Received: 10 Dec. 2022, Accepted: 24 Apr. 2023

Published online: 30 June 2023

**DOI:** https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2023.1.99 **Volume:** 7, **Issue:** 1, **Pages:** 1-17



## Mapa de distribución de geodiversidad de Quintana Roo, México, escala 1: 800,000<sup>☆</sup>

### Geodiversity distribution map of Quintana Roo, Mexico, scale 1: 800,000

Eduardo Domínguez-Herrera<sup>a</sup>, Laura Luna-González<sup>b</sup>, David Velázquez-Torres<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior s/n, CU, Coyoacán, 04510 CDMX, México <sup>b</sup>Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México <sup>c</sup>División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad de Quintana Roo, Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. Del Bosque, 77019, Chetumal, Quintana Roo, México

#### Resumen

Se presenta un mapa que muestra la distribución de la geodiversidad del estado de Quintana Roo (QR), México. Los objetivos generales de este trabajo son redefinir el concepto de geodiversidad, diseñar un método para calcular y clasificar la geodiversidad respondiendo directamente al concepto generado, aplicar el método en el caso de estudio QR y representar los resultados en un mapa. Este nuevo método, que integra métodos numéricos y análisis geográfico, se denominó Geodiversidad Ponderada (GdP). Se compiló principalmente información cartográfica a escala de 1:250,000. Se utilizaron algunos elementos específicos del método de análisis multicriterio del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), así como técnicas de análisis cartográfico de un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de ponderar, priorizar e integrar las características de la geodiversidad del área de interés y representarlas en un documento cartográfico. El resultado es un mapa a escala 1:800.000 con cinco clases (muy alta, alta, media, baja y muy baja) de geodiversidad del área de estudio. Este material puede servir a aquellos interesados en la legislación de QR y la conservación del medio ambiente.

Palabras clave: geodiversidad ponderada, proceso analítico jerárquico, análisis geográfico

#### **Abstract**

A map showing the distribution of geodiversity of the state of Quintana Roo (QR), Mexico, is presented. The general objectives of this work are to redefine the concept of geodiversity, to design a method to calculate geodiversity that responds directly to the redefined concept, to apply the method in the case study of QR, to represent the classified results on a map. A new method called Weighted Geodiversity (WGd) was applied, which is based on a specific definition of geodiversity and integrates numerical methods and geographical analysis. Cartographic information was compiled mainly at a scale of 1:250,000. Some elements of the multicriteria analysis method Hierarchical Analytical Process (AHP) were used, as well as cartographic analysis techniques in a geographic information system (GIS) to weight, prioritize and integrate the characteristics of the geodiversity of the area of interest and represent them in a cartographic document. The result was a 1:800,000 scale map with five classes (very high, high, medium, low, and very low) of geodiversity of the study area, material that can be used for those interested in QR legislation and environmental conservation.

**Keywords:** weighted geodiversity, analysis hierarchical process, geographical analysis

#### 1. Introducción

El tema de la geodiversidad de Quintana Roo (QR) ha sido brevemente estudiado. Una investigación antecedente es el trabajo de Fragoso-Servón, et al. (2014), quienes desarrollaron un método para calcular la geodiversidad en el que integraron elementos bióticos en su análisis del paisaje a partir de considerar la diversidad geológica, la diversidad edafológica, la diversidad

<sup>©</sup> E. Domínguez-Herrera, L. Luna-González, D. Velázquez-Torres. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), which permits non-commencial sharing of the work and adaptions, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

<sup>\*</sup>E-mail address: mademsgeografia@unam.mx

de relieve y la diversidad hidrológica. En dicho trabajo vincularon la geodiversidad y la biodiversidad; sin embargo, a pesar de las coincidencias, la presente investigación, únicamente considera los elementos abióticos de la naturaleza, es decir, analiza sólo la geodiversidad.

Es importante considerar que el concepto de geodiversidad es un término relativamente joven, definido a partir de la década de los años noventa por diversos especialistas en Ciencias de la Tierra, en especial geólogos, geomorfólogos, geógrafos, incluso, arqueólogos. En particular, destacan las definiciones y análisis de Gray (2013 y 2019), Fernández et al. (2015) Chakravorty y Gray (2020), dos Santos et al. (2020) y Zakharovskyi y Németh (2021). Gray (2013) indica que la geodiversidad se refiere "al rango natural (diversidad) geológico (rocas, minerales, fósiles), geomorfológico (formas terrestres, topografía, procesos físicos), a los suelos y características hidrológicas, incluyendo sus ensamblajes, estructuras, sistemas y aportes a los paisajes" (p.8). Por su parte, Fernández et al. (2015) sostienen una afirmación similar al concluir que "las interacciones entre ellos [los elementos de la geodiversidad] contribuyen a que la planificación y gestión del territorio tenga mejores resultados". Chakravorty y Gray (2020) retoman a Gray (2013) y agregan que "es esencial conceptualizar la geodiversidad en el nivel planetario, tanto para comprender los vínculos abióticos-bióticos como para una visión más inclusiva de la naturaleza y la sostenibilidad" (p.1). Asimismo, dos Santos et al. (2020) y Zakharovskyi y Németh (2021) recuperan definiciones similares sobre la geodiversidad incluyendo los elementos antes mencionados por Gray (2013).

Debido a su reciente desarrollo, este concepto presenta al menos dos importantes desafíos. El primero es que actualmente no existe una definición de geodiversidad consensuada por los especialistas, situación contraria al concepto de Biodiversidad, que cuenta con una definición ampliamente aceptada por la comunidad científica, definida en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, Brasil, coordinada por la Organización de la Naciones Unidas (ONU) en 1992 (Carcavilla et al., 2008). El segundo reto radica en que los métodos que actualmente existen para obtener la geodiversidad presentan distintas limitaciones, pues como lo señala Serrano (2014) "Los estudios de geodiversidad todavía son poco frecuentes, aún no disponen de un cuerpo teórico y metodológico suficientemente desarrollado y han sido aplicados principalmente a pequeña escala" (p.65). Consecuentemente, la mayoría de las definiciones de geodiversidad conocidas no ofrecen un método de evaluación acorde a su conceptualización, por lo que surge la necesidad de buscar alternativas que permitan avanzar en esta materia.

Por lo anterior, se propone la siguiente definición retomando los diferentes conceptos de geodiversidad existentes: "La geodiversidad es una característica de la superficie terrestre que se manifiesta a través de la integración de distintos componentes y elementos físicos, tales como rocas, minerales, fósiles, elementos hidrográficos, geoformas y paisajes, interrelacionados de manera dinámica entre sí a partir de la influencia de los procesos endógenos constructores y exógenos modeladores del re-

lieve, los cuales coexisten y evolucionan en un lugar y a una escala de tiempo geológico determinados".

Considerando esta definición y con la finalidad de avanzar en la clasificación de la geodiversidad de QR se diseñó un método denominado Geodiversidad Ponderada (GdP), que toma algunos procedimientos del método Proceso Analítico Jerárquico (AHP) del profesor Thomas L. Saaty (1977, 1980), así como algunas herramientas del análisis geográfico. El nombre del método incluye la palabra "ponderada", derivada del verbo ponderar que significa "determinar el peso de algo" (RAE, sin fecha). Lo anterior debido a que en este trabajo se sostiene que no todos los elementos o componentes en la naturaleza se manifiestan y se desarrollan con el mismo peso o intensidad, independientemente de su extensión espacial.

Por lo tanto, los objetivos generales de este trabajo son redefinir el concepto de geodiversidad, diseñar un método para calcular la geodiversidad que responda directamente al concepto redefinido, aplicar el método en el caso de estudio de QR y representar los resultados clasificados en un mapa.

#### 2. Descripción del área de estudio

El estado de QR se localiza en el sureste de México, en la Península de Yucatán, tiene una extensión de 44,705 kilómetros cuadrados y se ubica entre las coordenadas 17°49' y 21°35' de latitud norte, y -86°42' y -89°25' de longitud oeste. La descripción del área de estudio se hizo en función de los tres componentes de la geodiversidad que participan en el análisis: componentes geológico, geomorfológico e hidrográfico.

Respecto al componente geológico, la evolución tectónica de la provincia geológica de la Plataforma de Yucatán (PY) está vinculada con la apertura del Golfo de México (SGM, 2007) que abarcó los inicios del Triásico Superior (210 millones de años) hasta el Jurásico Medio (169 millones de años) en la Era Mesozoica (Salvador, 1991). A lo largo de este tiempo se generó la ruptura del supercontinente Pangea en la margen sur de la placa de Norteamérica. De acuerdo con Davison et al. (2021a y 2021b), la evolución geológica del Bloque Yucatán (BY) es parte de "la manifestación de complejas interacciones de placas resultantes de la ruptura de Pangea ecuatorial occidental alrededor de 250-170 Ma y, más específicamente, la ruptura de la corteza continental de las placas de América del Norte y del Sur, incluido el BY". En particular, Padilla (2007) sostiene que durante la Orogenia Laramide (principios del Paleógeno) que dio origen a la formación de pliegues y fallas de las Sierras Madre Oriental y de Zongolica, en el sureste mexicano, específicamente la parte norte del macizo de Chiapas y sobre el BY se depositaron sedimentos carbonatados de plataforma somera. En resumen, la geología del BY está representada por amplios estratos de rocas carbonatadas que se depositaron en mares someros en amplias porciones de lo que hoy es el Golfo de México y estuvieron sujetas a regresiones y transgresiones marinas durante la fragmentación y separación del supercontinente Pangea (Padilla, 2007). La depositación de las rocas calizas carbonatadas y clásticas continuaron durante el Terciario

(SGM, 2007). En cuanto a las estructuras lineales derivadas de los procesos tectónicos distensivos de origen reciente (Terciario) se manifiestan a través de una serie de lineamientos con direcciones preferentes NW-SE a lo largo del territorio de QR, en los que sobresalen la falla Ticul de 115 km de longitud; el lineamiento Petén-Tunic de 26 km; el lineamiento La Oyanca de 35 km; el lineamiento Nohbec de 20 km; el lineamiento Chetumal de 40 km; y la más sobresaliente, la falla regional Río Hondo de 75 km, al sur de QR que conforma la frontera entre México y Belice (SGM, 2007). Estos lineamientos resultantes de procesos tectónicos que han estado presentes en la evolución geológica del PY afectan las formaciones de rocas calizas y favorecen los procesos de disolución que, junto con el efecto de las aguas meteóricas, dan lugar a la formación y evolución de formas cársticas como las dolinas, poljes y extensos sistemas de cuevas inundadas a lo largo de todo QR.

Con relación al componente geomorfológico, QR se ubica en la provincia fisiográfica conocida como Plataforma de Yucatán, planicie conformada por unidades litológicas horizontales que no poseen deformaciones significativas, sino más bien lomeríos y llanuras suaves, playas, barras y lagunas costeras (SGM, 2007). Esta unidad fisiográfica se subdivide a la vez en tres subprovincias: Carso Yucateco con un 55 % del territorio; Carso y Lomeríos de Campeche (24 %) y Costa Baja de QR con un 21 % de la superficie del estado (INEGI, 2001). De acuerdo con Bautista et al., (2005), las unidades del paisaje geomorfológico en QR presentan un cierto grado de homogeneidad morfogenética, por lo cual existe un estrecho vínculo entre estos paisajes geomorfológicos y el comportamiento de los acuíferos. Las unidades son principalmente planicies de origen carsotectónico que abarcan desde el norte hasta el sur del área de interés, y solo hay una unidad de lomeríos que se ubica en la porción sur, la cual posee las mayores altitudes de QR, entre 200 y 400m msnm (INEGI, 2000).

Respecto al componente hidrográfico, de acuerdo con el Mapa de la Red Hidrográfica Digital de México, Escala 1:250, 000 (INEGI, 2010) QR se ubica dentro de dos regiones hidrológicas: Yucatán Norte (30 %) y Yucatán Este (70 %). Dicha información permite apreciar que la región hidrológica Norte se caracteriza por la ausencia de ríos superficiales, pero con una densa red hidrográfica subterránea conformada por cenotes y sistemas de cuevas inundadas. Por otro lado, los cenotes forman parte de los sistemas hidrográficos subterráneos de QR constituidos por cavernas y grutas secas e inundadas que se generan como consecuencia de la acción erosiva de la lluvia sobre la roca caliza fracturada, en conjunto con otros factores como la acción de las aguas subterráneas y las altas temperaturas. Por su parte, la región hidrológica Este, cuenta con una red fluvial superficial más desarrollada en comparación con la porción norte, ya que en ella se encuentran cuencas cerradas y mayores elevaciones, así como algunos ríos y cuerpos de agua perennes. El río más importante es el Hondo, que delimita la frontera entre México y Belice. Algunas lagunas importantes son la de Bacalar y la de Noh-Bec.

#### 3. Materiales y métodos

La primera parte del método GdP consiste en retomar los primeros elementos del método AHP para la toma de decisiones, esto es "descomponer una situación no estructurada y compleja en sus partes, ordenar estas partes o variables en un orden jerárquico, asignar valores numéricos a juicios o pensamientos subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable, y sintetizar los juicios para determinar qué variables tienen mayor prioridad y cómo debe actuarse sobre ellas para influir sobre el resultado de la situación" (Saaty, 2014). La segunda parte del método GdP se sustenta en el uso de algunas herramientas de análisis geográfico empleando el sistema de información geográfico ArcGIS 10.1 (georreferencing, point density, line density, buffer, union, clasificación de datos por el método natural breaks), las cuales se explicarán en la siguiente sección.

Se definieron las siguientes fases para aplicar la estrategia metodológica GdP y así obtener la geodiversidad de QR:

- Fase I: Selección de los criterios (componentes) de la geodiversidad.
- Fase II: Diseño de la estructura jerárquica de los criterios (componentes) con base en el AHP.
- Fase III: Evaluación de los criterios (componentes), obtención de prioridades y consistencia del modelo.
- Fase IV: Aplicación de métodos de análisis geográfico a la información cartográfica.

#### 3.1. Fase I: Selección de los componentes de la geodiversidad

Esta fase equivale a separar en partes problemas que describen una situación confusa a partir del método AHP, es decir, identificar los componentes de la geodiversidad de la zona de estudio. Con base en el análisis de los elementos que se consideran en la primera parte de la definición de geodiversidad aquí propuesta: "rocas, minerales, fósiles, topoformas y paisajes", se identificaron los principales componentes de QR: la geología, la geomorfología y la hidrología, exceptuando minerales y fósiles por estar ausentes en la zona de estudio. En la Tabla 1 se presenta la estructura completa de la geodiversidad obtenida a partir de la recopilación de información bibliográfica y cartográfica a escala 1:250,000.

## 3.2. Fase II: Diseño de la estructura jerárquica de los criterios con base en el AHP

El siguiente paso, conforme al flujo de procesos del método AHP, es ordenar los elementos de forma jerárquica, tal y como se muestra en la Figura 1, en la que el objetivo principal de este caso es el cálculo de la geodiversidad de QR (nivel más elevado) y los criterios o componentes (geología, geomorfología e hidrología) y los subcriterios o subcomponentes (litología y estructuras lineales, unidades del paisaje y geoformas kársticas, hidrografía superficial y subterránea), en el siguiente nivel. Esta tarea se llevó a cabo analizando las características de todos los elementos de la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes y subcomponentes de la geodiversidad e información cartográfica recopilada / Table 1. Components and subcomponents of geodiversity and cartographic information collected

Componentes	Subcomponentes	Elementos	Fuente cartográfica
Geología	Litología y suelos	Rocas principalmente calizas y suelos litorales, palustres, lacustres y aluviales	Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta Geológico-Minera [Mapa]. 1:250,000, claves: F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión. México: Servicio Geológico Mexicano.
	Estructuras lineales	Área de influencia de fallas, fracturas y escarpes	Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2005). Carta Geológico-Minera [Mapa]. 1:250,000, clave: E16-4-7 Chetuma México: Servicio Geológico Mexicano.
Geomorfología	Unidades paisaje	Planicies y lomeríos	Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., Palacio, G., Ortíz-Pérez, M. y Castillo-González, M. (2005). Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. En F. Bautista y G. Palacio (Eds.), Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicacione Agropecuarias, Forestales y Ambientales (pp. 33-58). Campeche, Yucatán y CDMX, México: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán e Instituto Nacional de Ecología.
	Formas kársticas	Densidad de cenotes	Asociación Civil "Amigos de Sian Ka'an" (2015). Base de dato puntuales digitales correspondientes a la ubicación de cenotes, formato de ArcGIS shapefile. Cancún, Quintana Roo, México. Recuperado de http://3.129.193.251/
Hidrografía	Superficial	Densidad de red fluvial	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Red Hidrográfica del Estado de Quintana Roo [formato shapefil ArcGIS]. 1:250,000, claves: F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión, E16-4-7 Chetumal. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
	Subterránea	Unidades geohidrológicas	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Carta de Aguas Subterráneas del Estado de Quintana Roo [Mapa]. 1:250,000, claves: F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión, E16-4-7 Chetumal. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

#### 3.3. Fase III: Evaluación de los criterios (componentes)

Una vez que se estructuró el modelo jerárquico (Figura 1) y con el fin de establecer calificaciones numéricas a discernimientos sobre el valor de cada variable incluida en el análisis, se realizó la comparación por pares de todos los componentes y subcomponentes del modelo. De acuerdo con la metodología AHP, desarrollada por Saaty (1977 y 1980), y Saaty y Vargas (2014), para alcanzar este objetivo se utilizó la escala fundamental para comparaciones por pares de Saaty (2014) (Tabla 2), que permite obtener las prioridades de cada par de elementos evaluados mediante la asignación de valores numéricos a partir de comparaciones subjetivas. Es preciso señalar que los valores numéricos obtenidos con este análisis resultan en los pesos o ponderaciones de cada comparación. La esencia del método es el empleo de una escala de comparación pareada, que se apoya

en el principio de que el cerebro humano puede comparar con facilidad dos criterios entre sí, pero le resulta más complejo realizar comparaciones múltiples en un solo paso.

A continuación, se presenta un ejemplo del procedimiento del cálculo de la matriz de comparación pareada descrito en Saaty y Kearns (1985), Saaty y Vargas (1994) y Saaty (1996), para la obtención de prioridades o pesos relativos entre los elementos del modelo, solo para el nivel más alto de la estructura jerárquica. Debido a que este artículo es síntesis del trabajo realizado, sólo se muestra el cálculo de la primera matriz de comparación.

 Para obtener los pesos relativos de los elementos en un problema de comparación, primero debe hacerse la comparación por pares a partir de un componente dado. Para ello es necesario construir la matriz de comparación por

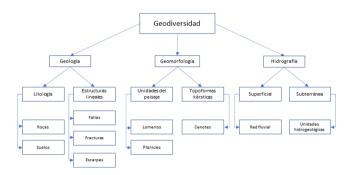


Figura 1. Estructura jerárquica de componentes de la geodiversidad de QR / Figure 1. Hierarchical structure of components of QR geodiversity

Tabla 2. Escala fundamental para comparaciones por pares de Saaty (1984) / Table 2. Fundamental scale for peer comparisons by Saaty (1984)

Escala	Definición	Explicación
1	Igualmente, preferible	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo
2	Entre igual y moderadamente preferible	Intermedio entre 1 y 3
3	Moderadamente preferible	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro
4	Entre moderada y fuertemente preferible	Intermedio entre 3 y 5
5	Fuertemente preferible	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
6	Entre fuerte y muy fuertemente preferible	Intermedio entre 5 y 7
7	Muy fuertemente preferible	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro
8	Entre muy fuerte y extremadamente preferible	Intermedio entre 7 y 9
9	Extremadamente preferible	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro

pares (Figura 2).

- 2. El enunciado de evaluación debe reflejar la adecuada relación entre los elementos de un nivel con la propiedad del nivel inmediatamente superior (Saaty, 2014). En este caso se estableció la pregunta: ¿Qué componente aporta mayor geodiversidad a QR? En la Tabla 3 se muestran los resultados de las comparaciones por pares entre los componentes considerados en el ejemplo.
- 3. Las comparaciones para esta matriz (3 x 3) fueron seis; tres directas y tres indirectas. En la diagonal principal de

la matriz de comparación (Tabla 4), es donde coinciden los valores de cada componente consigo mismos, por lo que al comparar entre sí estos valores, resulta el valor 1. Los valores directos (valores arriba de la diagonal principal), corresponden a aquéllos elegidos para cada comparación a partir de la Escala de Saaty (Tabla 3) y los valores indirectos (aquéllos debajo de la diagonal principal) resultaron de aplicar el valor recíproco de la comparación opuesta (Tabla 4), antes representado en la Figura 2.

- 4. A continuación, se normalizaron los valores de las comparaciones pareadas para cada componente y se generó la matriz normalizada (Tabla 5). Enseguida se calculó el vector promedio (peso relativo) de los valores normalizados de cada componente (filas). Estos valores van a servir para calcular la razón de consistencia de todo el análisis. Para mayor explicación de este tema se puede consultar el trabajo de Saaty (2014). El peso relativo de cada componente es el vector promedio resultante, derivado del producto de los valores normalizados de cada componente expresados en las filas.
- 5. Para obtener los resultados de todas las entidades que se incluyeron en la estructura jerárquica, se elaboraron 15 matrices de comparación. Como resumen, en la Tabla 6 se presenta la lista completa de las 36 entidades de la geodiversidad de QR que se evaluaron a través de este método. La evaluación de los componentes, subcomponentes y elementos analizados derivó en la ponderación de cada una de las 36 entidades consideradas a partir de los 6 mapas analizados (dos por cada componente).

$$A = [1 \ a_{12} \ \dots \ a_{1n} \ a_{21} \ 1 \ \dots \ a_{2n} \ \dots \dots \ 1 \ \dots \ a_{n1} \ a_{n2} \ \dots \ 1]$$

Figura 2. Matriz para comparación por pares / Figure 2. Matrix for peer comparison

# 3.4. Fase IV: Aplicación de métodos de análisis geográfico a la información cartográfica

Esta fase de la metodología consiste en preparar la información cartográfica a la que se le integrarán los resultados del análisis AHP para finalmente obtener la distribución de la geodiversidad de QR. A continuación, se describe el procesamiento aplicado a la cartografía que se recopiló de cada uno de los tres componentes principales y sus subcomponentes, en total seis mapas originales, seis mapas clasificados y el mapa final, objetivo central de este trabajo. Asimismo, se describe el análisis aplicado dentro del SIG utilizado para obtener el resultado final. Este fue el ArcGIS versión 10.1. Los parámetros cartográficos usados fueron proyección UTM (Universal Transverse Mercator), Zona UTM 16, sistema de coordenadas geográficas GCS\_WGS\_1984, escala de captura y procesamiento de datos 1;250,000 y escala de presentación de resultados 1:800,000.

Tabla 3. Tabla de juicios	/ Table 3. Judgement table
---------------------------	----------------------------

¿Qué componente aporta mayor geodiversidad a QRoo?																		
Geología	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Geomorfología
Geología	9	8		6			_	$\overline{2}$		_	_	4	_	6	7	8	9	Hidrología
Geomorfología	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Hidrología

Tabla 4. Valores de la matriz de comparación /Table 4. Comparison matrix values

	Geol	Geom	Hidro
Geol	1.0	2.0	3.0
Geom	1/2	1.0	3.0
Hidro	1/3	1/3	1.0

Tabla 5. Matrices de comparación por pares, de normalización y vector del peso relativo de cada componente / Table 5. Pairwise comparison, normalization, and vector matrices of the relative weight of each component

	Geol	Geom	Hidro		Matriz rmaliza		Vector pro- medio (peso)
Geol	1.0	2.0	3.0	0.5	0.6	0.4	0.5246
Geom	0.5	1.0	3.0	0.3	0.3	0.4	0.3337
Hidro	0.3	0.3	1.0	0.2	0.1	0.1	0.1415
Σ	1.8	3.3	7.0	1.0	1.0	1.0	1.0000

#### 3.4.1. Componente geológico

La información cartográfica correspondiente a litología y suelos se obtuvo de la Carta Geológico-Minera 1:250,000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en formato digital PDF, hojas F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión y E16-4-7 Chetumal (SGM, 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d, 2006e, 2007). En la Figura 3 se muestra el mapa de litología y suelos. Los procesos de captura y procesamiento de la información fueron: conversión a formato de imagen TIFF de los archivos PDF; georreferenciaron de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; unión y edición de las hojas captura (trazo en pantalla) de los polígonos; etiquetación de los datos asociados a la información cartográfica; preparación de la tabla de atributos asociada a los polígonos; adición del atributo en la tabla asociada, W SOLI, que corresponde a los valores calculados de la Geodiversidad Ponderada (GdP) para cada uno de los tipos de rocas y suelos; finalmente, a partir de W\_SOLI (peso ponderado) se ordenaron de mayor a menor los polígonos utilizando una tabla de colores de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 7 y Figura 4).

La información cartográfica correspondiente a estructuras lineales inferidas (tectónicas y erosivas) se obtuvo también de la Carta Geológico-Minera 1:250,000 del Servicio Geológico

Mexicano (SGM) en formato digital PDF, (2006), hojas F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión y E16-4-7 Chetumal (2005). En la Figura 5 se muestra el mapa de estructuras lineales. Los procesos de captura y procesamiento de la información de líneas fueron: conversión a formato de imagen TIFF de los archivos PDF; georreferenciaron de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; unión y edición de las hojas digitales; captura (trazo en pantalla) de las líneas; etiquetación de los datos asociados a la información cartográfica; preparación de la tabla de atributos asociada a las líneas. Debido a que no es posible combinar información lineal con poligonal, las líneas se convirtieron en polígonos mediante la herramienta BUFFER (ESRI, 2005b) de ArcGIS, proceso que calcula un polígono o área de influencia alrededor de las líneas de interés a partir de definir una distancia hacia afuera del elemento geométrico (línea), en este caso se utilizó el valor de 5 km alrededor de las líneas que representan fallas, fracturas y escarpes de estructuras kársticas, ya que se parte de que estas estructuras forman áreas de debilidad en donde es probable que se estructuren y evolucionen más fácilmente formas kársticas como dolinas.

Con base en estos nuevos polígonos, se adicionó el atributo W\_ST a la tabla asociada, cuyos valores corresponden a los pesos calculados de la GdP para cada uno de los tipos de estructuras lineales; finalmente, a partir de W\_ST (peso ponderado) se ordenaron de mayor a menor los polígonos, utilizando una tabla de colores de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 8 y Figura 6).

#### 3.4.2. Componente geomorfológico

La cartografía correspondiente a paisajes geomorfológicos (derivados de procesos endógenos y exógenos) se obtuvo del mapa de paisajes geomorfológicos organizados por el grado de evolución kárstica (edad) incluidos en Bautista et al. (2004). En la Figura 7 se muestra el mapa de paisajes geomorfológicos. Los procesos de captura y procesamiento de la información fueron: conversión a formato de imagen TIFF de la captura del mapa en papel; georreferenciaron de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; unión y edición de las hojas captura (trazo en pantalla) de los polígonos; etiquetación de los datos asociados a la información cartográfica; preparación de la tabla de atributos asociada a los polígonos; adición del atributo en la tabla asociada, W GEOM, que corresponde a los valores calculados de la GdP para cada uno de los tipos de paisajes. Finalmente, a partir de W GEOM (peso ponderado) se ordenaron de mayor a menor los polígonos utilizando una tabla de colores

Tabla 6. Valores ponderados resultantes de la comparación pareada (ranking global) / Table 6. Weighted values resulting from the paired comparison (global ranking)

Objetivo	Peso (w)	Componente	Peso (w)	Subcomponente	Peso (w)	Atributo	Peso (w)	Entidad	PESO FINAL
GEODI- VERSIDAD (GdP)	1.000	GEOLOGIA (procesos endógenos)	0.5247	Litología / Cronoestratigrafía	0.7500	Suelo (susceptibilidad a la erosión)	0.2000	Qholi Qhopa Qhola Qhoal	0.0064 0.0064 0.0247 0.0412
						Roca (edad)	0.8000	Qpt(?)Ar QptAr-Cz TmCz-Do TmCz TmplCz-Cq TeCz-Mg TpaCz-Y	0.0078 0.0126 0.0315 0.0202 0.0485 0.0747 0.1195
				Estructuras lineales	0.2500	Área de influencia	1.0000	Fractura Escarpe Falla	0.0139 0.0342 0.0831
		GEOMORFO- LOGIA	0.3338	Unidades del paisaje	0.8333	Madurez-Tardía de relictos	0.6491	POLJES LOMERIOS	0.0516 0.1033
		(procesos exógenos)				Juventud- Madurez	0.2790	PRACE PEBF PEOTrans PEOEsc	0.0251 0.0051 0.0130 0.0459
						Reciente- Juventud	0.0719	PEBDen PETENES PPCOSInu PPCost PEODisDen	0.0018 0.0029 0.0045 0.0091 0.0158
				Geoformas kársticas (dolinas)	0.1667	Densidad de dolinas	1.000	Baja (0.07-0.26 cen/km²) Media (0.26-0.68 cen/km²) Alta (0.68-1.42 cen/km²)	0.0046 0.0107 0.0402
		HIDROGRAFIA (procesos exógenos)	0.1416	Superficial (red fluvial)	0.2500	Densidad de la red fluvial	1.000	Baja (0.005-0.23 km/km <sup>2</sup> ) Media (0.23-0.54 km/km <sup>2</sup> ) Alta (0.54-1.31 km/km <sup>2</sup> )	0.0029 0.0068 0.0256
				Subterránea (unidades hidrogeológicas)	0.7500	Capacidad de extracción de agua	1.000	Muy baja Baja Media Alta Muy alta	0.0037 0.0072 0.0143 0.0276 0.0533

de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 9 y Figura 8).

La cartografía correspondiente a las formas kársticas azonales (dolinas) se obtuvo del mapa digital de puntos correspondientes a la ubicación de dolinas proporcionado por la Asociación Civil "Amigos de Sian Ka'an" en formato de ArcGIS shapefile. El total de puntos de dolinas para QR fue de 2,530. En la Figura 9 se muestra el mapa de formas kársticas azonales (dolinas). Los procesos de captura y procesamiento de la información de puntos fueron: reproyección del mapa de puntos de dolinas de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; preparación de la tabla de atributos asociada a los puntos. Debido a que no es posible combinar información puntual con poligonal, los puntos se convirtieron a formato ráster mediante la herramienta KERNEL DENSITY (ESRI, 2005e) de ArcGIS,

proceso que calcula una magnitud por unidad de área (celda) a partir de entidades de puntos para ajustar una superficie continua suavemente a cada dolina; después, el mapa ráster se agrupó en 3 clases -Alta, Media y Baja- mediante la aplicación del método de clasificación de datos del SIG, Natural Breaks, método que identifica puntos de ruptura en el histograma, selecciona los saltos que mejor agrupan valores similares y maximiza las diferencias entre las clases; para continuar el trabajo de análisis de todos los mapas, el ráster se convirtió a polígonos de densidad de dolinas mediante la herramienta RASTER TO POLYGON; con base en estos nuevos polígonos, se adicionó el atributo W\_DENS (peso ponderado) a la tabla asociada, cuyos valores corresponden a los pesos calculados de la Geodiversidad Ponderada (GdP) para cada una de las clases de densidad; finalmente, a partir de W\_DENS se ordenaron de mayor a me-

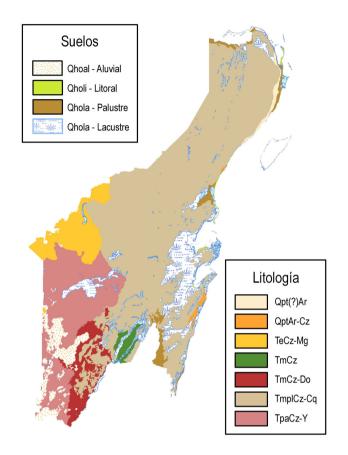


Figura 3. Mapa de litología y suelos / Figure 3. Map of lithology and soils

Tabla 7. Pesos ponderados para litología y suelos

Litología y suelos	Peso
TpaCz-Y - Caliza-Yeso/Paleoceno	0.1195
TeCz-Mg - Caliza-Marga/Eoceno	0.0747
TmplCz-Cq - Caliza-Coquina/Mioceno-Plioceno	0.0485
Qhoal - Suelo aluvial/Holoceno	0.0412
TmCz-Do - Caliza-Dolomía/Mioceno	0.0315
Qhola - Suelo lacustre/Holoceno	0.0247
TmCz - Caliza/Mioceno	0.0202
QptAr-Cz - Arenisca-Caliza/Pleistoceno	0.0126
Qpt(?)Ar - Arenisca/Pleistoceno	0.0078
Qholi - Suelo litoral/Holoceno	0.0064
Qhopa - Suelo palustre/Holoceno	0.0064

nor los polígonos, utilizando una tabla de colores de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 10 y Figura 10).

#### 3.4.3. Componente hidrológico

La información cartográfica de la red hidrográfica se obtuvo de la Red Hidrográfica del Estado de Quintana Roo, esca-

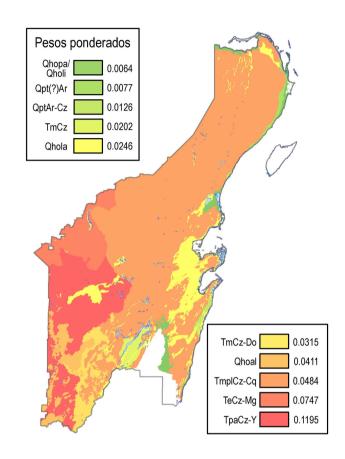


Figura 4. Mapa de litología y suelos ordenados de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 4. Map of lithology and soils ordered from highest to lowest by weights

la 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010) en formato de ArcGIS shapefile, hojas F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión y E16-4-7 Chetumal. En la Figura 11 se muestra el mapa de estructuras lineales. Los procesos de captura y procesamiento de la información de líneas fueron: reproyección de los mapas de la red hidrográfica de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; unión y edición de las hojas digitales; preparación de la tabla de atributos asociada a las líneas; debido a que no es posible combinar información lineal con poligonal, las líneas se convirtieron a formato ráster mediante la herramienta LINE DENSITY (ESRI, 2005d) del SIG, proceso que calcula la densidad de entidades lineales en la vecindad de cada celda ráster de salida (la densidad se calcula en unidades de longitud por unidad de área -km/km2); después, el mapa ráster se agrupó en 3 clases -Alta, Media y Baja- mediante la aplicación del método de clasificación de datos del SIG, Natural Breaks, método que identifica puntos de ruptura en el histograma, selecciona los saltos que mejor agrupan valores similares y maximiza las diferencias entre las clases; para continuar el trabajo de análisis de todos

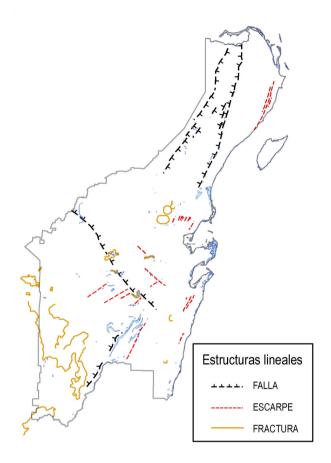


Figura 5. Mapa de estructuras lineales / Figure 5. Map of linear structures

los mapas, el ráster se convirtió a polígonos de densidad de la red hidrográfica mediante la herramienta RASTER TO POLYGON; con base en estos nuevos polígonos, se adicionó el atributo W\_SUP (peso ponderado) a la tabla asociada, cuyos valores corresponden a los pesos calculados de la GdP para cada una de las clases de densidad; finalmente, a partir de W\_SUP se ordenaron de mayor a menor los polígonos utilizando una tabla de colores de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 11 y Figura 12).

Tabla 8. Pesos ponderados para estructuras lineales

Estructuras lineales inferidas	Peso
Fallas	0.0831
Escarpes (estructuras kársticas)	0.0342
Fracturas	0.0139

La información cartográfica de las unidades geohidrológicas se obtuvo de la Carta de Aguas Subterráneas del Estado de Quintana Roo, escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2017) en formato digital PDF, hojas F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-

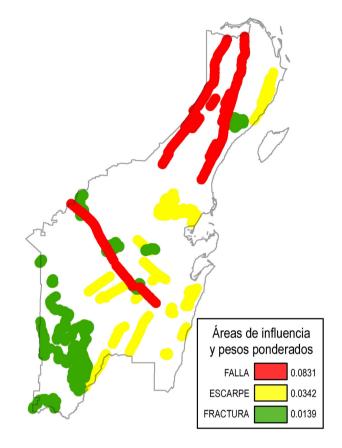


Figura 6. Mapa de estructuras lineales ordenadas de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 6. Map of linear structures ordered from highest to lowest by weighted weights

1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión y E16-4-7 Chetumal. En la Figura 13 se muestra el mapa de litología y suelos. Los procesos de captura y procesamiento de la información fueron: conversión a formato de imagen TIFF de los archivos PDF; georreferenciaron de acuerdo con los parámetros cartográficos establecidos; unión y edición de las hojas captura (trazo en pantalla) de los polígonos; etiquetación de los datos asociados a la información cartográfica; preparación de la tabla de atributos asociada a los polígonos; adición del atributo en la tabla asociada, W\_SUBT (peso ponderado), que corresponde a los valores calculados de la GdP para cada uno de los tipos de rocas y suelos; finalmente, a partir de W\_SUBT se ordenaron de mayor a menor los polígonos utilizando una tabla de colores de rojo a verde para visualizar la distribución geográfica de la geodiversidad (Tabla 12 y Figura 14).

#### 3.4.4. Mapa Final

Una vez clasificados los mapas originales (Figuras 3, 5, 7, 9, 11 y 13) y después de agregarles el atributo del peso calculado en la Fase III, se aplicó la función UNION (ESRI, 2005c) de ArcGIS, la cual calcula la intersección geométrica de la super-

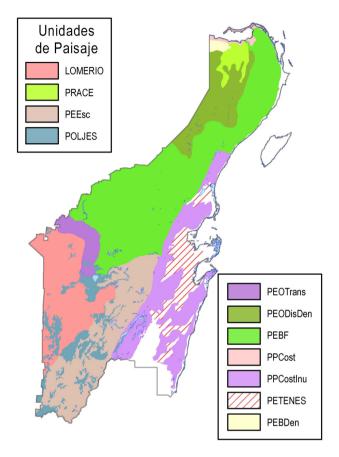


Figura 7. Mapa de paisajes geomorfológicos / Figure 7. Map of geomorphological landscapes

posición de los polígonos de las capas ingresadas (shapefiles) a la función. Este proceso fue crucial para generar el mapa final de GdP al permitir la sobreposición de diferentes capas de información para estimar la "suma" de los componentes en el atributo PESOFINAL que se localizan en el mismo espacio geográfico de QR (Tabla 6). Una vez generado el mapa resultante, se aplicó al atributo PESOFINAL del método de clasificación de datos conocido como "Natural Breaks" (ESRI, 2005a), el cual agrupa los datos en conjuntos naturales a partir del análisis del histograma de frecuencias de la variable de interés. Con ello, se generaron 5 clases: MUY ALTA, ALTA, MEDIA, BAJA y MUY BAJA. Con los datos de la tabla de atributos del shapefile final, se generó la "Tabla de resultados de la clasificación de la geodiversidad usando el método Geodiversidad Ponderada (GdP)" que aporta toda la información original de cada uno de los seis mapas originales. La tabla de resultados se incluye en la Lámina 1 (página 15), junto con el mapa final.

#### 4. Resultados

La aplicación de las fases I, II y III de la metodología GdP permitió obtener el ranking global de los 36 elementos que, a

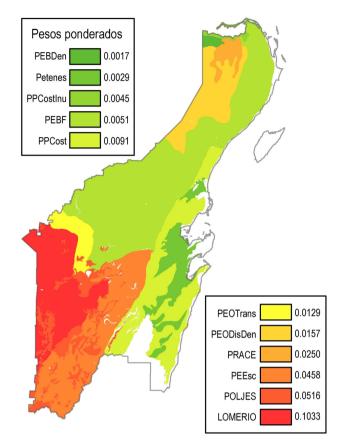


Figura 8. Mapa de paisajes geomorfológicos ordenados de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 8. Map of geomorphological landscapes ordered from highest to lowest by weighted weights

Tabla 9. Pesos ponderados para paisajes geomorfológicos

Unidades de paisaje	Peso
Lomerío de elevaciones bajas <200 msnm (Lomerios)	0.1033
Planicie residual acumulativa susceptible de inundación (POLJES)	0.0516
Planicie estructural escalonada (PEOEsc)	0.0458
Planicie residual acumulativa susceptible de inundación controlada estructuralmente (PRACE)	0.0250
Planicie estructural ondulada con disolución y denudación (PEODisDen)	0.0157
Planicie estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies (PEOTrans)	0.0129
Planicie palustre costera de inundación marina (PPCost)	0.0091
Planicie estructural baja fitoestable (PEBF)	0.0051
Planicie palustre costera de inundación marina con hundimiento (PPCOSInu)	0.0045
Planicie palustre con petenes chicos (PETENES)	0.0029
Planicie estructural baja denudativa ( <densidad (pebden)<="" de="" fracturas)="" td=""><td>0.0018</td></densidad>	0.0018

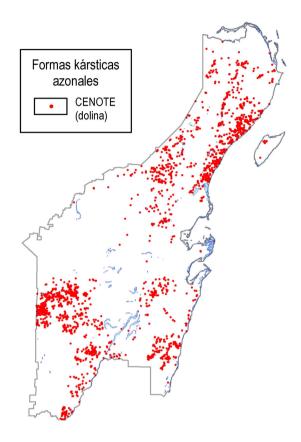


Figura 9. Mapa de formas kársticas (dolinas) / Figure 9. Map of karst forms (sinkholes)

Tabla 10. Pesos ponderados para densidad de dolinas

Densidad de dolinas	Peso
ALTA (0.68-1.42 dolinas/km2)	0.0402
MEDIA (0.26-0.68dolinas/km2)	0.0107
BAJA (0.07-0.26 dolinas/km2)	0.0046

Tabla 11. Pesos ponderados para densidad de red hidrográfica

Densidad de drenaje	Peso
ALTA (0.54-1.31 km/km2)	0.0256
MEDIA (0.23-0.54 km/km2)	0.0068
BAJA (0.005-0.23 km/km2)	0.0029

nivel individual, constituyen la geodiversidad de QR a partir de reconocer las entidades y el PesoFinal (w) de estos elementos (Tabla 13). Para conocer gradualmente (en un rango de mayor a menor) la distribución espacial que tienen estos componentes, en la fase IV de la metodología antes referida, se agruparon las

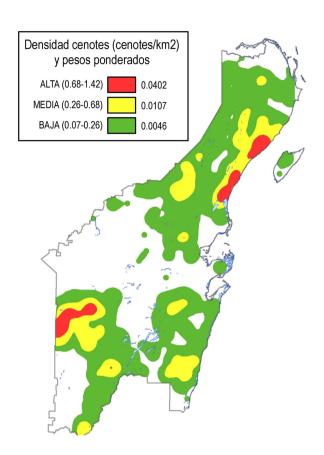


Figura 10. Mapa de densidad de dolinas ordenadas de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 10. Sinkhole density map ordered from highest to lowest by weighted weights

5 clases antes referidas. A continuación, se describen las características generales de estas clases que permiten identificar la geodiversidad en el territorio de QR. Estas describen: su ubicación en el estado de QR, el porcentaje de superficie que ocupan, y los componentes más representativos por clase. El mapa en la Lámina 1 (página 15) es el resultado final de la presente investigación:

■ MUY ALTA. Se ubica al SW de QR, ocupando 16.6 % de la superficie del estado. Los principales tipos de rocas (que abarcan 71.2 % de superficie de esta categoría) son las calizas y yesos del Paleoceno (TpaCz-Y), las cuales son las más antiguas. Las estructuras tectónicas representativas (con expansión de 36.2 % de superficie) son las fallas inferidas, que favorecen el desarrollo de dolinas. En cuanto a las unidades del paisaje (68.5 % de superficie) se encuentran los lomeríos de elevaciones bajas (<a 200 msnm) y planicies interiores en etapa de madurez. La densidad de cenotes (21.2 % de superficie) es alta, resultado de una activa erosión kárstica intensa. Así mismo, existe una alta densidad de red fluvial (34.1 % de super-

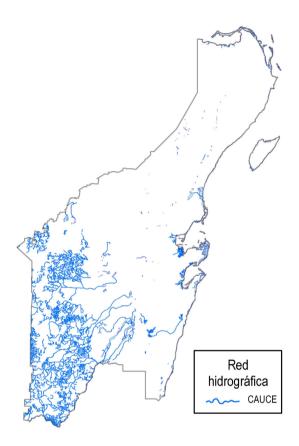


Figura 11. Mapa de red hidrográfica / Figure 11. Hydrographic network map

ficie), debido a una mayor densidad de la red superficial combinada con los suelos más antiguos y las altitudes topográficas mayores, en comparación al resto del estado. Por último, tiene una muy alta capacidad de extracción de agua de las unidades geohidrológicas (78.3 % de superficie), debidos al tipo de material subyacente.

- ALTA. Se ubica al SW y en algunas porciones N de QR, ocupando 30.3 % de la superficie del estado. Los principales tipos de rocas (que abarcan 8.3 % de superficie de esta categoría) también son las calizas y yesos del Paleoceno (TpaCz-Y). Las estructuras tectónicas representativas (con expansión de 43.5 % de superficie) son las fallas inferidas, que favorecen el desarrollo de dolinas. En cuanto a las unidades del paisaje (3.1 % de superficie) se encuentran los lomeríos. La densidad de cenotes (5.1 de superficie) es alta. Así mismo, existe una alta densidad de red fluvial (28.6 % de superficie). Por último, tiene una muy alta capacidad de extracción de agua de las unidades geohidrológicas (88.8 % de superficie).
- MEDIA. Se ubica al centro y norte de QR, ocupando 41 % de la superficie del estado. Los principales tipos de

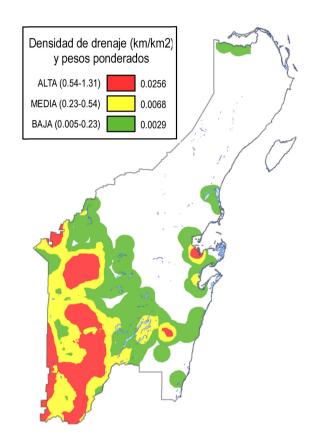


Figura 12. Mapa de densidad de la red hidrográfica ordenadas de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 12. Density map of the hydrographic network ordered from greater than lower by weighted weights

Tabla 12. Pesos ponderados para litología y suelos

Unidades geohidrológicas (posibilidad de extracción de agua)	Peso
MUY ALTA - Material consolidado con rendimiento alto >40 lps	0.0503
ALTA - Material consolidado con rendimiento medio 10-40 lps	0.0276
MEDIA - Material consolidado con posibilidades medias	0.0142
BAJA - Material consolidado con posibilidades bajas	0.0072
MUY BAJA - Material no consolidado con posibilidades bajas	0.0037

rocas (que abarcan 0.4 % de superficie de esta categoría) también son las calizas y yesos del Paleoceno (TpaCz-Y). Las estructuras tectónicas representativas (con expansión de 5.4 % de superficie) son las fallas inferidas, que favorecen el desarrollo de dolinas. En cuanto a las unidades

Tabla 13. Lista de los 36 elementos que participan en la construcción de la Gd de QR Table 13. List of the 36 elements that participate in the construction of the Gd of QR.

Rank	Entidades	Peso Final	Rank	Entidades	Peso Final	Rank	Entidades	Peso Final
1	TpaCz-Y - Caliza-Yeso/Paleoceno	0.1195	13	Capacidad de extracción de agua Alta	0.0276	25	Qpt(?)Ar - Arenisca/Pleistoceno	0.0078
2	Lomerío de elevaciones bajas <200 msnm (LOMERIOS)	0.1033	14	Densidad de red fluvial Alta (0.54-1.31 km/km2)	0.0256	26	Capacidad de extracción de agua Baja	0.0072
3	Área de influencia de Falla	0.0831	15	Planicie residual acumulativa susceptible de inundación controlada estructuralmente (PRACE)	0.0251	27	Densidad de red fluvial Media (0.23-0.54 km/km2)	0.0068
4	TeCz-Mg - Caliza-Marga/Eoceno	0.0747	16	Qhola - Suelo lacustre/Holoceno	0.0247	28	Qholi - Suelo litoral/Holoceno	0.0064
5	Capacidad de extracción de agua Muy Alta	0.0533	17	TmCz - Caliza/Mioceno	0.0202	29	Qhopa - Suelo palustre/Holoceno	0.0064
6	Planicie residual acumulativa susceptible de inundación (POLJES)	0.0516	18	Planicie estructural ondulada con disolución y denudación (PEODisDen)	0.0158	30	Planicie estructural baja fitoestable (PEBF)	0.0051
7	TmplCz-Cq - Caliza-Coquina/Mioceno- Plioceno	0.0485	19	Capacidad de extracción de agua Media	0.0142	31	Densidad baja (0.07-0.26 cen/km2)	0.0046
8	Planicie estructural escalonada (PEOEsc)	0.0459	20	Área de influencia de Fractura	0.0139	32	Planicie palustre costera de inundación marina con hundimiento (PPCOSInu)	0.0045
9	Qhoal - Suelo aluvial/Holoceno	0.0412	21	Planicie estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies (PEOTrans)	0.0130	33	Capacidad de extracción de agua Muy Baja	0.0037
10	Densidad de dolinas Alta (0.68-1.42 cen/km2)	0.0402	22	QptAr-Cz - Arenisca- Caliza/Pleistoceno	0.0126	34	Densidad de red fluvial Baja (0.005-0.23 km/km2)	0.0029
11	Área de influencia de Escarpe	0.0342	23	Densidad de dolinas Media (0.26-0.68 cenotes/km2)	0.0107	35	Planicie palustre con petenes chicos (PETENES)	0.0029
12	TmCz-Do - Caliza-Dolomía/Mioceno	0.0315	24	Planicie palustre costera de inundación marina (PPCost)	0.0091	36	Planicie estructural baja denudativa ( <densidad de<br="">fracturas) (PEBDen)</densidad>	0.0018

del paisaje (0.1 % de superficie) se encuentran los lomeríos. La densidad de cenotes (0.6 % de superficie) es alta. Así mismo, existe una alta densidad de red fluvial (13.3 % de superficie). Por último, tiene una muy alta capacidad de extracción de agua de las unidades geohidrológicas (86.4 % de superficie).

■ BAJA. Se ubica en algunas porciones N y E de QR, ocupando 6.8 % de la superficie del estado. Los principales tipos de rocas (que abarcan 0.1 % de superficie de esta categoría) son las calizas y margas del Terciario Eoceno (TeCz-Mg). Las estructuras tectónicas representativas (con expansión de 21.1 % de superficie) son las fallas inferidas, que favorecen el desarrollo de dolinas. En cuanto a las unidades del paisaje (5.9 % de superficie) se encuentran los poljes. La densidad de cenotes (1.8 % de superficie) es alta. Así mismo, existe una alta densidad de red fluvial (8.2 % de superficie). Por último, tiene una muy alta capacidad de extracción de agua de las unidades

geohidrológicas (28.8 % de superficie).

■ MUY BAJA. Se ubica en algunas porciones N y E de QR, ocupando 5.3 % de la superficie del estado. Los principales tipos de rocas (que abarcan 0.1 % de superficie de esta categoría) son las calizas y dolomías del Terciario Mioceno (TmCz-Do). Las estructuras tectónicas representativas (con expansión de 48.6 % de superficie) son los escarpes inferidos, que favorecen el desarrollo de poljes. En cuanto a las unidades del paisaje (con 0.2 % de superficie) se encuentran unidades de paisaje planicies residuales acumulativas susceptibles de inundación controlada estructuralmente (PRACE). La densidad de cenotes (5.4 % de superficie) es media. Así mismo, existe una alta densidad de red fluvial (2 % de superficie). Por último, tiene una muy alta capacidad de extracción de agua de las unidades geohidrológicas (0.1 % de superficie).

Estos valores evidencian que la geodiversidad es el resul-

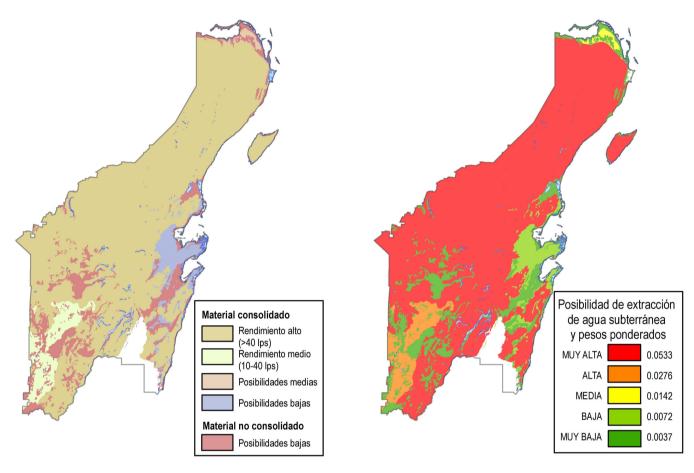


Figura 13. Mapa de unidades geohidrológicas / Figure 13. Map of geohydrological units

Figura 14. Mapa de unidades geohidrológicas ordenadas de mayor a menor por pesos ponderados / Figure 14. Map of geohydrological units ordered from highest to lowest by weighted weights

tado de la integración de elementos y procesos en el espacio físico y en el tiempo geológico, tal y como se señala en la definición de la geodiversidad, propuesta en la introducción de este artículo. En cuanto a los resultados de la geodiversidad en QR, se puede concluir que un territorio conformado por rocas sedimentarias antiguas, con presencia de agua superficial, con la influencia de estructuras lineales (falla, fracturas y escarpes) que favorecen los procesos exógenos modeladores del relieve se transforma más rápidamente, dando como resultado una mayor geodiversidad. Caso contrario, un territorio con rocas o suelos recientes, con escasa agua superficial, genera lentos procesos exógenos, por lo tanto, escasa geodiversidad.

#### 5. Conclusiones

Este trabajo presenta un nuevo método denominado GdP para calcular (ponderar, priorizar e integrar) datos relacionados con los componentes físicos de la superficie terrestre con el apoyo de información bibliográfica y cartográfica existentes mediante procedimientos específicos del análisis multicriterio Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El método permite integrar cuantitativa y cualitativamente los componentes físicos del

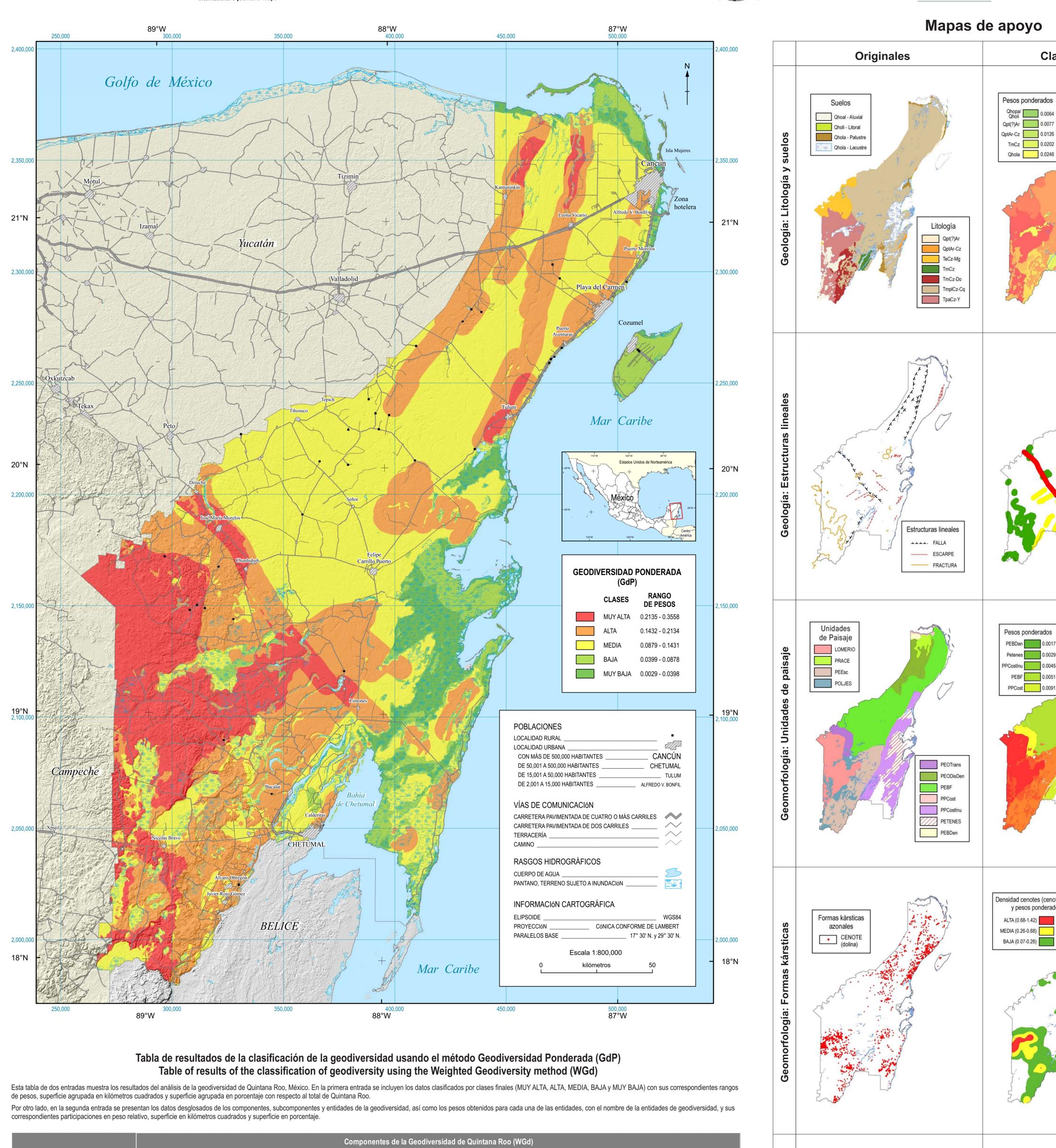
relieve que participan en conjunto constituyendo la geodiversidad particular de un lugar dado a partir de establecer ponderaciones entre estos elementos. También facilita la integración de los datos obtenidos del AHP, al sintetizarlos y representarlos a través de mapas mediante el uso de herramientas del análisis geográfico en un SIG. Se generó la vinculación entre una definición propuesta de geodiversidad y un método específico para calcular la distribución de la geodiversidad en escalas medias (1:250,000 a 1,000,000). La investigación aporta nuevas perspectivas a investigadores en Ciencias de la Tierra enfocados en construir una línea de investigación sobre la geodiversidad. Este método puede ser aplicado en otras regiones tanto nacionales como en otros países.

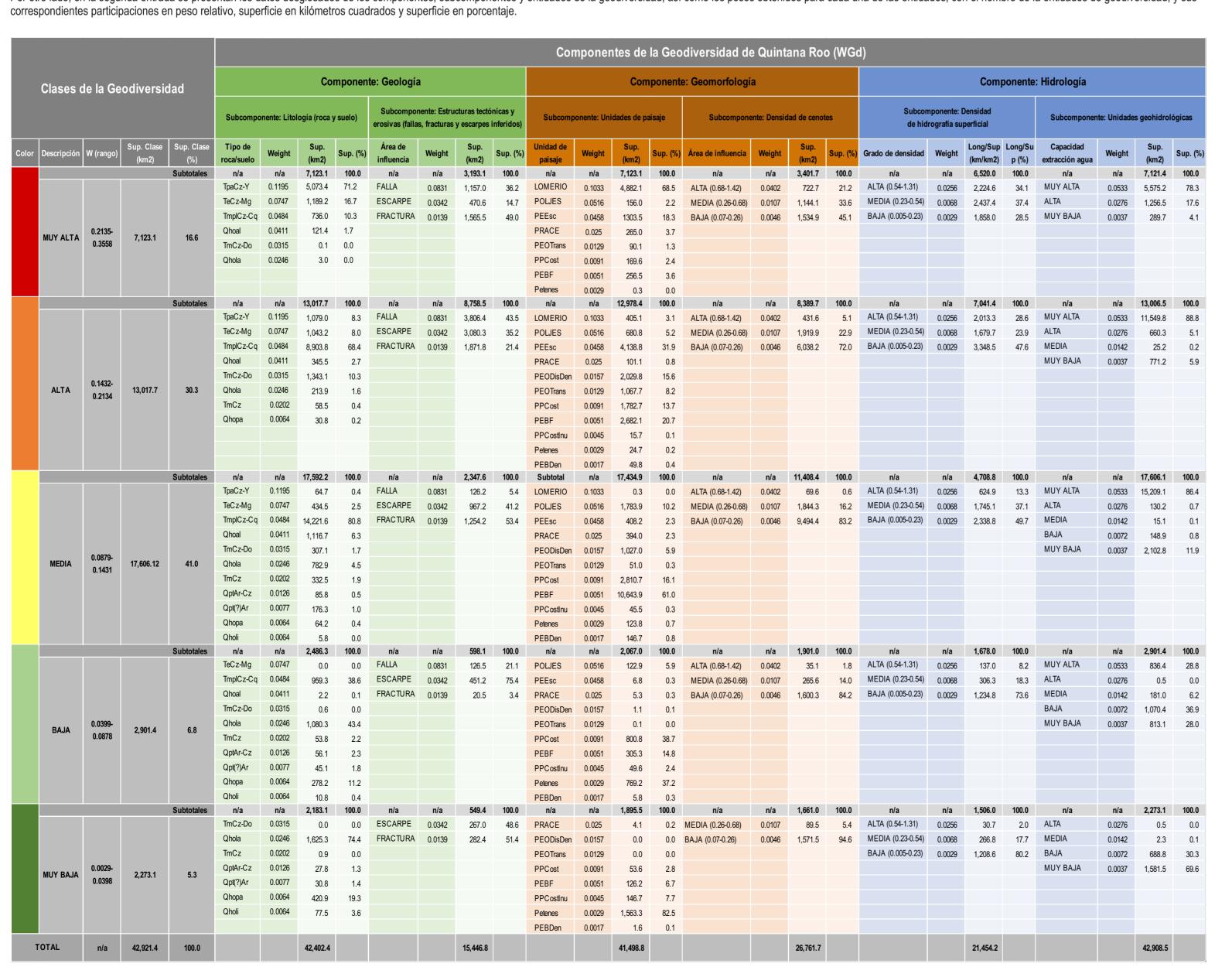
Entre las limitaciones del trabajo se puede considerar en primer lugar, el escaso trabajo de campo realizado en la zona de estudio debido a los limitados recursos económicos y humanos en un área de alrededor de 50,000 kilómetros cuadrados. En segundo lugar, no contar con una base de datos actualizada relacionada con la presencia de dolinas (cenotes) en QR, geoformas fundamentales en la conformación de la geodiversidad de este territorio. En tercer lugar, la necesidad de involucrar a

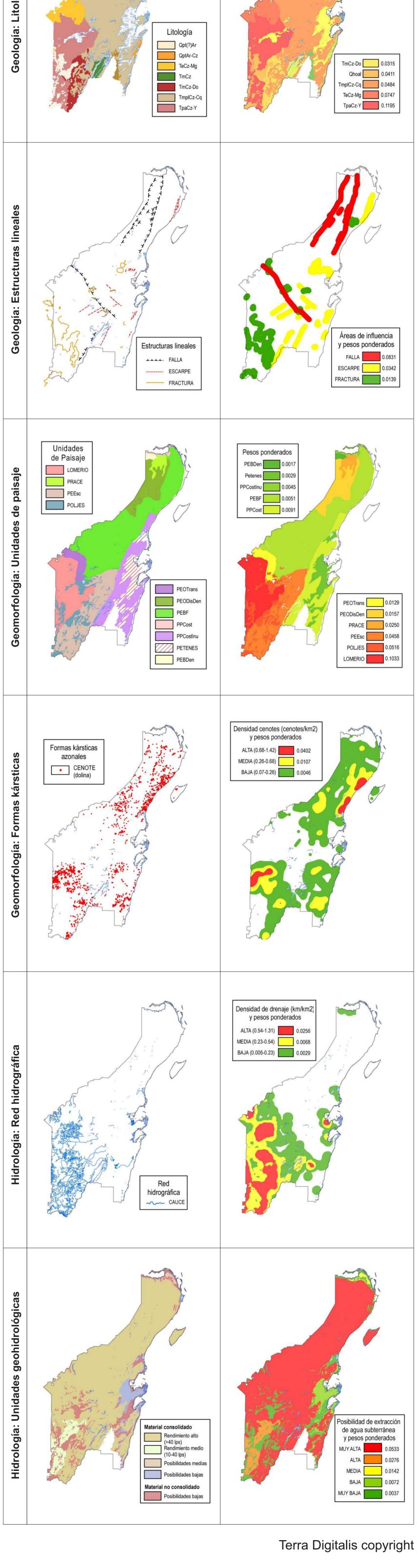
# Mapa de distribución de geodiversidad de Quintana Roo, México, escala 1: 800,000 Geodiversity distribution map of Quintana Roo, Mexico, scale 1: 800,000

Domínguez-Herrera Eduardo<sup>1</sup>, Luna-González Laura<sup>2</sup>, Velázquez-Torres David<sup>3</sup>
1) Posgrado en Geografía, UNAM; 2) Instituto de Geología, UNAM; 3) División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, México

terra digitalis







Clasificados

mayor número de expertos de distintas áreas de Ciencias de la Tierra para que aporten sus conocimientos y experiencia a través de construir juicios dirigidos a responder a las relaciones entre los diferentes componentes de la geodiversidad de este espacio geográfico.

En cuanto a las recomendaciones derivadas de esta investigación dirigidas a las autoridades/tomadores de decisiones, se puede señalar la necesidad de vincular estos resultados con datos socioeconómicos. Hay que destacar que en la actualidad QR es la principal entidad federativa receptora de turistas de playa y la que aporta el mayor número de ingresos a nivel nacional. Junto con el turismo de playa, en la última década, el ecoturismo y de aventura ha estado accediendo a los cenotes como atractivos turísticos. Estas prácticas están deteriorando este patrimonio natural, por tanto, es necesario buscar estrategias de geoconservación que controlen y protejan a los cenotes de su deterioro y/o destrucción.

A esto, puede sumarse el análisis y debate que enmarcan Campos et al. (2022) sobre el actual megaproyecto federal "Tren Maya" que contempla el sureste de México (Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Tabasco y Chiapas) mediante el desarrollo de aproximadamente 1500 km de camino ferroviario, el cual ha recibido una serie de críticas derivadas de los diferentes puntos de vista de los actores involucrados, en torno a los conflictos socio ambientales. Desde este sentido, se muestra oportuna la consideración del análisis de la Geodiversidad del estado en el diseño de este tipo de proyectos.

Finalmente, un aspecto a trabajar a futuro consiste en el desarrollo de investigaciones que destaquen la geodiversidad subterránea de QR. El estado cuenta con 106 cuevas submarinas de hasta 1,500 m de longitud y 30 cuevas secas con la misma extensión (QRSS, 2023). Entre ellas destaca la cueva de Sac Actun que tiene 368 km de largo, lo que hace es el sistema de cuevas submarinas más largo del mundo, considerada por Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, 2022:61), como uno de los primeros 100 sitios del patrimonio geológico del mundo.

#### Software utilizado

ArcGIS versión 10.1.

#### Agradecimientos y financiamiento

Amigos de Sian Kaan, A.C., por compartir su base de datos de cenotes en la Península de Yucatán. A la Mtra. Casandra Saraí Flores Chicón y a la Lic. Gabriela Carmona Baez por su apoyo en el procesamiento de la información del texto. El presente mapa fue elaborado con recursos obtenidos de la beca de Posgrado en Geografía otorgada por el CONACyT.

#### Referencias

Asociación Civil Amigos de Sian Kaan, 2015. Base de datos puntuales digitales correspondientes a la ubicación de cenotes, formato de ArcGIS shapefile.

Cancún, Quintana Roo, México. Asociación Civil Amigos de Sian Kaan, http://3.129.193.251/.

Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., Palacio, G., Ortiz-Pérez, M., Castillo-González, M., 2005. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. En: Bautista, F., Palacio, G. (Eds.), Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán e Instituto Nacional de Ecología, pp. 33–58.

Campos Cámara, B. L., Velázquez Torres, D., 2022. El megaproyecto tren maya. Una mirada desde el enfoque del desarrollo regional y los conflictos socio ambientales. En: Campos Cámara, B. L., Jiménez Sánchez, P. L., González Vera, M. A., Campos Alanís, H. (Eds.), Planificación socio ambiental en ciudades y áreas rurales de México. Universidad de Quintana Roo, pp. 173–186

Carcavilla, L., Durán, J., López-Martínez, J., 2008. Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. En: Cabrera, M. A. (Ed.), Geo-Temas 10. Simposio llevado en el VII Congreso Geológico de España, Las Palmas de Gran Canaria, España.

Chakraborty, A., Gray, M., 2020. A call for mainstreaming geodiversity in nature conservation research and praxis. Journal for Nature Conservation 56, 125862, https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125862.

Davison, I., Pindell, J., Hull, J., 2021a. The basins, orogens and evolution of the southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean. Geological Society, London, Special Publications 504 (1), 1–27, https://doi.org/10.1144/SP504-2020-218.

Davison, I., Pindell, J., Hull, J., 2021b. The basins, orogens and evolution of the southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean. En: Davison, I., Hull, J. N. F., Pindell, J. (Eds.), The Basins, Orogens and Evolution of the Southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean. Geological Society of London, https://doi.org/10.1144/SP504-2020-218.

dos Santos, F. M., de La Corte Bacci, D., Saad, A. R., da Silva Ferreira, A. T., 2020. Geodiversity index weighted by multivariate statistical analysis. Applied Geomatics 12 (3), 361–370, https://doi.org/10.1007/s12518-020-00303-w.

ESRI, 2005a. ArcGis for Desktop. ArcMap. Combinación. ESRI, accessed: 10-11-2022. https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/union.htm.

ESRI, 2005b. ArcGis for Desktop. ArcMap. Crear una zona de influencia alrededor de una entidad. ESRI, accessed: 05-03-2021. https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/managedata/creating-new-features/creating-a-buffer-around-a-feature.htm.

ESRI, 2005c. ArcGis for Desktop. ArcMap. Densidad de líneas. ES-RI, accessed: 22-05-2021. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/line-density.htm.

ESRI, 2005d. ArcGis for Desktop. ArcMap. Densidad de puntos. ESRI, accessed: 2-05-2021. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/point-density.htm.

ESRI, 2005e. ArcMap. Tipos de clasificación: Cortes naturales. ESRI, accessed: 04-08-2021. https://doc.arcgis.com/en/power-bi/design/classification-types.htm.

Fernández, G., Ramos, A., Valenzuela, S., Ricci, S., 2015. Geodiversidad, Patrimonio Minero Y Geoturismo: Propuesta De Parque Geominero En Argentina. Turismo y Sociedad 17, 17–37, http://dx.doi.org/10.18601/01207555.n17.02.

Fragoso-Servón, P., Pereira, A., Frausto, O., Bautista, F., 2014. Relación entre la geodiversidad de Quintana Roo y su biodiversidad. Quivera. Revista de Estudios Territoriales 16 (1), 97–125.

Gray, M., 2013. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature, 2nd Edición. Wiley Blackwell.

Gray, M., 2019. Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society. International Journal of Geoheritage and Parks 7 (4), 226–236, https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2000. Conjunto de Datos Vectoriales [formato shapefile ArcGIS]. Escala 1:1 000,000, clave: F16 Mérida. México. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2001. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie

- I. México. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. Red Hidrográfica del Estado de Quintana Roo [formato shapefile ArcGIS]. Escala 1:250,000, claves: F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión, E16-4-7 Chetumal. México. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017. Carta de Aguas Subterráneas del Estado de Quintana Roo [Mapa]. Escala 1:250,000, claves: F16-8 Cancún, F16-10 Mérida, F16-11 Cozumel, E16-1 Felipe Carrillo Puerto, E16-2-5 Bahía Ascensión, E16-4-7 Chetumal. México. INEGI.
- Padilla y Sánchez, R. J., 2007. Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 59 (1), 19–42, http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2007v59n1a3.
- Quintana Roo Speleological Survey, 2000. Quintana Roo Speleological Survey. National Speleological Society, https://qrss.caves.org/qrssesp.htm.
- Real Academia Española (RAE), sin fecha. Ponderar. En Diccionario de la lengua española. Accessed: 2-05-2021 https://dle.rae.es/ponderar?m=form.
- Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology 15 (3), 234–281, https://doi.org/ 10.1016/0022-2496 (77) 90033-5.
- Saaty, T. L., 1980. Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process. Mc Graw-Hill.
- Saaty, T. L., 1996. The Analytic Network Process. En: Saaty, T. L. (Ed.), Decision Making with Dependence and Feedback. RWS Publicaciones, pp. 1–26.
   Saaty, T. L., 2014. Toma de decisiones para líderes. El Proceso Analítico Jerárquico: la toma de decisiones en un mundo complejo. RWS Publicaciones.
- Saaty, T. L., Kearns, K. P., 1985. Analytical Planning. The Organization of System. Pergamon Press.
- Saaty, T. L., Vargas, L. G., 1994. Decision making in economic, political, social, and technological environments with the analytic hierarchy process. Vol. 7.

- RWS publications.
- Salvador, A., 1991. Origin and development of the Gulf of Mexico basin. En: Salvador, A. (Ed.), The Gulf of Mexico Basin. Vol. J. Geological Society of America, p. 0, https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-J.389.
- Serrano Giné, D., 2014. Valoración de la geodiversidad. Validación metodológica en escalas detalladas. Revista de Geografía Norte Grande (59), 65–82, https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000300005.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2005. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: E16-4-7 Chetumal. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006a. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: E16-1 Felipe Carrillo Puerto. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006b. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: E16-2-5 Bahía Ascensión. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006c. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: F16-10 Mérida. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006d. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: F16-11 Cozumel. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006e. Carta Geológico-Minera [Mapa]. Escala 1:250,000, clave: F16-8 Cancún. México. SGM.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007. Carta Geológico-Minera, Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Mapa. Escala 1:1,000,000. SGM.
- Unión Internacional de Ciencias Geológicas, 2022. The First 100 IUGS Geological Heritage Sites. International Union of Geological Sciences, https://iugs-geoheritage.org/.
- Zakharovskyi, V., Németh, K., 2021. Quantitative-Qualitative Method for Quick Assessment of Geodiversity. Land 10 (9), 946, https://doi.org/10.3390/land10090946.

#### This article accompanies the following material:

Static map: 10.22201/igg.25940694e.2023.1.99.229