y, en menor medida, la Plataforma de Yucatán.

La **Figura 1b** destaca las unidades del relieve en ambas cuencas. Estas áreas con características geomorfológicas prominentes y precipitaciones que algunas zonas superan los 5,000 mm anuales alimentan un sistema fluvial complejo que desemboca en las planicies y el Golfo de México. Los ríos de este sistema, caudalosos y con cauces meándricos, poseen una gran cantidad de transporte (CONAGUA, 2012). En cuanto al clima, la región es predominantemente cálida y húmeda (CONAGUA, 2014).

1. 2. Clasificación de formas de terreno

La metodología propuesta por Dikau *et al.*, (1991) fue implementada en un SIG (ArcGIS 10.5; ESRI, 2019). Esta implementación se basó en un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de *National Aeronautics and Space Administration Land Processes Distributed Active Archive Center* (NASA LP DAAC) con una resolución espacial de 30 m x 30 m (NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems y U.S./Japan ASTER Science Team, 2009). Un DEM es una representación digital bidimensional de la elevación de la superficie del terreno cuyos valores están georreferenciados. Un DEM puede describirse matemáticamente como una función de dos variables $z = z(x, y)$ donde x y y representan las coordenadas de un punto y z es la elevación asociada a dicho punto (Martínez-Zavala *et al.*, 2005). Para optimizar la clasificación de la superficie que depende de la escala de la cuenca, se modificó la resolución del DEM a 90 m.

Posteriormente, el DEM fue procesado para generar mapas de *pendiente suave local*, *relieve local* y *tipo de perfil*. Para este propósito, se utilizó una ventana móvil 5 km x 5 km la cual abarca 55 x 55 puntos de elevación. Es importante mencionar que una ventana móvil es un arreglo cuadrangular de celdas extraídas de un ráster. A este conjunto se le aplica una operación basada en valores contenidos, asigna el resultado a la celda central del arreglo.

1. 2. 1. Pendiente Suave Local

A partir del DEM se realizó el mapa de pendiente utilizando un operador propio del SIG con una ventana móvil de 3 x 3 por defecto.

Los nueve valores de cada ventana fueron utilizados para calcular la pendiente y éste fue asignado al centro de la ventana. El porcentaje de pendiente se calcula como se describe en la Ecuación 1:

$$m(\%) = 100 \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

, donde $\frac{\partial z}{\partial x}$ y $\frac{\partial z}{\partial y}$ son la tasa de cambio en la dirección x y y , respectivamente.

Este mapa se clasificó como pendientes suaves a porcentajes menores a 8 % y pendientes abruptas a pendientes con valores mayores a 8 % (Dikau *et al.*, 1991). Posteriormente, se calculó la densidad de pendientes suave dentro de la ventana móvil y el mapa resultante se reclasificó dentro de las cuatro categorías de Hammond mostradas en la **Tabla 1** para obtener el mapa de pendiente local suave.

Tabla 1

Clasificación para la pendiente suave local (<8 %)

A	Mayor de 80 % de pendiente suave local
B	50 % – 80 % de pendiente suave local
C	20 % – 50 % de pendiente suave local
D	Menor de 20 % de pendiente suave local

Fuente: Hammond (1964)

1.2.2. *Relieve local*

En la clasificación del relieve local se utilizó la ventana móvil para calcular la diferencia entre la máxima y mínima altura en los 55 x 55 valores de altura dentro de ella. El resultado se clasificó dentro de las seis categorías de relieve local de Hammond mostrado en la **Tabla 2** para obtener el mapa de relieve local. Este mapa muestra los cambios de altura que existen dentro de la ventana.

Tabla 2

Relieve local

1	0 m – 30 m
2	30 m – 91 m
3	91 m – 152 m
4	152 m – 305 m
5	305 m – 914 m
6	Mayor a 914 m

Fuente: Hammond (1964)

1.2.3. *Tipo de perfil*

En la clasificación del tipo de perfil, primero se requirió encontrar el valor z_m que se define como en la Ecuación 2:

$$z_m = \frac{1}{2}(z_{max} - z_{min}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde z_{max} y z_{min} son la elevación máxima y mínima dentro de la ventana móvil, respectivamente. El valor z_m se comparó con el valor de elevación situado en el centro de la ventana móvil z_c para clasificarlos en zonas altas o zonas bajas. Las zonas altas están definidas como áreas donde la máxima elevación menos la elevación en el centro de la ventana es menor que la mitad del relieve local, es decir, $z_{max} - z_c < z_m$, mientras que, las zonas altas son áreas donde $z_{max} - z_c > z_m$. Después, con el mapa de pendientes suaves y abruptas, se calculó el porcentaje de pendientes suaves que había en la ventana móvil. El mapa de zonas altas y bajas y el mapa de porcentaje de pendientes suaves se realizaron la clasificación de tipo de perfil. Cabe señalar que, a diferencia de Dikau *et al.* (1991), se introdujeron dos nuevas categorías que representan porcentajes menores de 50 %, tanto en zonas bajas como altas, con el fin de evitar crear un mapa de tipo de perfil con pixeles sin datos (**Tabla 3**). Esto se debe al alto porcentaje de pendientes mayores a 8 % que existe dentro de cada ventana móvil.

Tabla 3
Tipo de perfil

a	Mayor de 75 % de pendiente suave en zonas bajas
b	50 % - 75 % de pendiente suave en zonas bajas
c	0 % - 50 % de pendiente suave en zonas bajas
d	0 % - 50 % de pendiente suave en zonas altas
e	50 % - 75 % de pendiente suave en zonas altas
f	Mayor de 75 % de pendiente suave en zonas altas

Fuente. Adaptado a partir de Dikau *et al.* (1991).

Finalmente, los mapas fueron superpuestos para crear el mapa de formas de terreno y cada combinación se clasificó de acuerdo con las subclases presentadas por Dikau *et al.* (1991) a partir de las establecidas por Hammond (1964) (Ver **Tabla 4**). El mapa resultante fue filtrado para suavizar cada una de las categorías y evitar que las clasificaciones con menor área puedan enmascarar a las principales formaciones en relación con la escala del mapa.

Tabla 4
Clasificación de las formas de terreno

Clases de forma de terreno	Subclases de forma de terreno	Código
Planicies	Planicies llanas o ligeramente llanas	A1a, A1b, A1c, A1d, A1e, A1f
	Planicies regulares con escaso relieve local	A2a, A2b, A2c, A2d, A2e, A2f
	Planicies irregulares con poco relieve	B1a, B1b, B1c, B1d, B1e, B1f
	Planicies irregulares con relieve moderado	B2a, B2b, B2c, B2d, B2e, B2f
Mesetas	Mesetas con relieve moderado	A3d, A3e, A3f, B3d, B3e, B3f
	Mesetas con considerable relieve	A4d, A4e, A4f, B4d, B4e, B4f
	Mesetas con alto relieve	A5d, A5e, A5f, B5d, B5e, B5f
	Mesetas con muy alto relieve	A6d, A6e, A6f, B6d, B6e, B6f
	Planicies con colinas	A3a, A3b, A3c, B3a, B3b, B3c
	Planicies con colinas altas	A4a, A4b, A4c, B4a, B4b, B4c
	Planicies con montañas	A5a, A5b, A5c, B5a, B5b, B5c

Planicies con colinas o montañas	Planicies con montañas altas	A6a, A6b, A6c, B6a, B6b, B6c
Colinas/montañas abiertas	Colinas abiertas muy bajas	C1a, C1b, C1c, C1d, C1e, C1f
	Colinas abiertas bajas	C2a, C2b, C2c, C2d, C2e, C2f
	Colinas abiertas moderadas	C3a, C3b, C3c, C3d, C3e, C3f
	Colinas abiertas altas	C4a, C4b, C4c, C4d, C4e, C4f
	Montañas abiertas bajas	C5a, C5b, C5c, C5d, C5e, C5f
	Montañas abiertas altas	C6a, C6b, C6c, C6d, C6e, C6f
Colinas y montañas	Colinas muy bajas	D1a, D1b, D1c, D1d, D1e, D1f
	Colinas bajas	D2a, D2b, D2c, D2d, D2e, D2f
	Colinas moderadas	D3a, D3b, D3c, D3d, D3e, D3f
	Colinas altas	D4a, D4b, D4c, D4d, D4e, D4f
	Montañas bajas	D5a, D5b, D5c, D5d, D5e, D5f
	Montañas altas	D6a, D6b, D6c, D6d, D6e, D6f

Fuente: Adaptada a partir de Dikau *et al.* (1991).

2. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos y el análisis de los datos han permitido distinguir diferentes tipos geomórficos que recogen la variabilidad del área de estudio como son: planicies, mesetas, montañas, colinas, etc.

Se obtuvieron una colección de mapas de:

- (i) pendiente suave local,
- (ii) relieve local,
- (iii) tipo de perfil,
- (iv) cinco clases principales (Planicies, Mesetas, Planicies con Colinas o Montañas, Colinas/Montañas Abiertas, y Colinas y Montañas); y,
- (v) subclases (Planicies llanas o poco llanas, Planicies regulares con escaso relieve local, Planicies irregulares con relieve moderado, Mesetas con relieve moderado, Mesetas con considerable relieve, Mesetas con alto relieve, Planicies con colinas, Planicies con colinas altas, Planicies con montañas bajas, Planicies con montañas altas, Colinas abiertas bajas, Colinas abiertas moderadas, Colinas abiertas altas, Montañas abiertas bajas, Montañas abiertas altas, Colinas altas, Montañas bajas, Montañas altas) de formas de terreno. La parte norte de las cuencas se clasificó como Planicie a la Llanura Costera del Golfo Sur y a una pequeña porción de la Plataforma de Yucatán en su parte sur. Además, se puede observar la transición que existe entre las llanuras y montañas que se encuentran en el norte y parte central de las cuencas. Las distintas sierras y cadenas montañosas que se encuentran dentro de la cuenca fueron clasificadas como Montañas y Colinas. Asimismo, la Depresión Central de Chiapas fue clasificada principalmente por Mesetas y Planicies con colinas o montañas.

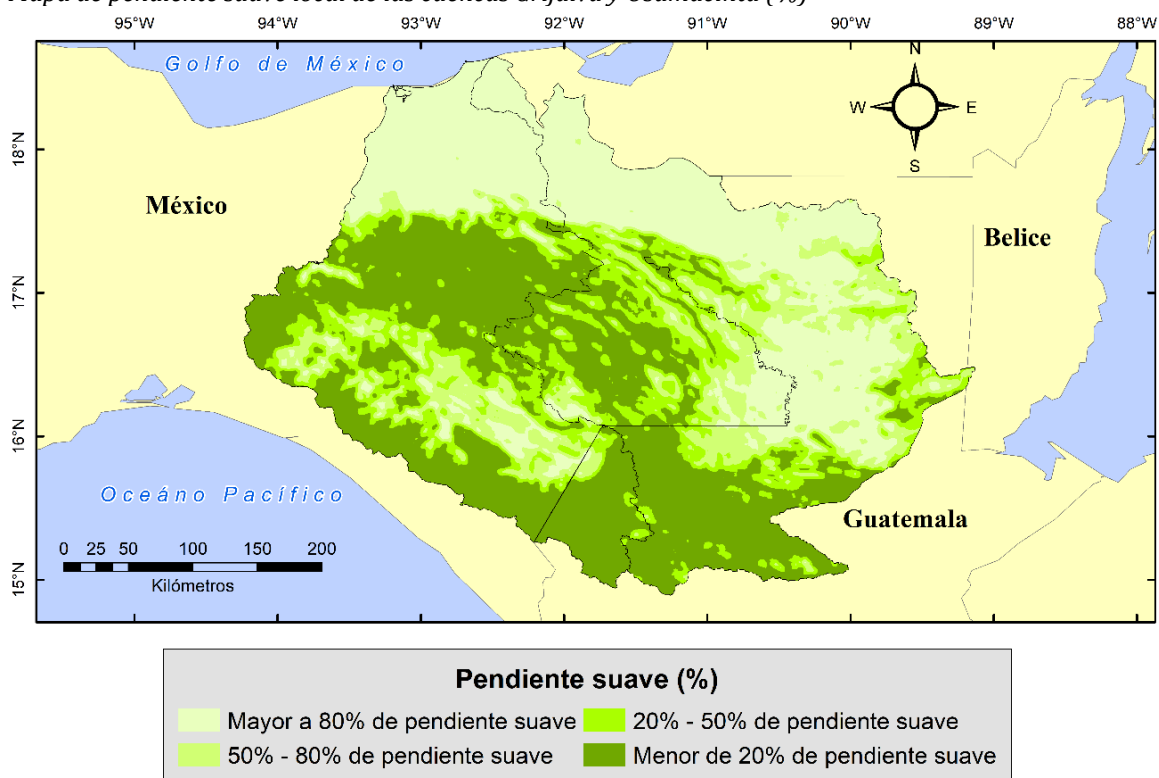
2.1. Pendiente suave local

El mapa de la **Figura 2**, muestra que la mayor concentración de *pendiente suave local* se encuentra en la Llanura Costera del Golfo, Depresión Central de Chiapas y parte de la Plataforma de Yucatán. De acuerdo con la **Tabla 5** la mayor superficie se encuentra compuesta por una baja densidad de pendiente suave en la cuenca Grijalva debido a su relieve con montañas, mientras que en la cuenca Usumacinta se compone principalmente de áreas con una alta densidad de pendiente suave. La cuenca Grijalva en territorio mexicano está ocupada con *porcentajes de pendientes suaves* de 0 a 20 % y 80 a 100 % en su mayoría, mientras que, en Guatemala el porcentaje de pendiente suave menores a 20 ocupa poco más del 85 % de la cuenca. En la cuenca Usumacinta predominan las pendientes suaves mayores de 80 % en ambos países, es decir, que gran parte del área total de la cuenca se encuentra dentro de esta categoría.

En general, la mayoría de la superficie de las cuencas la ocupan áreas con pendientes no suaves (pendiente suave local menor a 20 %), esto es debido a las cadenas montañosas que atraviesan las cuencas como los Altos de Chiapas y la Sierra Madre de Chiapas principalmente.

Figura 2

Mapa de pendiente suave local de las cuencas Grijalva y Usumacinta (%)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Pendiente suave local por cuenca-país y total por cuenca (% , km²)

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Pendiente suave local (%)	Porcentaje general (%)						Total
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
Mayor a 80	25.36	0.69	23.03	38.30	35.54	36.70	30.63
50 – 80	13.96	4.99	13.11	12.82	19.35	16.61	15.06
20 – 50	16.63	8.22	15.83	22.67	14.50	17.92	16.99
Menor a 20	44.05	86.10	48.03	26.21	30.61	28.77	37.32

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Pendiente suave local (%)	Áreas (km ²)						Total
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
Mayor a 80	13,235.64	37.84	13,273.48	11,587.04	14,891.59	26,478.62	39,752.10
50 – 80	7,282.95	271.78	7,554.73	3,878.94	8,108.01	11,986.95	19,541.68
20 – 50	8,675.97	448.30	9,124.27	6,856.90	6,074.85	12,931.75	22,056.02
Menor a 20	22,987.30	4,693.22	27,680.52	7,928.90	12,827.88	20,756.77	48,437.29

Fuente: Elaboración propia.

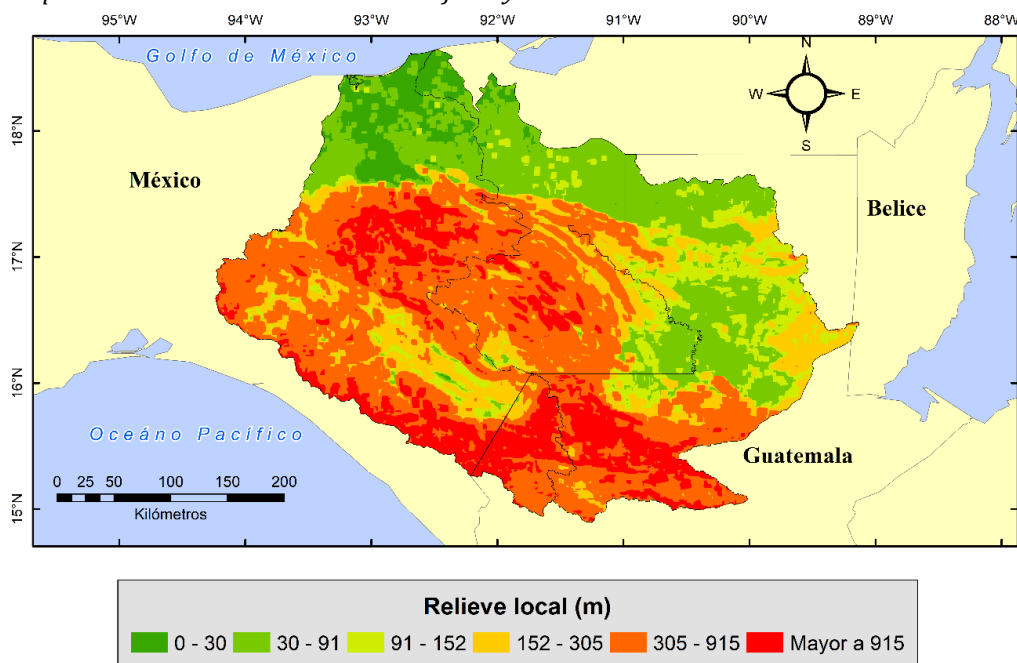
2.2. Relieve local

En el mapa de *relieve local* (**Figura 3**) se puede observar que las mayores áreas están ocupadas por relieves locales de entre 305 m y 915 m (36.7 %), y menores a 305 m (49.1 %) dentro del área total de ambas cuencas. A su vez, la clasificación de relieve local mayor a 915 m ocupa un menor porcentaje del área con 14.2 % (~18.45 mil km²).

Los *relieves locales* altos se concentran en las cadenas montañosas que componen las cuencas y las bajas en la planicie y plataforma. La zona de transición que ocurre en los límites de los estados de Tabasco y Chiapas (**Figura 1**), y el límite fronterizo de México y Guatemala se observa un gran contraste de relieve local. Esta transición también se observa en la Depresión Central de Chiapas.

La superficie de las cuencas que se encuentran dentro del territorio mexicano tiene principalmente relieves locales que superan los 915 m, mientras que en territorio guatemalteco tiene una distribución equitativa de relieves menores y mayores a este valor (**Figura 3** y **Tabla 6**).

Figura 3
 Mapa de relieve local de las cuencas Grijalva y Usumacinta



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
 Relieve local por cuenca-país y total por cuenca

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Relieve local (m)	Áreas (km ²)						Total
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
	4,748.41	0.00	4,748.41	1,324.61	2.44	1,327.05	6,075.46
30 - 91	6,457.28	9.26	6,466.54	9,275.63	11,896.99	21,172.62	27,639.16
91 - 152	1,930.87	11.82	1,942.69	2,212.52	7,910.30	10,122.83	12,065.51
152 - 305	6,889.45	305.97	7,195.43	3,654.97	7,142.70	10,797.67	17,993.09
305 - 915	23,202.88	2,305.18	25,508.06	12,262.20	9,796.49	22,058.69	47,566.74
Mayor a 915	8,953.22	2,819.12	11,772.35	1,521.73	5,153.79	6,675.51	18,447.86

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Tipo de perfil

El mapa de *tipo de perfil* (Figura 4) muestra principalmente la relación que existe entre el valor de altura del centro de la ventana móvil y la altura media dentro de la misma. Esta clasificación es jerárquica teniendo en cuenta, en primer lugar, la altura y, en segundo lugar, la pendiente suave.

En cuanto a las características por territorio, tanto en México como en Guatemala para ambas cuencas, la distribución del tipo de perfil no presenta diferencias notables. La diferencia más notable se encuentra entre la Planicie del Golfo de México de ambas cuencas y el resto del territorio compartido (Figura 4 y Tabla 7).

De acuerdo con la **Tabla 7**, donde se observa la proporción de la distribución relativa de cada tipo de perfil en términos de porcentaje y área (km²), se destaca como perfil dominante que la categoría “75-100 zonas bajas” posee la mayor proporción en la Cuenca Grijalva con un 59.69 %, mientras que, en la Cuenca Usumacinta esta categoría también registra valores significativos con un 51.02 %.

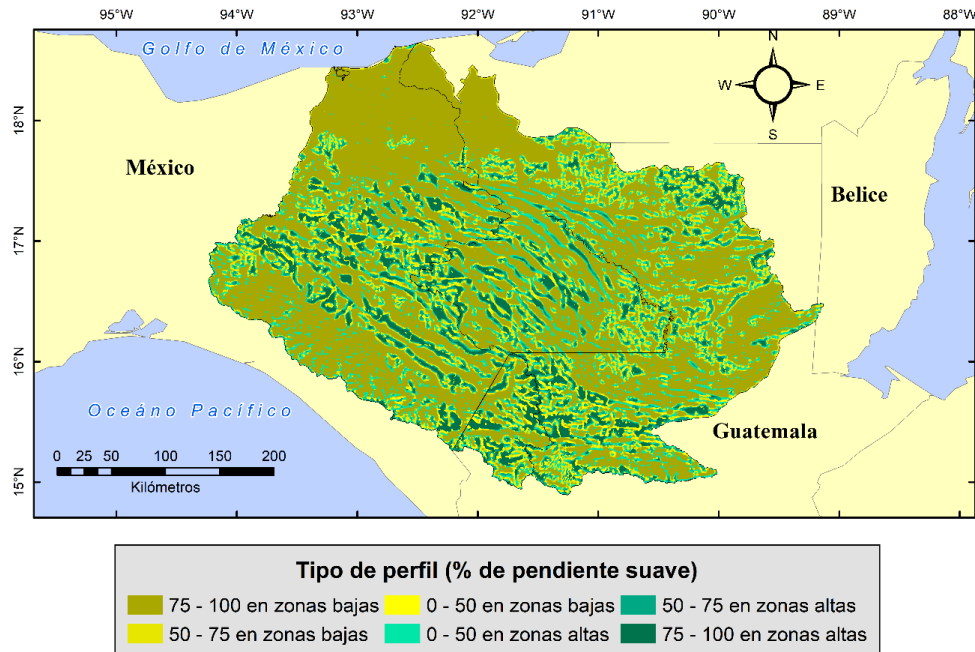
Además, ambas cuencas comparten una distribución que podría considerarse similar en la categoría “0 - 50 zonas bajas”.

En lo relativo a la variabilidad de pendientes, la Cuenca Grijalva tiene una mayor variabilidad en pendientes pronunciadas (“75 - 100 zonas bajas” y “75 - 100 zonas altas”); mientras que, la Cuenca Usumacinta muestra una variabilidad más equitativa entre las categorías de pendiente.

En general, se observa que la Cuenca Grijalva tiende a tener pendientes más pronunciadas en comparación con la Cuenca Usumacinta, donde se observa una mayor variabilidad.

Figura 4

Mapa de tipo de perfil de las cuencas Grijalva y Usumacinta



Fuente: Elaboración propia.

En el análisis específico de México y Guatemala dentro de las cuencas del río Grijalva y Usumacinta (**Tabla 7**), se presentan diferencias relevantes en términos de la composición de perfiles topográficos, según la proporción por país en cada cuenca.

En términos globales, México muestra una preferencia por perfiles con pendientes más pronunciadas en comparación con Guatemala, que tiene una distribución más equitativa en diferentes categorías de pendiente.

De manera particular, en México predomina el perfil “75 - 100 zonas bajas” de manera significativa con 59.69 % en comparación con Guatemala, donde esta categoría representa un 27 % en la Cuenca Grijalva. A la par, Guatemala presenta una proporción

más elevada en la categoría de pendiente moderada de “50 - 75 zonas bajas” con un 13.43 %, en comparación con México (9.19 %).

Además, se destaca que la participación diferencial se evidencia en los perfiles más pronunciados, donde México destaca en la categoría de “75 - 100 zonas bajas” y “75 - 100 zonas altas”, mientras que Guatemala presenta una mayor presencia en perfiles con pendientes moderadas, como “50 - 75 zonas bajas” y “50 - 75 zonas altas”.

Estas diferencias resaltan las distintas características topográficas entre ambos países, considerando su proporción en cada cuenca, aspecto relevante para consideraciones vinculadas a la planificación territorial y la gestión de recursos naturales.

Tabla 7
Tipo de perfil por cuenca-país y total por cuenca

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Tipo de perfil (de pendiente suave)	Porcentaje general (%)						Total
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
75 - 100 zonas bajas	59.69	27.00	56.59	54.74	48.33	51.02	53.49
50 -75 zonas bajas	9.19	13.43	9.59	12.34	14.16	13.40	11.71
0 -50 zonas bajas	4.38	13.52	5.24	3.88	6.12	5.18	5.21
0 -50 zonas altas	11.77	12.04	11.79	14.23	16.20	15.37	13.78
50 -75 zonas altas	7.60	12.70	8.08	9.22	9.24	9.23	8.72
75 -100 zonas altas	7.38	21.31	8.70	5.59	5.95	5.80	7.09

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Tipo de perfil (de pendiente suave)	Áreas (km ²)						Total
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
75 - 100 zonas bajas	31,144.98	1,471.59	32,616.56	16,560.15	20,250.23	36,810.39	6,9426.95
50 -75 zonas bajas	4,796.48	732.31	5,528.78	3,732.11	5,933.84	9,665.95	15,194.74
0 -50 zonas bajas	2,283.02	737.15	3,020.17	1,173.96	2,563.59	3,737.55	6,757.72
0 -50 zonas altas	6,139.60	656.32	6,795.92	4,303.97	6,788.49	11,092.46	17,888.38
50 -75 zonas altas	3,964.14	692.34	4,656.48	2,788.24	3,869.57	6,657.81	11,314.29
75 -100 zonas altas	3,853.29	1,161.53	5,014.83	1,692.53	2,494.47	4,187.00	9,201.83

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Clasificación general

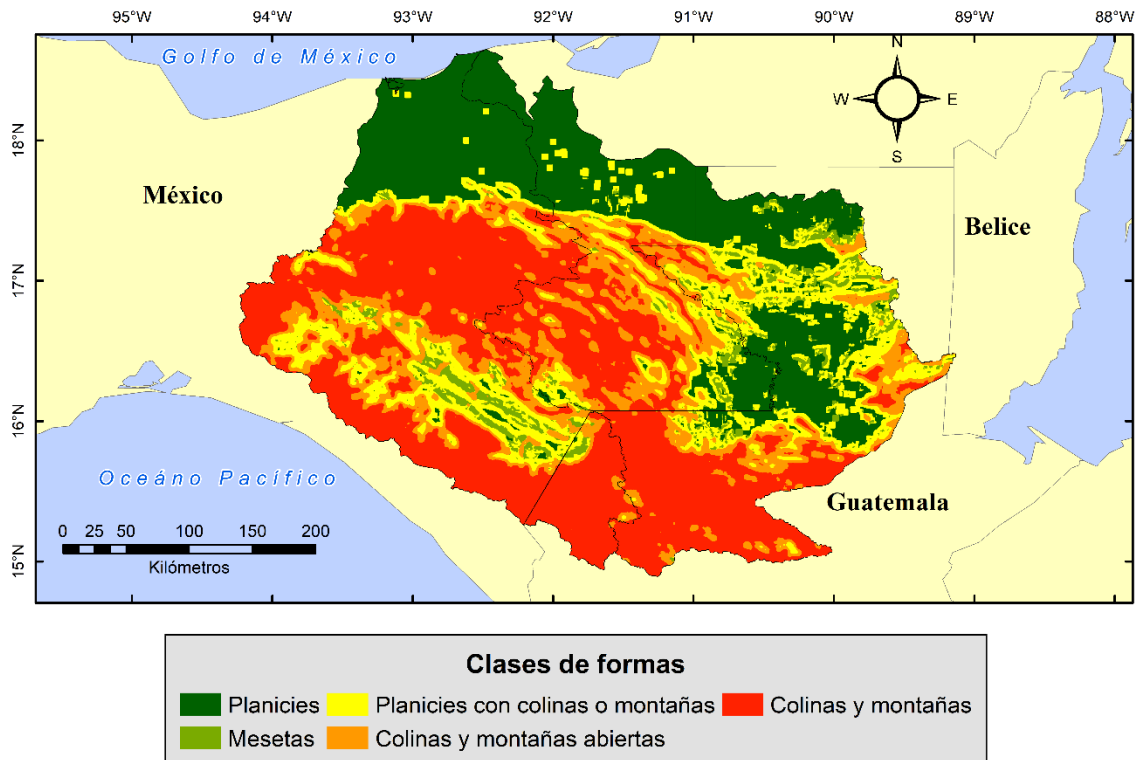
La clasificación proporciona cinco grandes clasificaciones que incluyen 1. Planicies, 2. Mesetas, 3. Planicies con colinas o montañas, 4. Colinas/montañas abiertas y 5. Colinas y montañas. De acuerdo con los resultados el 37.3 % de las CGyU están compuestas por poco más de la mitad de su superficie por colinas y montañas (~48.4 mil km²); y un cuarto de su superficie está compuesto por planicies, mientras que la superficie restante se compone de mesetas y planicies con colinas o montañas (**Figura 5**).

En general, la **Tabla 8** revela aspectos significativos sobre la distribución de clases de formas de terreno en las cuencas del río Grijalva y Usumacinta, desglosadas por país. Entre los rasgos significativos se destaca la extensa presencia de la categoría “Colinas y montañas”, que abarca un área total de 48.4 mil km² en ambas cuencas (37.3 %),

resaltando su dominio en la configuración geográfica. Las “Planicies” también juegan un papel relevante, destacándose en la Cuenca Usumacinta, donde se registran 22.5 mil km², en comparación con los 11.2 mil km² en la Cuenca Grijalva. Además, se observa una variabilidad significativa entre las cuencas en las clases de “Mesetas” y “Colinas/Montañas Abiertas”, destacando las diferencias en la topografía entre las regiones.

Figura 5

Mapa de clases de formas del terreno para las cuencas Grijalva y Usumacinta



Fuente: Elaboración propia.

Desde esta perspectiva, la superficie de la cuenca Grijalva en territorio mexicano se caracteriza por Colinas y Montañas en su mayoría, seguido de Planicies; mientras que en Guatemala las Colinas y Montañas ocupan el 86 % del área de la cuenca.

La cuenca Usumacinta en territorio mexicano se compone por Planicies, Colinas/Montañas Abiertas, y Colinas y Montañas en su mayoría, al igual que en Guatemala; sin embargo, las Planicies con Colinas o Montañas tienen mayor superficie que Colinas/Montañas Abiertas (**Tabla 8**).

Ambas cuencas están compuestas principalmente por Colinas y Montañas seguido de Planicies; aunque, tienen un área muy pequeña ocupada por Mesetas. Estos hallazgos ofrecen una visión detallada de la diversidad del relieve en ambas cuencas, información crucial para la planificación territorial, la gestión de recursos naturales y la comprensión de la vulnerabilidad frente a eventos geo-climáticos (p.ej.: deslizamientos de laderas, inundaciones, entre otros).

Tabla 8
Clases de forma de terreno por cuenca-país y total por cuenca

Características por cuenca-país y total por cuenca							
Clases	Áreas (km ²)						
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			Total
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
Planicie	11,205.54	9.22	11,214.76	10,600.70	11,900.38	22,501.08	3,3715.84
Mesetas	1,721.88	130.09	1,851.96	683.15	2,405.89	3,089.03	4,941.00
Planicies con colinas o montañas	7,590.70	170.29	7,760.99	4,181.91	8,692.66	12,874.57	20,635.56
Colinas/ montañas abiertas	8,676.22	448.44	9,124.65	6,856.82	6,074.49	12,931.31	22,055.97
Colinas y montañas	22,987.08	4,693.08	27,680.16	7,928.87	12,827.40	20,756.27	48,436.43

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Clasificaciones específicas

Las subclases que destacan son “planicies regulares con escaso relieve local”, “montañas abiertas bajas”, “montañas altas” y “montañas bajas”, siendo esta última la de mayor superficie con un 22.6 % de superficie total, como se muestra en la Tabla 9 y en mayor detalle en la **Tabla 10**.

Además las subclases que mostraron un bajo porcentaje fueron “planicies irregulares con relieve moderado”, “mesetas con alto relieve”, “colinas abiertas moderadas”, “montañas abiertas altas” y “colinas altas”. Las subclases “planicies con montañas altas” y “colinas abiertas bajas” mostraron un área insignificante en comparación con el área total de la cuenca.

Tabla 9
Subclases de forma de terreno por cuenca-país y total por cuenca

Características por cuenca-país y total por cuenca (%)							
Subclases	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			Total
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
Planicies llanas o poco llanas	9.10	0.00	8.24	4.38	0.01	1.84	4.68
Planicies regulares con escaso relieve local	12.17	0.17	11.03	29.58	26.44	27.76	20.33
Planicies irregulares con relieve moderado	0.21	0.00	0.19	1.08	1.95	1.59	0.97
Mesetas con relieve moderado	0.70	0.04	0.64	1.70	4.43	3.29	2.11
Mesetas con considerable relieve	2.17	2.05	2.16	0.53	1.30	0.98	1.50
Mesetas con alto relieve	0.42	0.29	0.41	0.03	0.01	0.02	0.19
Planicies con colinas	2.99	0.18	2.72	5.55	13.57	10.21	6.89
Planicies con colinas altas	7.45	2.55	6.99	5.68	6.34	6.06	6.47
Planicies con montañas bajas	4.10	0.40	3.75	2.59	0.83	1.57	2.54
Planicies con montañas altas	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Colinas abiertas bajas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Colinas abiertas moderadas	0.01	0.00	0.01	0.05	0.87	0.53	0.30
Colinas abiertas altas	3.31	1.01	3.09	5.56	7.64	6.77	5.14
Montañas abiertas bajas	12.91	6.85	12.34	16.76	5.94	10.47	11.30
Montañas abiertas altas	0.39	0.37	0.39	0.29	0.05	0.15	0.26
Colinas altas	0.27	0.00	0.25	0.31	1.77	1.16	0.75
Montañas bajas	27.03	34.75	27.76	21.16	16.60	18.51	22.62
Montañas altas	16.76	51.34	20.03	4.74	12.25	9.10	13.95

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10
 Subclases de forma de terreno por cuenca-país y total por cuenca

Subclases	Características por cuenca-país y total por cuenca (km ²)						
	Cuenca Grijalva			Cuenca Usumacinta			Total
	México	Guatemala	Total	México	Guatemala	Total	
Planicies llanas o poco llanas	4,748.36	0.00	4,748.36	1,324.60	2.44	1,327.04	6,075.40
Planicies regulares con escaso relieve local	6,348.43	9.26	6,357.70	8,949.07	11,079.82	20,028.89	26,386.59
Planicies irregulares con relieve moderado	108.67	0.00	108.67	327.00	818.91	1,145.91	1,254.58
Mesetas con relieve moderado	366.39	2.13	368.52	515.67	1,857.23	2,372.90	2,741.41
Mesetas con considerable relieve	1,133.98	111.99	1,245.97	159.07	545.82	704.89	1,950.86
Mesetas con alto relieve	221.44	15.97	237.40	8.37	2.74	11.11	248.51
Planicies con colinas	1,560.18	9.69	1,569.87	1,679.75	5,687.74	7,367.49	8,937.35
Planicies con colinas altas	3,887.42	138.90	4,026.32	1,718.24	2,655.53	4,373.76	8,400.08
Planicies con montañas bajas	2,138.98	21.73	2,160.71	783.70	348.74	1,132.44	3,293.15
Planicies con montañas altas	3.73	0.00	3.73	0.00	0.00	0.00	3.73
Colinas abiertas bajas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
Colinas abiertas moderadas	4.60	0.00	4.60	16.54	363.26	379.79	384.39
Colinas abiertas altas	1,728.73	54.94	1,783.67	1,682.96	3,199.74	4,882.70	6,666.37
Montañas abiertas bajas	6,737.92	373.25	7,111.17	5,068.97	2,488.46	7,557.43	14,668.60
Montañas abiertas altas	205.61	20.22	225.82	88.53	22.54	111.07	336.89
Colinas altas	141.11	0.16	141.27	94.86	740.96	835.81	977.08
Montañas bajas	14,102.24	1,894.08	15,996.31	6,400.77	6,955.66	1,3356.43	29,352.75
Montañas altas	8,743.76	2,798.87	11,542.62	1,433.25	5,131.15	6,564.40	18,107.02

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de la **Figura 6** muestra la distribución espacial de las 18 subclases obtenidas dentro de las CGyU. Las subclases “planicies con montañas altas” y “colinas abiertas bajas” se muestran dentro de la leyenda del mapa, sin embargo, no es posible apreciarlas en el mapa debido a que sus áreas son demasiado pequeñas en comparación con el área total de las cuencas. La localización de estas pequeñas superficies en las cuencas y país está recogida en la Tabla 10.

La clasificación de Hammond basada en Dikau *et al.* (1991) es una buena aproximación, como los resultados obtenidos, pero para un mayor detalle hacen falta el uso de datos Lidar (*Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging*) y datos de campo (p.ej.: imágenes satelitales), con la finalidad de alcanzar un mayor detalle en las formas y elementos del terreno. En este sentido, la clasificación de las formas del terreno es una herramienta que permite obtener información sobre el comportamiento de las cuencas hidrológicas y el *cartografiado* preciso de *las geoformas* del territorio (Martínez-Zavala *et al.*, 2005), sino que se le considera una plataforma geomorfológica clave para la delimitación de unidades sintéticas naturales como base del ordenamiento territorial y las investigaciones aplicadas en el ámbito agrícola, forestal, planificación urbana, y otras actividades productivas (Hernández-Santana *et al.*, 2017). Por ello, los resultados de obtenidos son una contribución al conocimiento de las formas de la superficie de un territorio, cuya tipificación puede utilizarse en el ordenamiento territorial. Los resultados pueden ser mejorados para un mayor detalle de áreas específicas en la zona estudiada. Por ejemplo, se puede mejorar la clasificación con mayor escala y un DEM de mayor de resolución que ofrezca un mayor detalle en estas áreas, permitiendo identificar los tipos de formas del terreno y sus elementos (valles, montañas, entre otros). Adicionalmente, se consideran claves en la mejora de la

precisión de la clasificación tener en cuenta enfoques como: refinar criterios de clasificación con parámetros adicionales o modificación de los existentes; datos espaciales múltiples (topográficos, imágenes satelitales de alta resolución, fotografías aéreas, datos LIDAR), técnicas de aprendizaje automático, consulta a expertos geomorfológicos, técnicas y software actualizadas, variables adicionales (geológicas, climáticas o ambientales), entre otros. Cabe mencionar que, al tratarse de un proceso iterativo, se muestra relevante que dicho proceso sea adaptativo y abierto a los ajustes y refinamientos en la medida en que se va analizando la zona de estudio.

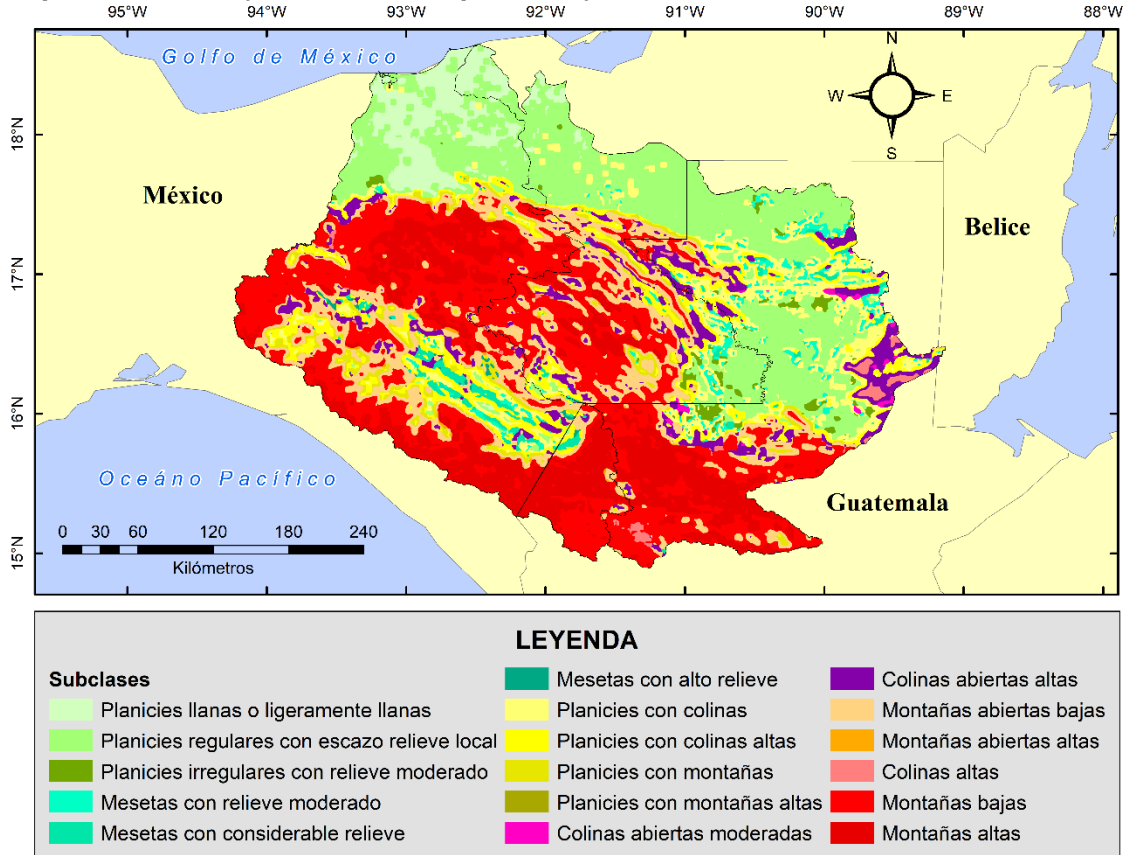
Cabe señalar que las CGyU han sufrido modificaciones importantes que han impactado la dinámica del equilibrio hídrico y los patrones naturales de inundaciones en áreas bajas debido a la construcción de infraestructura, así como al aumento de las actividades antropogénicas (Muñoz-Salinas *et al.*, 2023; Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019; Herrera-Silveira *et al.*, 2019; Mendoza *et al.*, 2019; De la Rosa-Velázquez *et al.*, 2017; Muñoz-Salinas & Castillo, 2015). En cuanto a la geomorfología, los cauces sinuosos, las bajas pendientes y capacidad de drenaje o descarga de caudales que definen la llanura y/o planicie de la parte baja de las CGyU, características que describen a esta zona como una llanura de inundación natural (Meyer-Corral, 1971). En esta dinámica, de acuerdo con Wierzbicki *et al.* (2020) la arquitectura de las llanuras aluviales puede considerarse como un archivo natural de los procesos ocurridos en toda la cuenca de captación, por ejemplo, los relativos a los esfuerzos humanos por controlar las inundaciones. Para ello, los autores señalan que es necesario conocer a detalle los accidentes geográficos fluviales y los sedimentos que se desarrollaron en las grandes llanuras aluviales. No obstante, si bien se han reportado estudios sobre la alta vulnerabilidad geomorfológica costera vinculada a los efectos del cambio climático (p.ej.: incremento del nivel del mar, la erosión costera y la intrusión salina) (Núñez-Gómez *et al.*, 2016; Ramos-Reyes *et al.*, 2016; Maya-Zayas *et al.*, 2017), los estudios geomorfométricos y geomorfológicos no se han extendido a diferentes escalas de las CGyU.

En el contexto de los eventos de inundación en las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta, los resultados del análisis geomorfométrico son importantes para comprender y predecir patrones de inundaciones e identificar áreas específicas que son particularmente vulnerables a este tipo de eventos, lo cual es muy importante ya que proporciona información útil. Las características del terreno clasificadas mediante mediciones topográficas influyen en la velocidad y dirección del flujo de agua, siendo claves en la predicción de las tasas de escorrentía durante eventos de precipitación intensas. En particular, estos factores contribuyen de manera importante a identificar áreas en riesgo y a la planificación de respuestas efectivas ante las inundaciones, incluidas medidas de mitigación, zonas estratégicas de evacuación y la gestión del agua. Asimismo, el análisis presentado puede contribuir a la formulación de estrategias de gestión de riesgos más precisas en cuanto a la evaluación de riesgos geomórficos (p.ej.: deslizamientos de tierra y cambios en lechos o fondo de los ríos). Además, las diferencias geomorfológicas entre México y Guatemala resaltan la importancia de la colaboración transfronteriza para abordar los desafíos asociados a eventos de inundación en cuencas compartidas. En resumen, la geomorfometría no solo profundiza la comprensión de la topografía, sino que ofrece una base sólida para el fortalecimiento

de la resiliencia de las comunidades ante eventos hidrometeorológicos extremos y mejorar las estrategias de gestión de riesgos en las cuencas Grijalva y Usumacinta.

Figura 6

Mapa de subclases de formas del terreno para las CGyU



Fuente: Elaboración propia.

A grandes rasgos, los resultados representan un punto de partida para promover estudios geomorfométricos que contribuyan al conocimiento de los procesos sistémicos en las CGyU. La clasificación de las formas del terreno representa un ámbito relevante para el análisis y comprensión de diferentes ámbitos y problemáticas vinculadas al territorio, algunos de ellos presentes en las CGyU, tales como: riesgo por erosión (Martínez-Zavala *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2010), inundaciones (Wierzbicki *et al.*, 2020), conocimiento y planificación del paisaje (Vannamettee *et al.*, 2014; Ercolano *et al.*, 2020), atributos del suelo y estructura de la vegetación (Arruda *et al.*, 2015; Mokarram y Sathyamoorthy, 2018), patrones de vegetación y dinámica de sedimentos (Baartman *et al.*, 2018), la vegetación (Kirkby, 1995), deslizamientos de laderas (Porter *et al.*, 2008; Damayanti *et al.*, 2020) y el comportamiento de incendios (Takaoka *et al.*, 1996). Consecuentemente, existen otros ámbitos y patrones por evaluar y analizar que deben ser asociados a las unidades geomorfométricas obtenidas en el presente estudio. Por tanto, la importancia de este estudio se enmarca como una contribución base para el conocimiento del área estudiada que busca favorecer no solo la aplicación de los SIG en el análisis de las problemáticas de la zona, sino también la toma de decisión en los

temas de ordenamiento y planificación territorial, infraestructuras y protección civil, y políticas públicas.

3. Conclusiones

La geomorfometría desempeña un papel fundamental en la exploración y análisis de la superficie terrestre, proporcionando un sólido marco conceptual y metodológico para comprender las complejas características del medio físico. En el contexto específico de las cuencas del río Grijalva y Usumacinta (CGyU), compartidas por México, Guatemala y Belice, se destacan la abundancia hídrica, la riqueza natural y la elevada vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos extremos.

El propósito fundamental de la investigación ha sido la caracterización geomorfométrica detallada de las CGyU. Para alcanzar este objetivo, se ha realizado una clasificación jerárquica basada en el método de Hammond y automatizado este proceso utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), siguiendo una adaptación de la metodología propuesta por Dikau. Los resultados obtenidos revelan la existencia de cinco clases principales y dieciocho subclases que describen de manera precisa las diversas formas del terreno presentes en ambas cuencas en las Tablas 8, 9 y 10.

Entre los hallazgos más relevantes, se observa que las “Colinas y montañas” dominan extensivamente en ambas cuencas, con una cobertura de área total de 48.4 mil km². Las “Planicies” también juegan un papel significativo, particularmente en la Cuenca Usumacinta con un total de 22.5 mil km²; en comparación con los 11.2 mil km² en la Cuenca Grijalva. Asimismo, a nivel país un hallazgo destacado es la presencia significativamente mayor de la categoría “75 - 100 zonas bajas” en México (59.7 %) en comparación con Guatemala (27 %) en la Cuenca Grijalva. Asimismo, se observa una proporción más elevada de “50 - 75 zonas bajas” en Guatemala (13.4 %) frente a México (9.2 %). Estas diferencias subrayan las distintas características topográficas entre ambos países, considerando su proporción en cada cuenca.

A la luz de estos hallazgos, la metodología empleada en este estudio se muestra efectiva para la caracterización de las formas del terreno en las CGyU. Este conocimiento no solo es de gran valor en sí mismo, sino que se presenta como relevante para impulsar estudios que identifiquen y evalúen la vulnerabilidad mediante indicadores geomorfológicos en esta región. Adicionalmente, los resultados obtenidos pueden ser claves al tener en cuenta las unidades geomorfométricas en los análisis asociados con las variables edafológicas, la vegetación, las plantaciones forestales, el almacenamiento de carbono, la erosión, la deforestación, el clima y la hidrología. De tal modo, este trabajo de investigación se enmarca como una contribución al fortalecimiento del conocimiento de la zona de estudio; además de favorecer la toma de decisión y la investigación en los temas relacionados.

Disponibilidad de datos

El conjunto de datos espaciales y mapas generados en este estudio están disponibles públicamente en el repositorio *GitHub* y se puede acceder a ellos en: https://github.com/pablovelsan/caracterizacion_geomorfometrica

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones en la mejora de esta investigación. ORMP también desea agradecer al programa Investigadores por México (CONAHCYT) y al proyecto Cátedras CONAHCYT-CCGS no. 963 titulado “Hacia un manejo sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica”.

Referencias

- Alcérreca-Huerta**, J. C., Callejas-Jiménez, M. E., Carrillo, L. y Castillo, M. M. (2019). Dam implications on salt-water intrusion and land use within a tropical estuarine environment of the Gulf of Mexico. *Science of The Total Environment*, 652, 1102-1112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.288>
- Andrade-Velázquez**, M. y Medrano-Pérez, O. R. (2021). Historical precipitation patterns in the South-Southeast region of Mexico and future projections. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 69-84. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.87255>
- Andrade-Velázquez**, M. y Medrano-Pérez, O. R. (2020). Precipitation patterns in Usumacinta and Grijalva basins (southern Mexico) under a changing climate. *Revista Bio Ciencias*, 7, e905. <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e905>
- Álvarez-Soberano**, A. y Medrano-Pérez, O. R. (2020). Caracterización geomorfo-lógica de la subcuenca río Mezcalapa, región hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30) en sureste de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 28(80), 32-44. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020803002>
- Arruda**, D. M., Schaefer, C. E., Corrêa, G. R., Rodrigues, P. M., Duque-Brasil, R., Ferreira-JR, W. G. y Oliveira-Filho, A. T. (2015). Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. *Folia Geobotanica*, 50(3), 175-184. <http://doi.org/10.1007/s12224-015-9221-0>
- Banco** Interamericano de Desarrollo (BID). (2014). *PAOM: Diagnóstico integrado con identificación de áreas prioritarias*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://tinyurl.com/52fwss2m>
- Baartman**, J. E., Temme, A. J. y Saco, P. M. (2018). The effect of landform variation on vegetation patterning and related sediment dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2121-2135. <https://doi.org/10.1002/esp.4377>

- Castillo-Cruz, Z. G. y Medrano-Pérez, O. R. (2023).** Análisis geomorfológico de las subcuencas Usumacinta y Grijalva en el sureste de México. *Acta Universitaria*, 33, 1-20. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3684>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Fondo Nórdico de Desarrollo (NDF), Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales - Guatemala (MARN). (2018).** *La economía del cambio climático en Guatemala*. Documento técnico 2018, LC/MEX/TS.2018/13, Ciudad de México. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/43725-la-economia-cambio-climatico-guatemala-documento-tecnico-2018>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012).** Estudio para determinar la viabilidad de mejorar el drenado en la cuenca baja de los ríos San Pedro y San Pablo, Usumacinta, Macuspana, Tulijá y Palizada. Modelo zona de los ríos y análisis del funcionamiento hidráulico de la zona de los Pantanos de Centla. En *Acciones complementarias del Plan Hídrico Integral de Tabasco (CONTRATO SGIH-GDTT-SGOPR-UNAM-II-2012-01)*. Informe Final Elaborado por Carrillo J. J., Domínguez R., Pedrozo A., Gutiérrez G. y Velázquez J. E. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/plan-hidrico-integral-de-tabasco-phit-acciones-complementarias-2012>
- CONAGUA. (2014).** *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*. CONAGUA: Organismo de Cuenca Frontera Sur, Consejo de Cuenca de los Ríos Grijalva y Usumacinta. <https://tinyurl.com/2sup4n9r>
- Damayanti, A., Angin, F., Adib, A. y Irfan, M. (2020).** Geomorphological Characteristic of Landslide Hazard Zones in Sukarame Village, Cisolok Subdistric, Sukabumi Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 412(1), 012009. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012009>
- De la Rosa-Velázquez, M. I., Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M. Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R. y Espejel, I. (2017).** Development stressors are stronger than protected area management: a case of the Pantanos de Centla biosphere reserve, Mexico. *Land Use Policy* 67, 340-351. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.009>
- Dehn, M., Gärtner, H. y Dikau, R. (2001).** Principles of semantic modeling of landform structures. *Computers & Geosciences*, 27(8), 1005-1010. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00138-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00138-2)
- Dikau, R., Brabb, E. E. y Mark, R. M. (1991).** Landform Classification of New Mexico by Computer. U.S. Department of the Interior. *U.S. Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/ofr91634>
- Drăguț, L. y Blaschke, T. (2006).** Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology*, 81(3-4), 330-344. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>
- Ercolano, B., Marderwald, G. N., Coronato, A., Tiberi, P. y Corbella, H. (2020).** Geofomas crionivales en la meseta Latorre, Patagonia austral extraandina, Argentina. *Cuaternario y Geomorfología*, 34(3-4), 33-46. <https://doi.org/10.17735/cyg.v34i3-4.79643>

- ESRI.** (2019). ArcGIS and ArcMap (ArcMap 10.5). Software Esri. Redlands (EEUU), Environmental Systems Research Institute Inc. Redlands (EEUU). www.esri.com
- Gallant, A. L., Brown, D. D. y Hoffer, R. M.** (2005). Automated Mapping of Hammond's Landforms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(4), 384-388. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.848529>
- Gallardo-Cruz, J. A., Fernández-Montes de Oca, A. y Rives, C.** (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2), 82-99. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>
- García-García, A. y Kauffer, E. F.** (2011). Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: Un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera norte*, 23(45), 131-161. <https://tinyurl.com/53y4me2s>
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra (GIMBOT).** (2014). Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 y Mapa de cambios en uso de la tierra 2001-2010 para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero. Documento Informativo. <https://tinyurl.com/2p834f77>
- Hammond, E. H.** (1964). Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale land form mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1), 11-19. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x>
- Hernández-Santana, J., Pérez Damián, J., Rosete Vergés, F., Villalobos Delgado, M., Méndez Linares, A. y Navarro Salas, E.** (2017). Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfológica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve. *Investigaciones Geográficas*, (94). <http://dx.doi.org/10.14350/ig.57019>
- Herrera-Silveira, J. A., Lara-Domínguez, A. L., Yáñez-Arancibia, A., Ojeda, S. M., Hernández, C. T. y Kemp, G. P.** (2019). Ecosystem Functioning and Sustainable Management in Coastal Systems with High Freshwater Input in the Southern Gulf of Mexico and Yucatan Peninsula. *Coasts and Estuaries*, 377-397. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814003-1.00022-8>
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V.M., Munguía-Orozco, L. y Meillón-Menchaca, O.** (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 15-38. <https://tinyurl.com/9nncje2h>
- INEGI.** (2022). *Biblioteca digital de mapas* [Repositorio digital de mapas]. <https://tinyurl.com/msx8m68a>
- Irigaray-Fernández, C., Fernández del Castillo, T. y Chacón-Montero, J.** (1997). Aplicación de un sistema de información geográfica al análisis del medio físico en el sector de Rute (Córdoba). *Cuaternario y Geomorfología*, 11(1-2), 99-112.
- Iwahashi, J. y Pike, R. J.** (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86(3-4), 409-440. <https://tinyurl.com/y284whca>
- Jasiewicz, J. y Stepinski, T. F.** (2013). Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>
- Kirkby, M.** (1995). Modelling the links between vegetation and landforms. *Geomorphology*, 13(1-4), 319-335. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00065-D](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00065-D)

- Libohova, Z.,** Winzeler, H. E., Lee, B., Schoeneberger, P. J., Datta, J. y Owens, P. R. (2016). Geomorphons: Landform and property predictions in a glacial moraine in Indiana landscapes. *CATENA*, 142, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.002>
- Li, M.,** Yao, W., Li, Z., Liu, P. y Shen, Z. (2010). Effects of landforms on the erosion rate in a small watershed by the ¹³⁷Cs tracing method. *Journal of environmental radioactivity*, 101(5), 380-384. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.02.011>
- López-Pérez, A.,** Martínez-Menes, M. R. y Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(1), 121-137. <https://tinyurl.com/avzvn25>
- MacMillan, R. A.** y Shary, P. A. (2009). Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. En T. Hengl y H.I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications* (pp. 227-254). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00009-3)
- March-Mifsut, I. J.** y Castro, M. (2010). La Cuenca del Río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. En H. Cotler-Ávalos (Coord.), *Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización* (pp. 193-197). SEMARNAT, INE, IAP.
- Martínez-Zavala, L.,** Jordán-López, A., Anaya-Romero, M., Gómez-Parrales, I. y Bellinfante-Crocci, N. (2005). Clasificación automática de elementos geomorfológicos en la cuenca del río Tepalcatepec (México) a partir de un modelo digital de elevaciones. *Cuaternario y Geomorfología*, 19(3-4), 49-61. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CUGEO/article/view/17005>
- Martins, F. M. G.,** Fernández, H. M., Isidoro, J. M. G. P., Jordán, A. y Zavala, L. (2016). Classification of landforms in Southern Portugal (Ria Formosa Basin). *Journal of Maps*, 12(3), 422-430. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1035346>
- Maya-Zayas, E. E.,** Gama, L., Vázquez-Navarrete, C., Díaz-López, H., Figueroa-Maheng, J. M. y Rincón-Ramírez, J. (2017). Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos en la zona de influencia costera de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, ante la elevación de nivel medio del mar, asociada al cambio climático. En: A. V. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez y J. L. Rojas-Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático* (192-230 pp.). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma de Campeche.
- Medrano-Pérez, O. R.,** Payano-Almánzar, R., y López-Jiménez, L. N. (2022). Caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, México. *Acta Universitaria*, 31, 1-19. <https://doi.org/10.15174/au.2021.2846>
- Meyer-Corral, J.** (1971). Sistema para realizar rellenos hidráulicos en zonas de inundación casi permanente Región de los ríos Tabasco-Campeche. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 25(4), 435-440. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). <https://tinyurl.com/2p9u9hx6>
- Minár, J.,** Krcho, J., Evans, I. S. (2016). Geomorphometry: Quantitative Land-Surface Analysis. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, 14, 22-34). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10260-X>

- Mokarram**, M. y Sathyamoorthy, D. (2018). A review of landform classification methods. *Spatial Information Research*, 26(6), 647-660.
<https://doi.org/10.1007/s41324-018-0209-8>
- Mora** P. L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 377-394.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a1>
- Moreno-Brotóns**, J., Alonso Sarría, F. y Romero Díaz, A. (2010). Clasificación geomorfométrica a partir de datos LIDAR en un área minera degradada. En: J. Ojeda, M.F. Pita, & I. Vallejo. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 930-41). Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Muñoz-Salinas**, E., Cook, D., Castillo, M., Beach, T. y Luzzadder-Beach, S. (2023). Four millennia of geomorphic change and human settlement in the lower Usumacinta-Grijalva River Basin, Mexico. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 47(2), 227-248. <https://doi.org/10.1177/03091333231156506>
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems; U.S./Japan ASTER Science Team** (2009). ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. <http://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002>
- Núñez-Gómez**, J. C., Ramos-Reyes, R., Barba-Macías, E., Espinoza-Tenorio, A. y Gama-Campillo, L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 91, 70-85.
<https://doi.org/10.14350/rig.50172>
- Porter**, T. P., Owens, P. R., Lee, B. D. y Marshall, D. (2008), Soil and Landform Characteristics Related to Landslide Activity—A Review. *Soil Survey Horizons*, 49, 22-26. <https://doi.org/10.2136/sh2008.1.0022>
- QGIS Development Team**. (2019). *QGIS Geographic Information System (QGIS Desktop 3.6.3)*. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Ramos-Reyes**, R., Zavala-Cruz, J., Gama-Campillo, L. M., Pech-Pool, D. y Ortiz-Pérez, M. A. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581-598.
- Rubio-Gutiérrez**, H. y Triana-Ramírez, C. (2006). *Gestión integrada de crecientes caso de estudio México: río Grijalva*. Organización Meteorológica Mundial (OMM).
<https://tinyurl.com/3r5f279k>
- Stepinski**, T. F. y Jasiewicz, J. (2011). *Geomorphons - a new approach to classification of landforms*. <https://www.researchgate.net/publication/264850233>
- Takaoka**, S. y Sasa, K. (1996). Landform effects on fire behavior and post-fire regeneration in the mixed forests of northern Japan. *Ecological Research*, 11, 339-349. <https://doi.org/10.1007/BF02347791>
- Valdés-Manzanilla**, A. (2016). Historical floods in Tabasco and Chiapas during sixteenth–twentieth centuries. *Natural Hazards*, 80(3), 1563-1577.
<https://doi.org/10.1007/s11069-015-2039-5>

- Vannamettee**, E., Babel, L. V., Hendriks, M. R., Schuur, J., De Jong, S. M., Bierkens, M. F. P. y Karssenberg, D. (2014). Semi-automated mapping of landforms using multiple point geostatistics. *Geomorphology*, 221, 298-319. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.032>
- Viers**, G. (1973). *Geomorfología*. (3rd ed.). Oikos-Tau.
- Wierzbicki**, G., Ostrowski, P. y Falkowski, T. (2020). Applying floodplain geomorphology to flood management (The Lower Vistula River upstream from Plock, Poland). *Open Geosciences*, 12(1), 1003-1016. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0102>
- Xiong**, L., Li, S., Strobl, J. y Tang, G. (2022). Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications. *Earth-Science Reviews*, 233, Article 104191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>