

Diversidad de las morfologías kársticas del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta a microescala espacial, México

Diversidade de morfologias cársticas do Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta
em escala microespacial, México

Diversity of karst morphologies in the UNESCO Mixteca Alta World Geopark
at the microscale, Mexico

José Luis Sánchez-Cortez¹, Norma López-Castañeda¹, Kathleen Vélez-Macías² y
Bernardo Ortega-Díaz³

¹ Universidad Autónoma de México (UNAM), Instituto de Geografía,
Unidad Académica de Estudios Territoriales-Oaxaca, Oaxaca, México

² Universidad Autónoma de México (UNAM), Instituto de Geografía,
Postgrado en Geografía, Ciudad de México

³ Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, Yanhuitlán, Oaxaca, México
jsanchez@geografia.unam.mx; jssancor@gmail.com; normalc@geografia.unam.mx;
Kathleen_311297@hotmail.com; berot.medios@gmail.com

Sánchez: <https://orcid.org/0000-0002-1236-2848>

López: <https://orcid.org/0009-0008-8488-1170>

Vélez: <https://orcid.org/0009-0000-8732-3205>

Ortega: <https://orcid.org/0009-0000-7312-3085>

Resumen

Los paisajes kársticos se forman a partir de procesos fisicoquímicos que generan disoluciones y precipitaciones, influenciadas por factores geológicos y ambientales, produciendo una serie de morfologías características de estos sistemas. El actual estudio presenta un inventario de formas de origen kárstico a microescala espacial, en rocas calcáreas dentro del territorio del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, ubicado en estado de Oaxaca, México. Se realizaron observaciones de campo y descripciones específicas en seis sitios de muestreo, en donde se estableció la distribución de las morfologías en el territorio del geoparque, y la geodiversidad intrínseca de las formas kársticas. Aunque las tipologías de las morfologías kársticas no constituyeron números significativos, los rangos de geodiversidad mostraron valoraciones heterogéneas debido a los contrastes de las áreas de estudio. Se considera que estas caracterizaciones son valiosas herramientas para potenciar el geoturismo y la geoeducación, fortaleciendo el conocimiento sobre la geodiversidad y su conservación.

PALABRAS CLAVE: geodiversidad; kárstico; geoconservación; geoparques UNESCO.

Resumo

As paisagens cársticas são formadas por processos físico-químicos que geram dissolução e precipitação, influenciados por fatores geológicos e ambientais, produzindo uma série de morfologias características desses sistemas. O estudo atual apresenta um inventário de formas de relevo cárstico na microescala das rochas calcárias dentro do Geoparque Mundial da UNESCO Mixteca Alta, localizado no estado de Oaxaca, México. Foram realizadas observações de campo e descrições específicas em seis locais de amostragem, onde foram estabelecidas a distribuição das morfologias dentro do território do geoparque e a geodiversidade intrínseca das formas cársticas. Embora as tipologias de morfologias cársticas não tenham constituído números significativos, as faixas de geodiversidade apresentaram avaliações heterogêneas devido aos contrastes das áreas de estudo. Essas caracterizações são consideradas ferramentas valiosas para promover o geoturismo e a geoeducação, fortalecendo o conhecimento sobre a geodiversidade e sua conservação.

PALAVRAS-CHAVE: geodiversidade; cárstica; geoconservação; geoparques da UNESCO.

Abstract

Karst landscapes are formed from physicochemical processes that generate dissolution and precipitation, influenced by geological and environmental factors, producing a series of morphologies characteristic of these systems. The present study shows an inventory of karstic forms at the microspatial scale, in calcareous rocks within the territory of the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark, located in the state of Oaxaca, Mexico. Field observations and specific descriptions were made in six sampling sites, where the distribution of morphologies in the geopark territory and the intrinsic geodiversity of karst forms were established. Although the typologies of the karst morphologies did not constitute significant numbers, the geodiversity ranges showed heterogeneous valuations due to the contrasts of the study areas. These characterizations are considered valuable tools to enhance geotourism and geoeducation, strengthening knowledge about geodiversity and its conservation.

KEYWORDS: geodiversity; karst; geoconservation; UNESCO geoparks.

1. Introducción

Los paisajes kársticos se caracterizan por una variedad de formas específicas originadas a partir de procesos químicos y físicos que favorecen la disolución de rocas solubles, y su evolución está influenciada por diversos factores, como el régimen hídrico, la composición litológica y las estructuras geológicas (Assaad y LaMoreaux, 2004; Carrasco-Velázquez *et al.*, 2004; Ford y Williams, 2007; Andreychouk, 2016; De Waele, 2017). Este tipo de relieve brinda numerosos servicios ambientales, que van desde el suministro de agua y la regulación térmica hasta la creación de hábitats y nichos ecológicos únicos, además de generar espacios de recreación (Reinhart *et al.*, 2023). En particular, el turismo en cuevas y cavernas representa una de las principales actividades ligadas al karst, con importantes repercusiones sociales y económicas en las comunidades (Cigna y Forti, 2013; Piano *et al.*, 2024). No obstante, debido a las presiones sobre los recursos vinculados a estos sistemas, su conservación y las amenazas que enfrentan han sido objeto de amplio análisis a nivel mundial (Nanni *et al.*, 2023).

Los sistemas kársticos son entornos naturales de gran complejidad y sensibilidad, formados mediante un proceso epigénico que, además de depender de las propiedades fisicoquímicas de las rocas, involucra factores como la vegetación, partículas en suspensión en las aguas que recorren estos paisajes, el grosor de los materiales de sobrecarga y la temperatura del agua y el aire (White, 1970; Bahtijarevic, 1996; North, 2007). Las diversas morfologías kársticas pueden clasificarse según su origen genético en exokarst, cuando se desarrollan en la superficie, y endokarst, cuando se forman en el subsuelo. Este criterio facilita su análisis y clasificación según su escala, aunque la presencia de morfologías poligénicas puede dificultar estas categorizaciones (Herak, 1990; Ford y Williams, 2007; Andreu *et al.*, 2016; Dubois *et al.*, 2022).

La configuración de estos paisajes únicos presenta una diversidad de morfologías a distintas escalas, que, según la geomorfología tradicional, pueden clasificarse con base en su dimensión espacial y temporal. En este sentido, las formaciones identificadas a microescala y mesoescala están vinculadas con el tiempo

necesario para su desarrollo en el entorno (De Boer, 1992; Carvajal Perico, 2012; Sánchez-Cortez *et al.*, 2024). Sin embargo, más allá de la escala utilizada, todos estos elementos conforman la geodiversidad kárstica de un territorio. Es fundamental considerar que el estudio de la diversidad geológica implica analizar la variedad, frecuencia y distribución de los componentes geológicos dentro de un área específica, siendo la geodiversidad intrínseca uno de sus principales valores (Serrano Cañadas y Ruiz Flaño, 2007; Brilha, 2016; Nieto, 2023; Sánchez-Cortez *et al.*, 2024).

En el presente trabajo se llevó a cabo un modelo para reconocer la diversidad de la morfología kárstica en las zonas de rocas calcáreas presentes al interior del territorio del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta (GMUMA), en el estado de Oaxaca, al sureste de México (Mixteca Alta Aspiring Geopark, 2015). El objeto del estudio fue el análisis y descripción de la geodiversidad intrínseca presente a microescala espacial, en este territorio de gran relevancia geológica y geomorfológica. La diversidad morfológica kárstica se observó y correlacionó entre todos los sitios destinados para el muestreo. Los resultados reflejaron una heterogeneidad en los valores de diversidad en los sitios evaluados, y se plantea que la caracterización de los elementos kársticos dentro del GMUMA podría constituir una herramienta clave para el desarrollo del geoturismo y los procesos geoeducativos.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta abarca nueve municipios en la parte centro oeste de la Mixteca Alta, en Oaxaca. Su extensión es de 415 km² (Palacio-Prieto *et al.*, 2016) y alberga aproximadamente a 7.000 habitantes. Este territorio se caracteriza por un relieve montañoso con valles y lomeríos, y su altitud varía entre los 2.050 y 2.890 metros sobre el nivel del mar. Debido a su ubicación entre las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental, presenta una gran diversidad geológica, con diferentes tipos de rocas que varían en edad y condiciones, además de estructuras tectónicas locales y regionales. En este territorio afloran

secuencias de rocas sedimentarias mesozoicas, pertenecientes a la cuenca Tlaxiaco, la cual reposa sobre un basamento metamórfico cristalino del proterozoico, conocido como Complejo Oaxaqueño. La cuenca Tlaxiaco incluye depósitos alternados de materiales

marinos en plataforma continental, seguidos por secuencias de rocas de origen fluvial continental del cenozoico (Mixteca Alta Aspiring Geopark, 2015; Santamaría-Díaz *et al.*, 2008), (FIGURA 1).

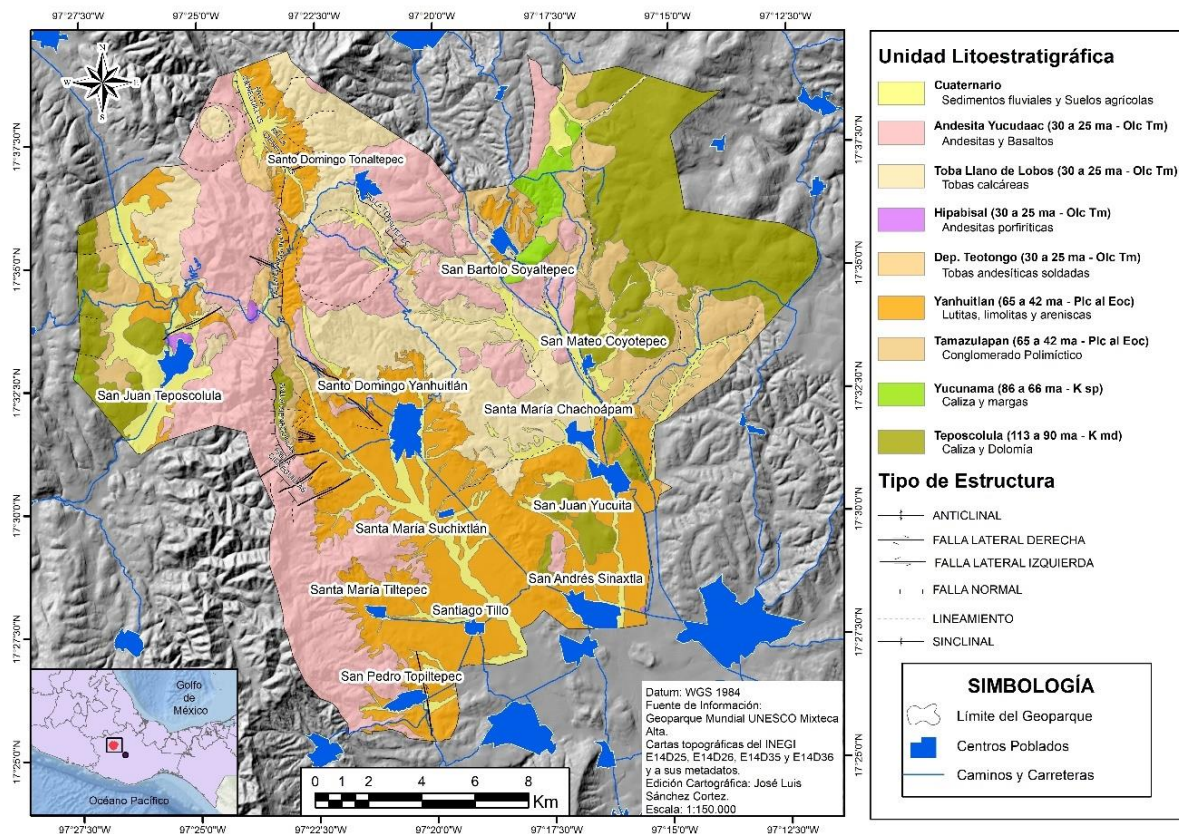


FIGURA 1. Mapa geológico del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Fuente: elaboración propia

2.2 Selección del área kárstica del GMUMA

La selección del área kárstica del GMUMA empleada en este estudio se realizó mediante teledetección, a través del empleo de bandas espectrales, para identificar las variables mineralógicas de los carbonatos presentes en las rocas calcáreas. Para lo cual se utilizaron dos imágenes satelitales ASTER L1T, con reducción de errores topográficos y 14 bandas, cuyas condiciones son adecuadas para la discriminación litológica (U.S. Geological Survey, 2020; Vargas-Gonzales, 2013). Para garantizar la precisión del proceso, se seleccionaron imágenes satelitales sin nubosidad, correspondientes a periodos de baja precipitación, con el fin de minimizar la vegetación presente. Además, considerando

que el sensor SWIR dejó de funcionar en 2008 (LP DAAC, 2009), se optó por imágenes de marzo de 2005, asegurando que esta elección no afectara los resultados del análisis de identificación litológica.

El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo mediante el software ENVI 5.3, realizando una corrección radiométrica en los sensores VNIR y SWIR. Posteriormente, se generó un mosaico a partir de las dos imágenes y se aplicó el proceso *layer stacking* a los sensores VNIR y SWIR para efectuar la corrección atmosférica utilizando el método *Internal Average Relative Reflectance* (IAR). Finalmente, se aplicaron máscaras para excluir elementos no deseados en la identificación litológica. Se utilizó el índice

de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para eliminar la vegetación en zonas áridas o semiáridas (Hartz *et al.*, 2006), junto con máscaras de sombras y cuerpos de agua, asegurando una mayor precisión en el análisis.

A las bandas necesarias, se le aplicó un análisis matemático de bandas con el objetivo de identificar las variables mineralógicas presentes en el GMUMA. Para ello, se empleó el índice de calcita, mediante la ecuación (1) propuesta por Ninomiya (2004), considerada una herramienta clave para la identificación de zonas mineralógicas dentro del GMUMA. El índice de calcita es una herramienta utilizada para identificar áreas con presencia de este mineral, lo que puede ser útil en la exploración geológica y minera. Este índice permite detectar alteraciones propilíticas asociadas a la presencia de minerales como la clorita, epidota, albita y carbonatos (Bagheri *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2024).

$$CI_{SWIR} = (b6 * b9) / (b8 * b8) \quad (1)$$

Posterior a esto, se realizó un mapa con la distribución de las áreas con alteración propilítica (FIGURA 2), (carbonatos, clorita, epidota y albita). Sin embargo, para determinar las áreas con presencia de zonas de mineralización de carbonatos exclusivamente (áreas potencialmente kársticas), se tomó como base el mapa de distribución de las áreas con alteración propilítica y se complementó con observaciones macroscópicas de los rasgos litológicos y mineralógicos en once puntos de muestreo selectivo (TABLA 1), además se contrastó con el mapa Geológico del Geoparque Mixteca Alta. Una vez realizada esta comprobación de campo, se pudo obtener un mapa definitivo de la distribución de las zonas kársticas (FIGURA 3).

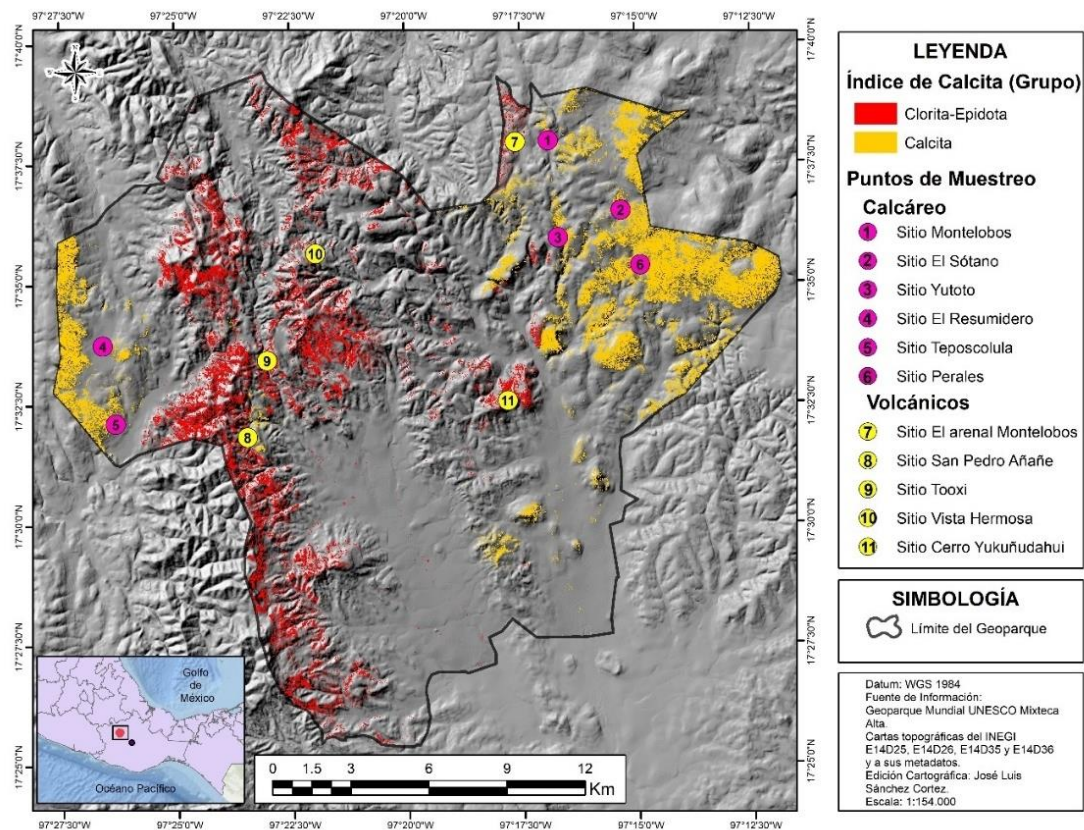


FIGURA 2. Mapa de distribución de las áreas con alteración propilítica. Fuente: elaboración propia

TABLA 1. Sitios destinados para el muestreo selectivo, para la verificación en campo de las áreas mineralizadas con alteración propilítica. Fuente: elaboración propia

NRO.	SITIOS	ALTITUD (msnm)	DESCRIPCIÓN
1	Montelobos	2.440	Calizas de la formación Teposcolula, con presencia de fósiles de bivalvos y gasterópodos
2	El Sótano	2.487	Calizas de la formación Teposcolula, con presencia de fósiles de bivalvos y gasterópodos
3	Yutoto	2.400	Calizas de la formación Teposcolula, importante presencia de gasterópodos
4	Resumidero	2.338	Calizas de la formación Teposcolula, presencia de clastos con minerales silíceos
5	Teposcolula	2.301	Calizas de la formación Teposcolula, presencia de clastos con minerales silíceos. Calizas con brechas de gran tamaño
6	Perales	2.452	Calizas de la formación Teposcolula, importante presencia de gasterópodos
7	El arenal Montelobos	2.471	Andesitas alteradas y areniscas con alto contenido de material calcáreo
8	San Pedro Añãne	2.394	Andesitas alteradas, cloritas, presencia de óxidos y epidotas en menor proporción
9	Tooxi	2.361	Andesitas poco alteradas con cloritización
10	Vista Hermosa	2.571	Andesitas con alteración clorítica y presencia de óxidos, albitas y epidotas en menor proporción
11	Cerro Yukuñdahui	2.367	Andesitas muy alteradas y presencia de epidota

2.3 Definición de morfologías kársticas y determinación de geodiversidad intrínseca en el área de estudio

Una vez delimitada el área de estudio (zona kárstica) dentro del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, se seleccionaron seis sitios de observación, en el cual se realizaron las percepciones detalladas de las geoformas kársticas: Montelobos, El Sótano, Yutoto, Resumidero, Teposcolula y Perales (TABLA 2, FIGURA 3). Se procedió con la realización de un mapeo geomorfológico selectivo, basado en la observación directa de las características de las morfologías kársticas del área (Lahe, 1985; Lugo Hubp, 1988), empleando el método de mapeo geológico transversal, también conocido como perfilado geológico (Coe *et al.*, 2010), a través de caminos terciarios y senderos dentro del GMUMA. Cada estructura identificada fue

enlistada, documentada y descrita en función de sus condiciones y particularidades específicas, con el fin de contabilizar las morfologías para la determinación de la geodiversidad intrínseca.

Para definir y describir las morfologías kársticas, se consideró las estructuras de microescala geomorfológica, es decir aquellas formas cuyas dimensiones sean centimétricas, o de pocos metros. Las microescalas geomorfológicas se asocian a pequeñas escalas temporales, por ende, los eventos de menor rango temporal dan como evidencia morfologías más pequeñas en cuanto a tamaño (Fernández, 2007; Carvajal Perico, 2012; Rivases, 2017).

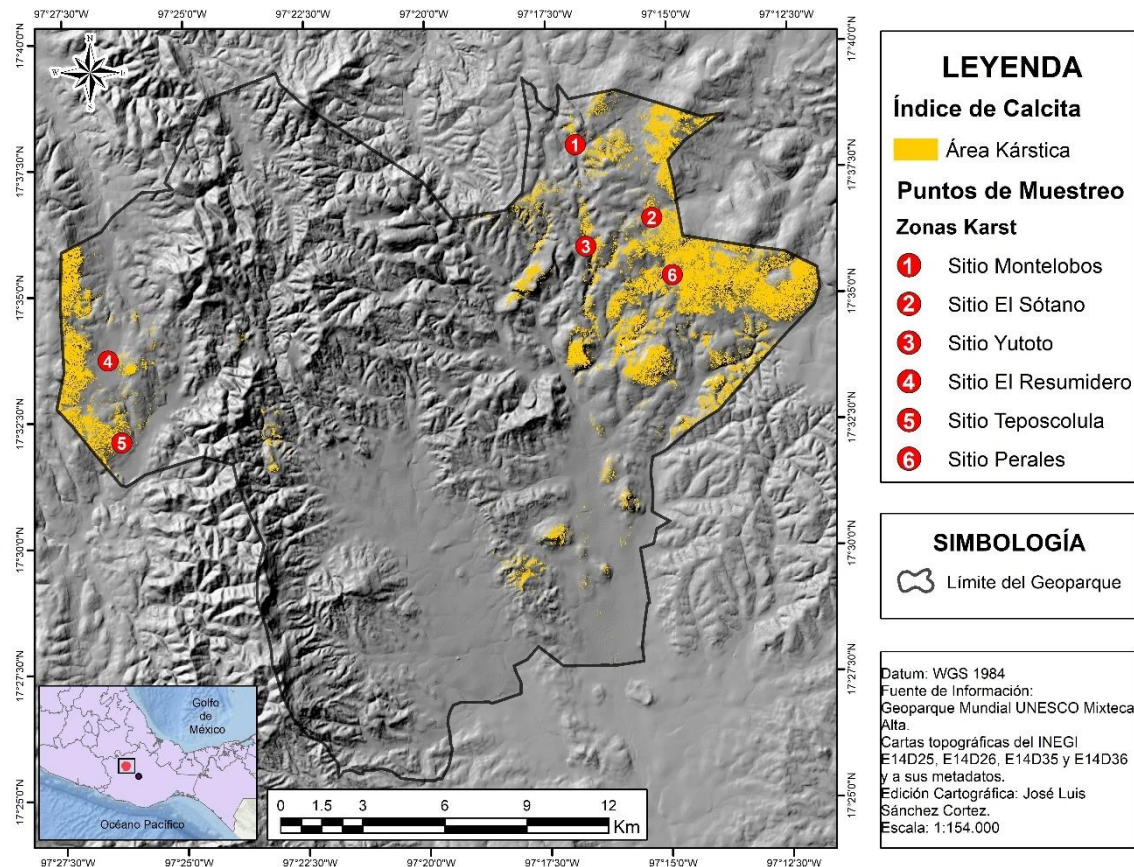


FIGURA 3. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de las morfologías kársticas y delimitación del área kárstica del GMUMA. Fuente: elaboración propia

TABLA 2. Principales características de los sitios de muestreo de las áreas kársticas del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Fuente: elaboración propia

NRO.	SITIOS	ALTITUD (msnm)	AREA (Ha)	LITOLOGÍA
1	Montelobos	2.440	4,3	Calizas de la formación Teposcolula
2	El Sótano	2.487	4,59	Calizas de la formación Teposcolula
3	Yutoto	2.400	5,3	Calizas de la formación Teposcolula
4	Resumidero	2.338	4,88	Calizas de la formación Teposcolula
5	Teposcolula	2.301	3,23	Calizas de la formación Teposcolula
6	Perales	2.452	4,47	Calizas de la formación Teposcolula

Se generó una evaluación de la geodiversidad intrínseca en los seis sitios kársticos estudiados, a partir de la determinación del número total de entidades morfológicas observadas dentro de un área específica, según la ecuación (2), (Carcavilla, 2006; Carcavilla *et al.*, 2007). Siendo que, a mayor cantidad de morfologías kársticas observadas en una unidad de superficie, se estableció como un área más diversa

(Kubalíková *et al.*, 2023; Najwer *et al.*, 2023; Nieto, 2023). Se llevó a cabo una evaluación de la geodiversidad intrínseca y la presencia de formas kársticas con el propósito de identificar zonas con una mayor diversidad. La hectárea fue la unidad de área considerada para este estudio, considerando el tamaño relativamente pequeño de las parcelas o sitios de observación.

$$GI = M / A$$

(2)

Donde:

GI: Geodiversidad Intrínseca

M: número de morfologías

A: área.

3. Resultados y discusión

3.1 Determinación de las morfologías kársticas del GMUMA

Tal como se observa en la FIGURA 3, la distribución de las rocas calcáreas del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta tiene una preferente ubicación hacia el este y, en menor grado, hacia el oeste. Las áreas que albergan estas rocas solubles mantienen una notable diversidad de formaciones kársticas. Considerando sus condiciones, los sitios de muestreo incluidos en este estudio presentan diversos servicios ambientales y potencial turístico, considerando que sitios como Yutoto y El Sótano forman parte del Geosendero Yutoto, utilizado para prácticas académicas y lúdicas. Cabe destacar que las observaciones se realizaron en geosenderos, caminos comunitarios y puntos de observación

utilizados habitualmente por los guías locales del GMUMA. Si bien es cierto, las observaciones han sido realizadas en sitios puntuales, sugiriendo que la presencia de morfologías podría ser mucho mayor a las reportadas en este trabajo, al igual que la diversidad de estos.

Se identificaron diversas morfologías kársticas a microescalas en los sitios de Montelobos, El Sótano, Yutoto, Resumidero, Teposcolula y Perales (TABLAS 3 a la 8; FIGURAS 4 a la 9), en las cuales se reportaron un total de 51 tipos distintos observados durante la recolección de datos. La distribución porcentual de estas morfologías fue del 11,76% en Montelobos, 25,49% para El Sótano, 13,72% Yutoto, 17,65% en el Resumidero, y 15,69% tanto para Teposcolula, como para el sitio Perales. Es importante puntualizar que el mismo tipo de morfología pudo haber sido registrado en más de un sitio, contabilizándose en cada lugar de muestreo en el que aparezca. Además, no se contabilizó la cantidad de elementos pertenecientes a un mismo tipo, es decir, si se observaron 5 morfologías similares en un sitio, todas se consideraron como una única categoría.

TABLA 3. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio Montelobos. Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro (en este sitio, las estructuras no superan el centímetro). Suceden en las terrazas de corrosión, y pueden tener formas semicirculares
Terrazas de corrosión (<i>Corrosion Terraces</i>)	Morfologías horizontales y subhorizontales que afloran en roca desnuda, y aparecen ampliamente distribuidas en este sector. Sobre estas estructuras se desprenden el <i>rillenkarren</i> , <i>kluftkarren</i> , <i>trittkarren</i> , entre otros
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas formas de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Aparecen en paredes de rocas con altas pendientes. En este sector se observan estructuras centimétricas, que no exceden 50 cm
Estructuras meandriiformes (<i>Meanderkarren</i>)	Tipologías de disolución angostas y alargadas (no mayores de 5 metros), en forma de canchales sinuosos
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas, aparecen en rocas fisuradas expuestas. Son frecuentes en paredes de roca con poca pendiente
Estructuras de huellas o pisadas (<i>Trittkarren</i>)	Estructuras con forma de pisadas, con un diámetro promedio de entre 3 y 5 cm en este sector. Aparecen en superficies con ángulos subhorizontales

TABLA 4. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio El Sótano.
Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Pilares de roca (Pináculos)	Pequeña área con pináculos de rocas calizas enterrados y semienterrados. La altura de los pilares no sobrepasa los 5 metros de altura
Oquedades menores	Son pequeños agujeros ovalados verticales alojados en los pináculos de roca. No superan los 30 cm en sus diámetros mayores
Fisuras de cuevas	Fisuras por disolución expuestas en cantera de rocas ornamentales. Las fisuras exponen el proceso de formación incipiente de estructuras cavernarias, con un ancho promedio de 30 cm, su longitud varía de acuerdo con el tamaño del corte de la cantera, no obstante, algunas fisuras horizontales pueden llegar a una decena de metros
Pavimento kárstico (<i>Limestone pavements</i>)	Estructuras planas horizontales con un conjunto de fisuras que se generan por efecto de la disolución. Su extensión es variable, pero no superan la decena de metros
Canales (<i>Channels</i>)	Estructuras para transporte de agua de lluvia. Son suavizadas y siguen la pendiente. En Yutoto se observan estas estructuras con diferentes longitudes y ancho, pero no exceden los 5 m y 30 cm respectivamente
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro. En el sitio El Sótano no exceden los 3 cm. Se encuentran en las partes altas de las lapiaces y en el pavimento kárstico
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas formas de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Se observan en las paredes de rocas con altas pendientes. En este sector se observan estructuras centimétricas, que no exceden 50 cm
<i>Kamenitza</i>	Pequeñas cavidades en forma de olla, caracterizadas por sus formas cerradas, que se desarrollan por una mezcla de procesos de disolución y fricción. En el sitio El Sótano la dimensión de estas estructuras es variable y pueden promediar 15 cm diámetro
Estructuras meandriiformes (<i>Meanderkarren</i>)	Tipologías de disolución que forman canales con estructuras sinuosas, angostas y alargadas. En El Sótano, existen canales de diversos tamaños completos e incompletos, con promedio de longitud que no exceden los 5 m
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas que aparecen en rocas fisuradas y expuestas. Son frecuentes en paredes de roca con poca pendiente, con diferentes longitudes
Karren del subsuelo (<i>subsoil karren</i>)	Estructuras que se desarrollan durante el periodo de enterramiento de las formas kársticas. Generan formas contrastantes y relativamente suavizadas en las rocas
Dolina de colapso (<i>Collapse doline</i>)	Gran estructura cuya presencia da nombre a este sitio (El Sótano). Se forma de manera repentina, debido a la caída de materiales desde el techo de una cavidad, el techo de la cavidad colapsa sobre el vacío subyacente. El sótano es una estructura de 20 metros de diámetros aproximadamente, y posee una profundidad similar
Lapiaces	Estructuras pequeñas en altura (no mayores de 1 m), y mayor desarrollo horizontal (hay estructuras de hasta 5 metros), separada por surcos y depósitos de suelo



FIGURA 4. Sitio Montelobos. **a.** Pozos de lluvia (*Rainpits*) inferiores a 1 cm, distribuidos en toda la muestra. **b.** Estructuras meandriformes (*Meanderkarren*), junto a una terraza de corrosión. **c.** Canales de disolución en algunas fracturas de roca (*Kluftkarren*), estos canales tienen un ancho promedio de 10 cm, y una extensión no mayor de 5 metros. **d.** Pequeños surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*), en etapa temprana, sobre la terraza de corrosión. **e.** Terraza de disolución (1) y surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*) (2). **f.** Estructuras de huellas o pisadas (*Trittkarren*), con formas subredondeadas que no superan los 5 cm de diámetro. Fuente: elaboración propia

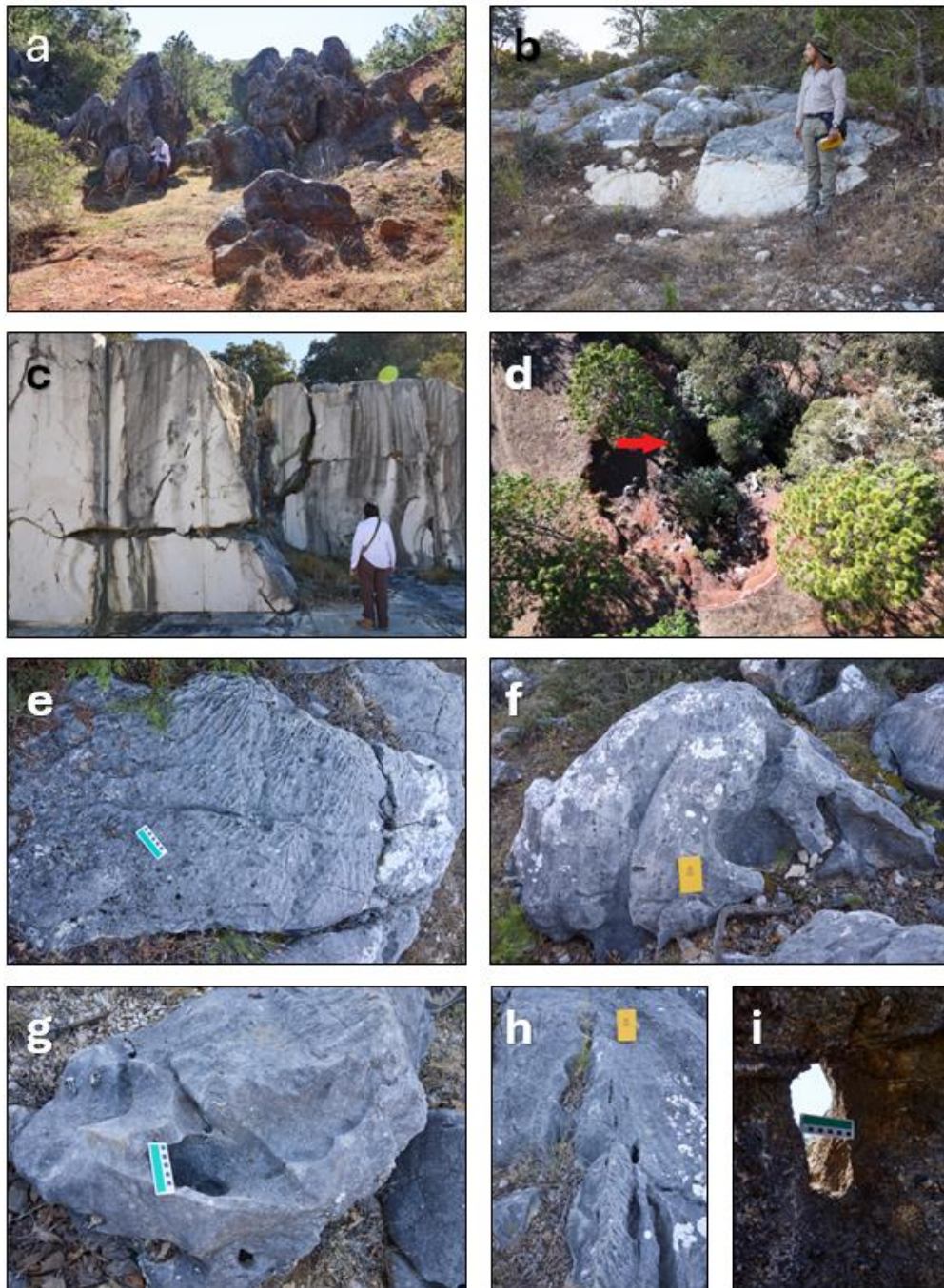


FIGURA 5. Sitio El Sótano. a) Pináculos en sitio El Sótano.

- b) morfologías de karren del subsuelo, nótese el contraste de tonalidades entre las morfologías de origen subaéreas y del subsuelo.
- c) Fisuras en las rocas calizas por acción de disolución, las cuales afloran justo en los cortes de una cantera de caliza. d) Dolina de Colapso. La flecha roja indica la ubicación del colapso denominado El Sótano.
- e) Surcos agudos (*Rillenkarren*) y Pozos de lluvia (*Rainpits*).
- f) Lapiaz con estructuras de canales (*Channels*), Surcos agudos (*Rillenkarren*) y Pozos de lluvia (*Rainpits*).
- g) *Kamenitzas* y estructuras meandriiformes (*Meanderkarren*).
- h) Canales de disolución en grietas (*Kluftkarren*) poco profundas.
- i) Oquedad menor, posada de forma horizontal en un pináculo de roca. Fuente: elaboración propia

TABLA 5. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio Yutoto.
Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas, aparecen en rocas fisuradas expuestas. Aparecen en las paredes de roca con poca pendiente. Promedian una longitud no mayor de 2 m
Estructuras de huellas o pisadas (<i>Trittkarren</i>)	Estructuras con forma de pisadas. En este sector se observan estructuras más grandes que bordean 1 m, y se encuentran en estado inicial de desarrollo
Lapiaces	Estructuras pequeñas en altura (no mayores de 1 m), y mayor desarrollo horizontal (hay estructuras de hasta 5 metros), separada por surcos y depósitos de suelo
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas formas de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Aparecen en paredes de rocas con altas pendientes. En este sector se observan estructuras centimétricas, muy profundas y más alargadas
Canales (<i>Channels</i>)	Estructuras para transporte de agua de lluvia. Son suavizadas y siguen la pendiente. En Yutoto se observan estas estructuras con diferentes longitudes y ancho, pero no exceden los 5 m y 30 cm respectivamente
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro En Yutoto no exceden los 2 cm). Se encuentran en las partes altas de los lapiaces
<i>Kamenitza</i>	Pequeñas cavidades en forma de olla, caracterizadas por sus formas cerradas, que se desarrollan por una mezcla de procesos de disolución y fricción. En Yutoto no exceden los 5 cm de diámetro



FIGURA 6. Sitio Yutoto. a) Pozos de lluvia (*Rainpits*) inferiores a 2 cm, y canales de drenaje suavizados, siguiendo la pendiente de la roca.
b) Canales de disolución en fracturas de roca (*Kluftkarren*), con un ancho promedio de entre 5 y 10 cm, y una extensión no mayor de 2 metros.
c) Lapiaz en forma de domo, cuyas extensiones no superan los 5 m. Se observan canales para drenaje.
d) *Kamenitza* subredondeada con diámetro máximo de 20 cm.
e) Lapiaz con canales de drenaje suavizados y Pozos de lluvia (*Rainpits*). Fuente: elaboración propia

TABLA 6. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio Resumidero.
Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Estructuras por alteración biológica (<i>Biokarst</i>)	Estructuras de meteorización generadas por actividades biológicas sobre las rocas, principalmente plantas y microorganismos. Estas estructuras se sienten muy filosas y punzantes al tacto
Lapiaces	Estructuras pequeñas que no sobrepasan el metro de altura, y 2 metros de desarrollo horizontal. Se encuentran enterrados bajo gruesas capas de suelo
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas que aparecen en rocas fisuradas y expuestas. Son frecuentes en paredes de roca con poca pendiente, poseen diferentes longitudes
Karren del subsuelo (<i>subsoil karren</i>)	Estructuras que se desarrollan durante el periodo de enterramiento de las formas kársticas. Generan formas contrastantes, relativamente suavizadas en las rocas
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro. En el sitio Resumidero no exceden los 3 cm. Se encuentran en los lapiaces principalmente
Perfiles de Terra rosa	En el sitio Resumidero se encuentran perfiles de suelo de Terra rosa, el cual corresponde a un tipo de suelo que posee minerales no solubles en agua, generados a partir de la meteorización de las rocas calcáreas
Dolina de colapso (<i>Collapse doline</i>)	Estructura de aproximadamente 10 metros de diámetro y 15 metros de profundidad, ubicada dentro de un campo agrícola. La dolina se genera a partir de la caída de materiales desde el techo de una cavidad, el techo de la cavidad colapsa sobre el vacío subyacente
<i>Kamenitza</i>	Pequeñas cavidades redondeadas y cerradas, en forma de olla. Se caracterizan por su génesis, la cual contempla una mezcla de procesos de disolución y fricción. En el sitio Resumidero los <i>kamenitzas</i> pueden variar de entre 10 y 20 cm de diámetro, y se encuentran rellenos de suelo y plantas
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas estructuras de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Se observan de forma escasa en las paredes de rocas. En Resumidero se observan estructuras centimétricas no mayores de 30 cm

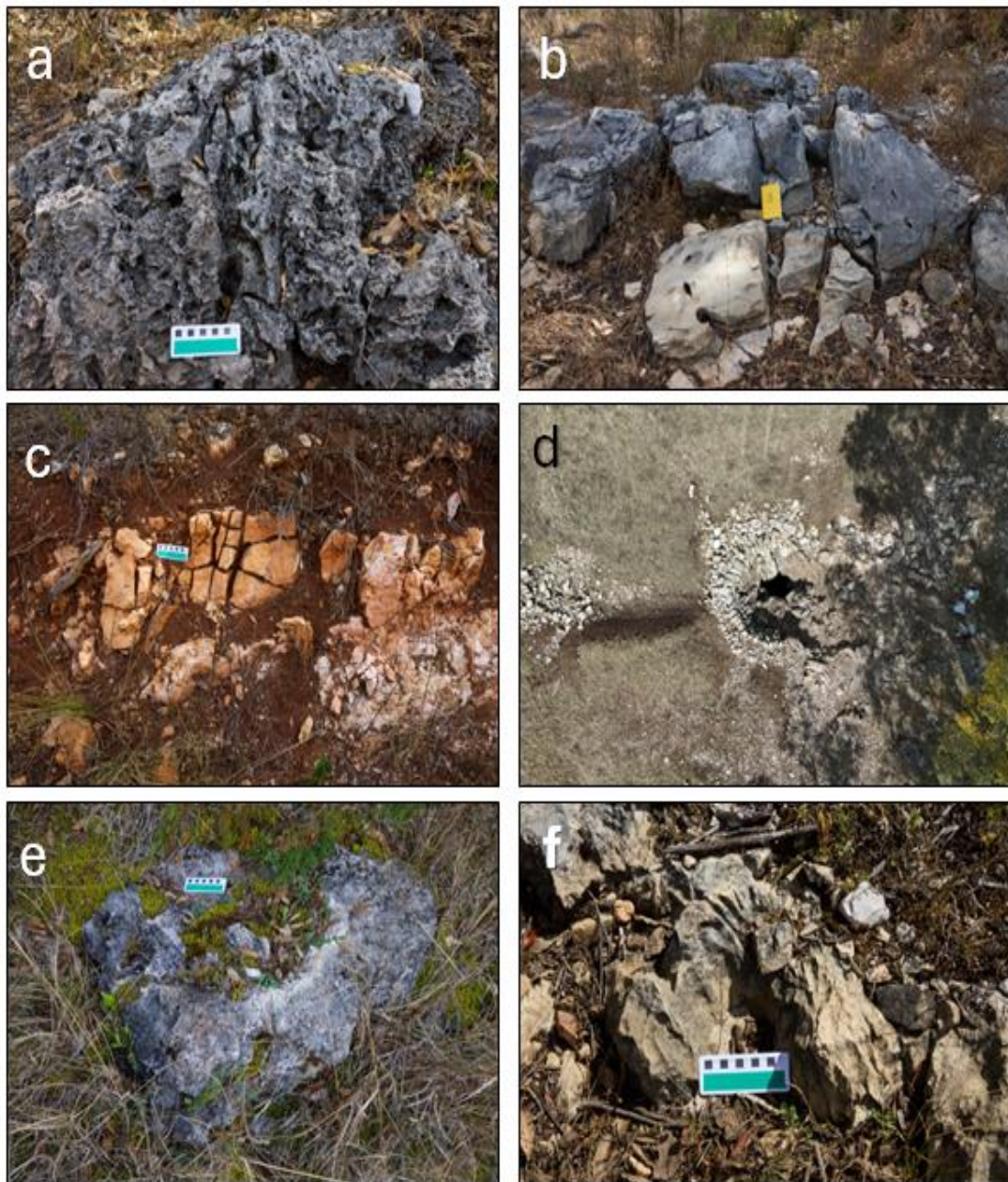


FIGURA 7. Sitio Resumidero. **a)** Estructuras de meteorización generadas por actividades biológicas (*biokarst*), principalmente plantas y microorganismos.
b) Canales de disolución en algunas fracturas de roca (*Kluftkarren*), tienen un ancho promedio de 10 cm.
c) Perfil de suelo tipo terra rosa, sobre rocas calizas.
d) Dolina de Colapso, agujero de 15 metros de profundidad.
e) *Kamenitza* de 20 cm de diámetro rellena con suelo y plantas.
f) Pequeños surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*), sobre un lapiaz. Fuente: elaboración propia

TABLA 7. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio Teposcolula.
Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas estructuras de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Se observan en las paredes de rocas, siguiendo la pendiente. En el sitio Teposcolula se observan estructuras centimétricas no mayores de 30 cm
Estructuras de huellas o pisadas (<i>Trittkarren</i>)	Estructuras con forma de pisadas, con un diámetro promedio de 5 cm en este sector. Aparecen en superficies con ángulos subhorizontales
<i>Kamenitza</i>	Cavidades pequeñas redondeadas y cerradas, en forma de olla. Se caracterizan por su génesis, la cual contempla una mezcla de procesos de disolución y fricción. En el sitio Teposcolula los <i>kamenitzas</i> pueden tener entre 10 y 20 cm de diámetro
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas que aparecen en rocas fisuradas y expuestas. Son frecuentes en paredes de roca con poca pendiente, poseen diferentes longitudes
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro. En el sitio Teposcolula no exceden el centímetro de diámetro. Se encuentran sobre el pavimento kárstico
Canales (<i>Channels</i>)	Estructuras para transporte de agua de lluvia. Son suavizadas y siguen la pendiente. En Teposcolula se observan estas estructuras son pequeñas, cercanas a 1 m
Pavimento kárstico (<i>Limestone pavements</i>)	Estructuras planas horizontales con un conjunto de fisuras que se generan por efecto de la disolución. El sitio Teposcolula se encuentra en un amplio sector de pavimento kárstico, cercano a los 100 metros cuadrados
Estructuras meandriformes (<i>Meanderkarren</i>)	Tipologías de disolución que forman canales con estructuras sinuosas, angostas y alargadas

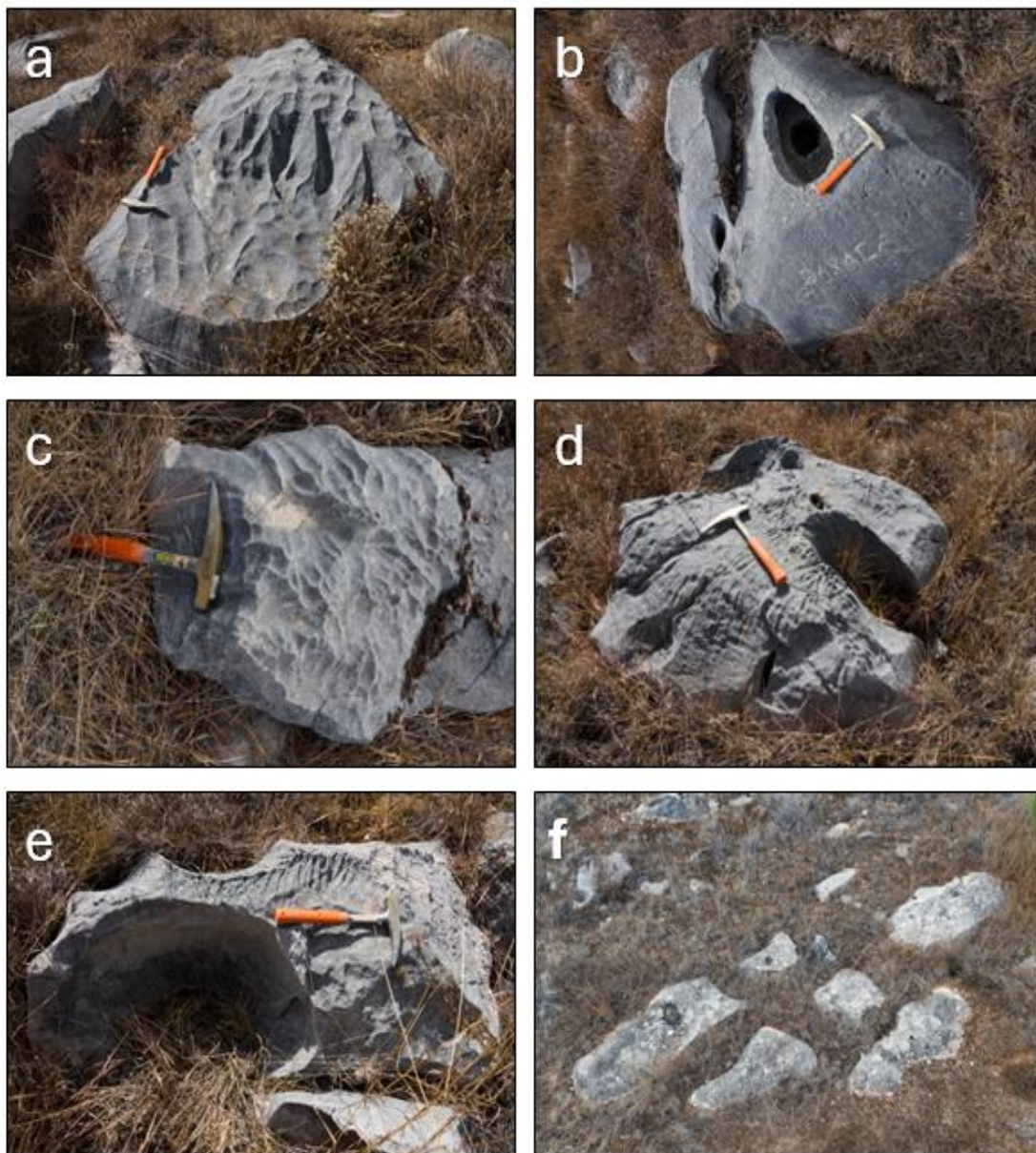


FIGURA 8. Sitio Teposcolula. **a)** Pequeños surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*), y en la zona superior estructuras de huellas o pisadas (*Trittkarren*), sobre el pavimento kárstico.

b) *Kamenitza* subredondeada con diámetro máximo de 30 cm, junto a un canal de disolución en fractura de roca (*Kluftkarren*).

c) Surcos de disolución (*Trittkarren*) y pequeños pozos de lluvia (*Rainpits*).

d) Canales (*channels*), surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*) y pozos de lluvia (*Rainpits*).

e) Estructuras sinuosas incompletas (*Meanderkarren*), junto con surcos de disolución (*Trittkarren*) en la parte superior.

f) Pequeña toma de parte del pavimento kárstico del sitio Teposcolula.

Fuente: elaboración propia

TABLA 8. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en el sitio Perales.
Fuente: elaboración propia

MORFOLOGÍA KÁRSTICA	DESCRIPCIÓN
Pavimento kárstico (<i>Limestone pavements</i>)	Estructuras planas horizontales con un conjunto de fisuras que se generan por efecto de la disolución. El sitio Perales comprende varias áreas pequeñas de pavimento kárstico, que no superan los 50 metros cuadrados
Surcos agudos (<i>Rillenkarren</i>)	Pequeñas estructuras de disolución, con formas acanaladas, poco profundas y paralelas entre sí. Se observan en las paredes de rocas, siguiendo la pendiente. En el sitio Perales se observan estructuras centimétricas no mayores de 50 cm
Pozos de lluvia (<i>Rainpits</i>)	Pequeñas depresiones de pocos centímetros de diámetro. En el sitio Perales no exceden de 2 cm de diámetro. Se encuentran sobre el pavimento kárstico
<i>Kamenitza</i>	Cavidades pequeñas redondeadas y cerradas, en forma de olla. En el sitio Perales, estas estructuras no sobre pasan los 30 cm de diámetro, y se encuentran rellenos con sedimentos y plantas
Canales (<i>Channels</i>)	Estructuras para transporte de agua de lluvia. Son suavizadas y siguen la pendiente. En Perales estas estructuras son minúsculas, alcanzando valores centimétricos
Canales de disolución en grietas (<i>Kluftkarren</i>)	Estructuras en forma de grietas que aparecen en rocas fisuradas y expuestas. Se encuentran sobre el pavimento kárstico, con longitudes no mayores de 3 metros, 50 cm de ancho
Karren del subsuelo (<i>subsoil karren</i>)	Estructuras que se desarrollan durante el periodo de enterramiento de las formas kársticas. Generan formas contrastantes y relativamente suavizadas en las rocas



FIGURA 9. Sitio Perales. a) Segmento del pavimento kárstico del sitio Perales. Pináculos en sitio El Sótano.

b) Surcos agudos de disolución (*Rillenkarren*), y en la zona superior estructuras de huellas o pisadas (*Trittkarren*), sobre el pavimento kárstico.

c) *Kamenitza* subredondeada con diámetro máximo de 30 cm, hacia la parte superior de la imagen se observan pequeños canales (*channels*) y *rillenkarren*.

d) Fracturas de disolución en la roca (*Kluftkarren*), formando parte del pavimento kárstico, nótese el contraste de colores en la roca, lo cual está vinculado con morfologías de karren generadas en el subsuelo.

Fuente: elaboración propia

Durante la observación de las morfologías kársticas, se identificaron diversas particularidades y rasgos específicos del karst, y de manera general, se pudo constatar el limitado desarrollo de los sistemas kársticos en el área de estudio, basado en la clasificación que sugieren Waltham y Fookes (2003), lo cual sugiere la presencia de configuraciones evolutivas juveniles o jóvenes. Los sistemas kársticos experimentan una evolución que va desde etapas juveniles hasta fases maduras y seniles. Y estos procesos de madurez del karst, pueden estar relacionados con factores climáticos, siendo las zonas tropicales húmedas, más propicias que las zonas frías y secas (Palmer, 2012).

Durante los procesos previos de prospección, se pudo observar que las estructuras kársticas presentes en el área de trabajo se limitaron en un rango de longitud de decenas de centímetros a pocos metros, por lo cual se consideró centrar la búsqueda de morfología de este inventario, a microescala. Si se estima que las dimensiones espaciales están estrechamente relacionadas con las escalas temporales, la abundante presencia de morfologías de microescala confirma el carácter juvenil y joven de estos sistemas kársticos (Fookes y Hawkins, 1988). El limitado proceso evolutivo de los sistemas puede influir en la distribución de la diversidad morfológica (Sánchez-Cortez, 2024).

La presencia de materiales enterrados fue un factor común en todos los sitios estudiados, mostrando algunos depósitos de *terra rossa*, principalmente en el Resumidero. El enterramiento de las morfologías da paso a la formación de otros rasgos en el subsuelo, siendo exhumados por acción de los fenómenos erosivos locales. La morfogénesis kárstica se atribuye a factores físicos, químicos y biológicos en conjunto, no obstante, algún factor puede ser más funcional que otro, influenciado por las condiciones ambientales existentes (Febles-González *et al.*, 2021). Las marcas de enterramiento se asocian con formas típicas de erosión química, ya que el suelo puede ejercer intemperismo más activo, debido a sus altos niveles de acidez, incluso más altos que los niveles de acidez del agua. El biokarst y las bioturbaciones también marcan presencia en estos sitios, principalmente en Resumidero;

ocurre a consecuencia de la interacción biológica, ecológica y ambiental sobre la roca soluble (Ginés *et al.*, 2009). De igual forma, las estructuras endokársticas fueron casi inexistentes, tan solo los sitios El Sótano y Resumidero evidenciaron este tipo de elementos (dolinas de colapso).

3.2 Distribución de la geodiversidad intrínseca de las morfologías kársticas en el GMUMA

De acuerdo con Gray (2008, 2013), la geodiversidad se define como la variedad de procesos y características geológicas, geomorfológicas y edafológicas, así como ciertos fenómenos hidrológicos; además, posee valores excepcionales que pueden ser aprovechados por la sociedad (energía, turismo, ciencia, servicios ambientales). Al igual que en el caso de la biodiversidad, el estudio de la geodiversidad y sus diversas aplicaciones, promueven la gestión más eficiente de los recursos naturales, basado en su valor intrínseco o de existencia, considerando que todo elemento posee un valor al ser útil para el ser humano o al brindar servicios a la sociedad (Brilha, 2016).

La geodiversidad hace referencia a la cantidad y variedad de estructuras que conforman el sustrato de una región, incluyendo materiales sedimentarios, tectónicos, minerales, rocas, fósiles y suelos, sobre los cuales se desarrolla la actividad orgánica (Rojas López, 2005). El estudio de la geodiversidad se ha mostrado un tanto complejo, priorizando aspectos generales de la geología, tales como las unidades litológicas, la geomorfología y los suelos (Pereira *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2017; Carrión-Mero *et al.*, 2022); en este sentido, la diversidad kárstica involucra variables sincrónicas que coinciden con la evaluación de la distribución de la diversidad en un territorio.

La TABLA 9 presenta un resumen del número total de las morfologías observadas en cada uno de los sitios de muestreo, puntualizando que la tabla muestra las variables sobre los tipos o grupos de morfologías observadas, no se consideraron el número de ocurrencias del mismo tipo de morfologías, es decir, si se observan 10 *kamenitzas*, todas serán contabilizadas como uno. El área corresponde al valor total de las hectáreas de cada uno de

los sitios, y la geodiversidad intrínseca se obtiene aplicando la ecuación correspondiente. Al tenor de los resultados visualizados, los sitios El Sótano y Teposcolula muestran valores representativos con relación a las otras zonas. A pesar de que el sitio Resumidero tuvo un mayor número de morfologías inventariadas, la relación con el espacio del espacio no fue favorable, debido a la mayor superficie de distribución.

TABLA 9. Principales morfologías kársticas identificadas y descritas en los sitios de muestreo.

Fuente: elaboración propia

SITIO	TIPO DE MORFOLOGÍAS (M)	AREA EN Ha (A)	GEODIVERSIDAD INTRÍNSECA (IG = M/A)
Montelobos	6	4,3	1,40
El Sótano	13	4,59	2,83
Yutoto	7	5,3	1,32
Resumidero	9	4,88	1,84
Teposcolula	8	3,23	2,48
Perales	8	4,47	1,79

En la FIGURA 10 se aprecia la distribución de las áreas de geodiversidad intrínseca, a partir de la interpolación de las valoraciones obtenidas en cada sitio de muestreo, resaltando en tonalidad roja aquellos sitios con mayor valor relativo.

Es necesario puntualizar que todos los sitios poseen el mismo sustrato geológico: Formación

Teposcolula (FIGURA 1 y TABLA 1), por ende, las variables específicas que permitieron o dieron paso a la formación de las morfologías observadas, probablemente obedecen a factores particulares de para cada área en específico.

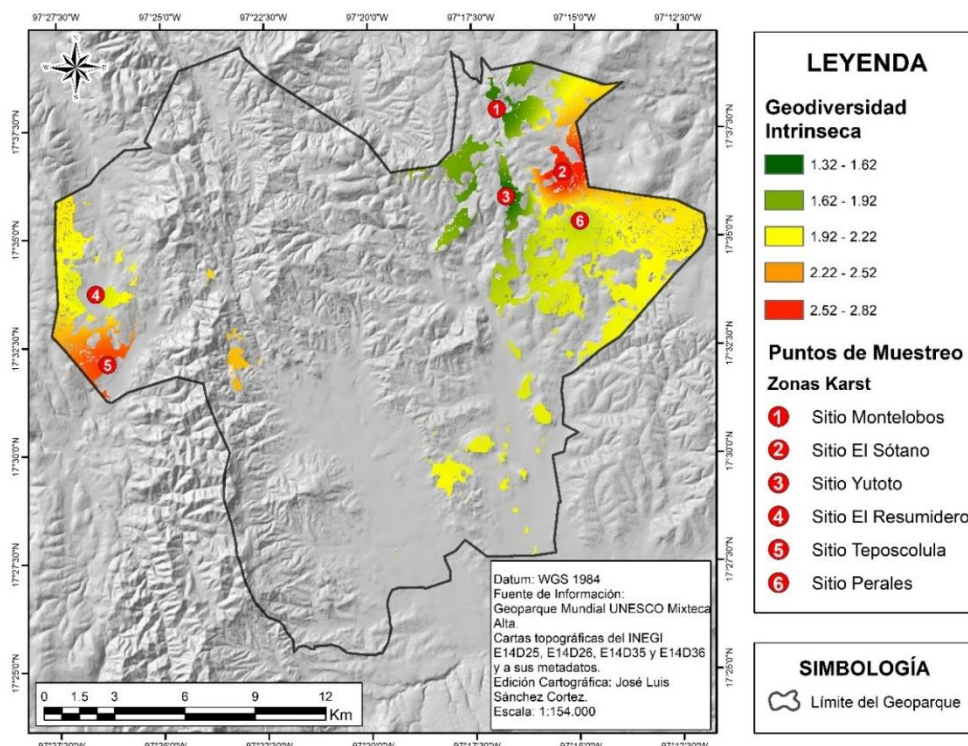


FIGURA 10. Mapa de geodiversidad intrínseca de las áreas kársticas, ubicadas en el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta. Fuente: elaboración propia

4. Conclusiones

Considerando que los Geoparques UNESCO son territorios destinados a promover procesos de conservación participativa, y en los cuales destaca su geopatrimonio, como elemento diferenciador de la geodiversidad, el presente estudio analítico de la distribución de estructuras kársticas a microescala espacial ha cumplido con el rol de visualizar como se exhibe la diversidad y heterogeneidad geológica y geomorfológica dentro de un área específica. Si bien es cierto, los valores de geodiversidad intrínseca no representan valoraciones absolutas, sino más bien patrones relativos entre cada área de muestreo, no obstante, estos parámetros proporcionan un referente de la variedad de procesos y formas existentes en áreas relativamente pequeñas.

Es importante resaltar que los valores estéticos de este tipo de morfologías representan un importante agregado al divulgar los procesos de modelado kárstico, lo cual está relacionado con el uso lúdico y

recreativo que se les otorga a estos sistemas, siendo un valioso atractivo para el geoturismo. Sin embargo, este tipo de evaluaciones no forman parte de esta investigación, aunque abren la posibilidad de su aplicación para futuros trabajos.

Sin lugar a duda, la caracterización y descripción de estas morfologías kársticas se consideran valiosas herramientas en el ámbito de desarrollar procesos geoeducativos, a partir del conocimiento de los eventos geológicos y geomorfológicos que generan el karst y sus formas, fortaleciendo el conocimiento sobre la geodiversidad y su potencial conservación. De igual forma, el uso de las dimensiones espaciotemporales y su aplicación didáctica en las rocas calizas del Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, brindan la oportunidad de comprender los sucesos climáticos, ecológicos y ambientales, que alteran los sustratos geológicos en diferentes escalas.

5. Agradecimientos

Los autores extienden su agradecimiento a las comunidades locales que conforman el Geoparque Mundial UNESCO Mixteca Alta, por el apoyo brindado en el presente trabajo, especialmente a las autoridades municipales y agrarias de los municipios de San Juan Teposcolula, San Bartolo Soyaltepec, San Juan Yucuita y Santa María Chachoapam, y de las Agencias Municipales de San Agustín Montelobos, Guadalupe Gavillera y San Isidro Tejocotal.

6. Referencias citadas

- ANDREU, J. M.; CALAFORRA, J. M.; CAÑAVERAS, J. C.; CUEZVA, S.; DURÁN, J. J.; GARAY, P... & S. SÁNCHEZ-MORAL 2016. "Karst: un concepto muy diverso". *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 24(1): 6-20.
- ANDREYCHOUK, V. 2016. "The system nature of karst landscape and principles of cave protection resulting from it". *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 60(2): 257-291. Disponible en: [DOI:10.1127/zfg_suppl/2016/00300](https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/00300).
- ASSAAD, F. A. & P. E. LAMOREAUX. 2004. "Geology of indurated rocks, unconsolidated sedimentary deposits and karst terrains". En: T. H. HUGHES (Ed), *Field Methods for Geologists and Hydrogeologists*. Springer, Berlin, Heidelberg. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05438-3_2.
- BAGHERI, M.; ASHJA-ARDALAN, A.; GANGI, A.; HAKIMI ASIABAR, S. & M. ALI ARIAN. 2021. "Lithological Mapping and Identification of Argillic and Propylitic Alteration Zones at Anjerd Volcanic Terrain". *Revista Geoaraguaia*, 11(1): 28-54.
- BAHTIJAREVIC, A. 1996. *Karst Landforms in Florida: Geomorphological Analysis*. University of South Florida. Thesis.

- BRILHA, J. 2016. "Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review". *Geoheritage*, 8: 119-134. Disponible en: DOI: [10.1007/s12371-014-0139-3](https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3).
- CARCAVILLA, L. 2006. *Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos*. Universidad de Madrid, España. Tesis Doctoral..
- CARCAVILLA, L.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. y J. J. DURÁN. 2007. *Patrimonio geológico y geodiversidad: Investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos*. IGME, Madrid, España.
- CARRASCO-VELÁZQUEZ, B. E.; MORALES-PUENTE, P.; CIENFUEGOS-ALVARADO, E. y R. LOZANO- SANTACRUZ. 2004. "Geoquímica de las rocas asociadas al paleokarst cretácico en la plataforma de Actopan: evolución paleohidrológica". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3): 382-396.
- CARRIÓN-MERO, P.; DUEÑAS-TOVAR, J.; JAYA-MONTALVO, M.; BERREZUETA, E. & N. JIMÉNEZ-ORELLANA. 2022. "Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study". *Environmental Science & Policy*, 136: 167-186. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.06.009>.
- CARVAJAL PERICO, J. H. 2012. "Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia". *Colección Guías y Manuales, Servicio Geológico Colombiano*. Bogotá, Colombia.
- CIGNA, A. & P. FORTI. 2013. "Caves: The most important geotouristic feature in the world". *Tourism and karst areas*, 6(1): 9-22.
- COE, A. 2010. *Geological field techniques*. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. London, UK.
- DE BOER, D. H. 1992. "Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review". *Geomorphology*, 4(5): 303-318. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(92\)90026-K](https://doi.org/10.1016/0169-555X(92)90026-K).
- DE WAELE, J. 2017. "Karst Processes and Landforms". En: D. RICHARDSON, N. CASTREE, M. F. GOODCHILD, A. KOBAYASHI, W. LIU, & R. A. MARSTON. (Eds), *The International Encyclopedia of Geography*. John Wiley & Sons, Hoboken. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0968>.
- DUBOIS, C.; BINI, A. & Y. QUINIF. 2022. "Karst morphologies and ghostrock karstification". *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 28(1). Disponible en: <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.16327>.
- FEBLES-GONZÁLEZ, J. M.; FEBLES-DÍAZ, J. M.; BRASIL DO AMARAL-SOBRINHO, N. M.; ZONTA, E. y A. V. MAURA-SANTIAGO. 2021. "Avance de los procesos kárstico-erosivos de los suelos en el polje San José de las Lajas". *Cultivos Tropicales*, 42(4): e07.
- FERNÁNDEZ, V. R. 2007. *Algunas consideraciones acerca de la escala geográfica y en geomorfología*. Centro de Geociencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería, pp. 45-56. Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina.

- FOOKES, P. G. & A. B. HAWKINS. 1988. "Limestone weathering: Its engineering significance and a proposed classification scheme". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21: 7-31.
- FORD, D. C. & P. WILLIAMS. 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, UK.
- GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & W. DREYBRODT. 2009 (Eds). *Karst rock features: Karren sculpturing*. Založba ZRC/ZRC Publishing, Ljubljana.
- GRAY, M. 2013. *Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature*. (2nd ed.). Wiley-Blackwell, Chichester. UK.
- GRAY, M. 2008. "Geodiversity: developing the paradigm". *Proceedings of the Geological Association*, 119: 287-298. Disponible en: [doi:10.1016/S0016-7878\(08\)80307-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(08)80307-0).
- HARTZ, D.; PRASHAD, L.; HEDQUIST, B.; GOLDEN, J. & A. BRAZEL. 2006. "Linking satellite images and hand-held infrared thermography to observed neighborhood climate conditions". *Remote Sensing of Environment*, 104(02): 190-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.12.019>.
- HERAK, M. 1990. "Geotectonics, karst morphology, and environmental problems". *Environ. Geol. Water Sci* 15: 59-60. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF01704882>.
- KUBALÍKOVÁ, L.; CORATZA, P.; PÁL, M.; ZWOLIŃSKI, Z.; IRAPTA, P. N. & B. VAN WYK DE VRIES. 2023. "Visages of geodiversity and geoheritage: a multidisciplinary approach to valuing, conserving and managing abiotic nature". En: L. KUBALÍKOVÁ; P. CORATZA; M. PÁL; Z. ZWOLIŃSKI; P. N. IRAPTA & B. VAN WYK DE VRIES (Eds.), *Visages of Geodiversity and Geoheritage*. Geological Society, London, Special Publications, 530: 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1144/SP530-2022-321>.
- LAHEE, F.H. 1985. *Geología Práctica*. Ed. Omega. España.
- LP DAAC. 2009. *ASTER User Advisory (updated: january 14, 2009)*. Disponible en: <https://lpdaac.usgs.gov/news/aster-user-advisory-updated-january-14-2009/> [Consulta: abril, 2024].
- LUGO HUBP, J. 1988. *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- MIXTECA ALTA ASPIRING GEOPARK. 2015. *Application dossier for the Global Geopark Network*. Oaxaca, México.
- NANNI, V.; PIANO, E.; CARDOSO, P.; ISAIA, M. & S. MAMMOLA. 2023. "An expert-based global assessment of threats and conservation measures for subterranean ecosystems". *Biological Conservation*, 283. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110136>.
- NAJWER, A.; REYNARD, E. & Z. ZWOLIŃSKI. 2023. "Geodiversity assessment for geomorphosites management: Derborence and Illgraben, Swiss Alps". En: L. KUBALÍKOVÁ; P. CORATZA; M. PÁL; Z. ZWOLIŃSKI; P. N. IRAPTA & B. VAN WYK DE VRIES (Eds.), *Visages of Geodiversity and Geoheritage*. Geological Society, London, Special Publications, 530: 89-106. Disponible en: <https://doi.org/10.1144/SP530-2022-122>.

- NIETO, L. M. 2023. "Geodiversity as a tool for the Nature Conservation. Current perspectives on applied geomorphology". *IntechOpen*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.109010>.
- NINOMIYA, Y. "2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data". *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites*, VII, 5234: 180-190. Disponible en: <https://doi.org/10.1117/12.511902>.
- NORTH, L. A. 2007. *Application and refinement of the karst disturbance index in west central, Florida*. University of South Florida Master's thesis.
- PALACIO-PRIETO, J. L.; ROSADO-GONZÁLEZ, E.; RAMÍREZ-MIGUEL, X.; OROPEZA-OROZCO, O.; CRAM-HEYDRICH, S.; ORTIZ-PÉREZ, M.A.; ... & G. FERNÁNDEZ DE CASTRO-MARTÍNEZ. 2016. "Erosion, culture and geoheritage; the case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México". *Geoheritage*, 8: 359-369. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0175-2>.
- PALMER, A. N. 2012. *Geología de Cuevas*. Dayton, Estados Unidos: Sociedad Espeleológica de Cuba, 502.
- PEREIRA, D. I.; PEREIRA, P.; BRILHA, J. & L. SANTOS. 2013. "Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach". *Environmental Management*, 52: 541-552. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>.
- PEREIRA, M. L.; ZANON, V.; FERNANDES, I.; PAPPALARDO, L. & F. VIVEIROS. 2024. "Hydrothermal alteration and physical and mechanical properties of rocks in a volcanic environment: A review". *Earth-Science Reviews*, (252). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104754>.
- PIANO, E.; MAMMOLA, S.; NICOLOSI, G. & M. ISAIA. 2024. "Advancing tourism sustainability in show caves". *Cell Reports Sustainability*, 1(3). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100057>.
- REINHART, H.; PUTRA, R. D. & M. R. RAFIDA. 2023. "Karst ecosystem services and their roles in the management of Gunung Sewu UNESCO global geopark". *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 7(3): 220-233. Disponible en: <https://doi.org/10.22515/sustinere.jes.v7i3.349>.
- RIVASES, J. 2017. *Geomorfología en la cabecera del vale de Río Esera, Benasque*. Degree in Geology. University of Zaragoza. 25. España.
- ROJAS LÓPEZ, J. R. 2005. "Los desafíos del estudio de la geodiversidad". *Revista Geográfica Venezolana*, 46(2): 143-152.
- SANCHEZ-CORTEZ, J. L.; VELEZ-MACIAS, K.; SIMBAÑA-TASIGUANO, M.; RODRIGUEZ-CALVOPIÑA, M.; FUENTES-CAMPUZANO, O. & C. FREIRE-GUERRERO. 2024. "Morphological characterization of karst geodiversity in Municipality of Archidona (Ecuador), Napo Sumaco Aspiring UNESCO Global Geopark". *Earth Sciences Research Journal*, 28(3): 305-323. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/esrj.v28n3.113933>.

- SANTAMARÍA-DÍAZ, A.; ALANIZ-ÁLVAREZ, S.A. y A. F. NIETO-SAMANIEGO. 2008. "Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3): 494-516.
- SANTOS, D. S.; MANSUR, K. L.; GONÇALVES, J. B.; ARRUDA JUNIOR, E. R. & F. C. MANOSSO. 2017. "Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in Armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil". *Applied Geography*, 85: 184-195. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.009>.
- SERRANO CAÑADAS, E. y P. RUIZ FLAÑO. 2007. "Geodiversity: concept, assessment and territorial application. The case of Tiermes-Caracena (Soria)". *Boletín de la A.G.E.*, 45: 389-393.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 2020. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance Product (AST_L1T)*. USGS EROS Data Center. Sioux Falls, Dakota del Sur, USA.
- VARGAS-GONZALES, C. 2013. "Identificación de depósitos utilizando el sensor Aster". *Geología Colombiana*, 38: 179-157.
- WALTHAM, A. C. & P. G. FOOKES. 2003. "Engineering classification of karst ground conditions". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 3(2): 101-118. Disponible en: <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2002-33>.
- WHITE, W. A. 1970. "The geomorphology of the Florida Peninsula". *Florida Bureau of Geology, Bulletin* 51:164.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Oaxaca de Juárez, México; mayo, 2025