

Relación entre la geodiversidad de Quintana Roo y su biodiversidad

Relationship between geodiversity and biodiversity in Quintana Roo

Patricia Fragoso-Servón*

Alberto Pereira*

Oscar Frausto*

Francisco Bautista**

Recibido: diciembre 09 de 2013

Aceptado: febrero 20 de 2014

Resumen

Para calcular la geodiversidad, se utilizó un modelo aditivo simple de categorías de diversidad temática considerando cuatro aspectos relacionados con la heterogeneidad del terreno: la geología, el relieve, los suelos y la hidrología. La geodiversidad se manifiesta como un bandeo que corre de norte a sur; la porción costera con valores de geodiversidad media a muy alta, la porción central en donde se alternan valores de media a muy baja y en la porción occidental valores altos y muy altos. Esta geodiversidad ha permitido el desarrollo de una diversidad biológica que se ve reflejada en la gran cantidad y ubicación de las áreas naturales protegidas decretadas en Quintana Roo.

Palabras clave: geodiversidad, toposecuencias, biodiversidad, Karst.

Abstract

A simple additive categories model of thematic diversity was used to calculate geodiversity; considering four aspects related to land heterogeneity: geology, topography, soils and hydrology. Geodiversity manifests as a banding that runs from north to south, the coastal portion has medium to very high geodiversity values, in the central section values moves from medium very low and in the western area are high and very high. This geodiversity has allowed the development of a biological diversity that is reflected in the large number and location of protected natural areas in Quintana Roo.

Keywords: geodiversity, topographic profile, biodiversity, Karst.

* Universidad de Quintana Roo, México.** Universidad Nacional Autónoma de México, México.
E-mail: pfragoso@uqroo.mx.

Introducción

El término geodiversidad fue utilizado por primera vez en 1993 como un equivalente de biodiversidad para describir la variedad de la naturaleza no viva; en años recientes, a nivel internacional, este concepto ha ganado aceptación en el Reino Unido, España, Portugal, Italia, Suiza, Finlandia, Japón, entre otros, como un nuevo paradigma geológico (Gray, 2008a) including a discussion of the origin and evolution of the geodiversity of Planet Earth and whether there are geodiversity hotspots. Although the word 'geodiversity' is a relatively recent introduction, the concept has been used as the basis for selecting geoconservation sites in many countries and is being used increasingly to guide the nomination and assessment process for geological World Heritage Sites. The paper then discusses the aims and methods of geoconservation and how these vary depending on which element of geodiversity is being considered. Finally, the relevance of geodiversity to geotourism, leisure activities and geoparks is explored." , "DOI": "10.1016/S0016-7878(08.

Dentro de las definiciones más integrales se encuentra la de Kozłowski (2004), quien la concibe como la variedad natural en la superficie terrestre, referida a aspectos geológicos, geomorfológicos, suelos, hidrología, así como a otros sistemas generados como resultado de procesos naturales (endógenos y exógenos) y la actividad humana. Gray (2008a) including a discussion of the origin and evolution of the geodiversity of Planet Earth and whether there are geodiversity hotspots. Although the word 'geodiversity' is a relatively recent introduction, the concept has been used as the basis for selecting geoconservation sites in many countries and is being used increasingly to guide the nomination and assessment process for geological World Heritage Sites. The paper then discusses the aims and methods of geoconservation and how these vary depending on which element of geodiversity is being considered. Finally, the relevance of geodiversity to geotourism, leisure activities and geoparks is explored." , "DOI": "10.1016/S0016-7878(08 define a la geodiversidad como el intervalo natural de diversidad de rasgos geológicos (rocas, minerales y fósiles), geomorfológicos (formas del terreno y procesos) y suelos; incluye sus relaciones, propiedades, interpretaciones y sistemas.

La geodiversidad busca analizar la variabilidad y el número de elementos físico-geográficos de una región; se busca establecer clases que permitan distinguir cuando un elemento es diferente de los otros para analizar su

variedad, frecuencia y distribución (Carcavilla, *et al.* 2008), los métodos para la evaluación y valoración de la geodiversidad son escasos; algunos buscan establecer indicadores objetivos a través de escalas cualitativas o cuantitativas con el uso de diversos modelos e índices (Serrano y Ruiz, 2007).

Para evaluar la geodiversidad en diversas regiones de Polonia, la República Checa, Reino Unido y México, diversos autores han considerado, además de la escala, las geoformas, la geología, la hidrología, las variables climáticas, la cobertura y el uso del suelo y la vegetación (Jačková y Romportl, 2008; Parks y Mulligan, 2010; Priego *et al.* 2003).

Una conclusión generalizada es que la mayor heterogeneidad del paisaje se asocia a una alta complejidad geomorfológica y con ella la mayor riqueza de especies biológicas, sin embargo, en ocasiones, la alta riqueza biológica de un territorio puede depender de un factor abiótico particular en condiciones de relativa homogeneidad geólogo-geomorfológica e hidroclimática (Priego *et al.*, 2003). Por ello, uno de los retos de los métodos de estudio de la geodiversidad es dar solución a aquellos lugares que muestran una cierta homogeneidad (litológica, cronoestratigráfica, estructural y geomorfológica) a escala media y, sin embargo, muestran una diversidad notable de rasgos en detalle, como puede ser un macizo kárstico (Carcavilla, *et al.* 2008).

En México no hay estudios sobre la geodiversidad de uno de los macizos kárstico más extensos del país, como lo es la Península de Yucatán. Sin embargo, existen algunas descripciones geológicas, geomorfológicas a escalas mediana y pequeñas que reportan una relativa homogeneidad (Lugo *et al.*, 1992; Lugo, 1990); por su parte, los trabajos de orden biológico y ecológico reportan una alta riqueza e, incluso, dan sustento a un gran número de áreas naturales protegidas por su biodiversidad, como lo ponen de manifiesto los estudios técnicos justificativos que se exigen para sustentar la creación de un Área Natural Protegida.

En el caso de Quintana Roo, se presenta clara la situación planteada por Priego *et al.* (2003) y Carcavilla *et al.* (2008), ya que se manifiesta una relativa homogeneidad geólogo-geomorfológica a escalas medias y pequeñas; no obstante, los estudios biológicos que soportan la creación de áreas naturales protegidas indican una elevada biodiversidad, como lo atestigua su número en el Estado; es decir, a Quintana Roo se le reconoce como una zona de importancia para la conservación de la biodiversidad a pesar de ser considerado como

una zona con un relieve “homogéneo” o de escasa geodiversidad. Este trabajo pretende aportar elementos que permitan actualizar la imagen que se tiene de la Península de Yucatán, al menos en su porción oriental, poniendo de manifiesto la geodiversidad que da soporte a la biodiversidad ya reconocida.

El objetivo de este estudio es identificar y calificar los elementos del relieve, geológicos, hidrológicos y edafológicos como componentes de la geodiversidad que permitan elucidar las relaciones que existen entre la geodiversidad y la biodiversidad en Quintana Roo.

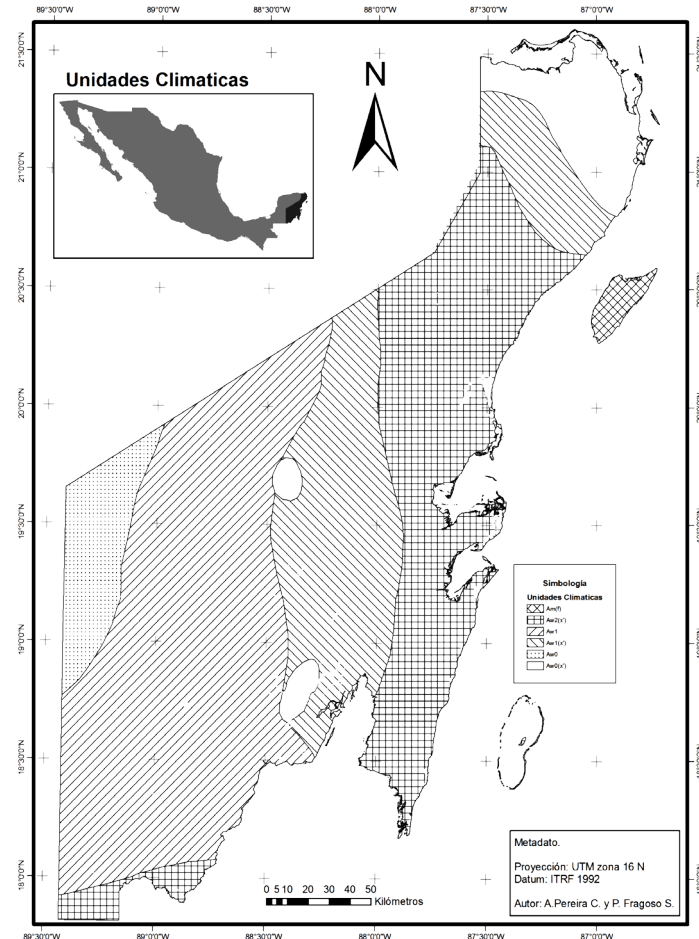
Zona de estudio

La Península de Yucatán en el sureste del país es una extensa plataforma kárstica en cuya porción Este se ubica en Quintana Roo; son pocos los estudios sobre karst en el Estado (García *et al.*, 2000; Frausto e Ihl, 2008; Frausto e Ihl, 2010); algunos de tipo espeleológico e hidrológico dan cuenta de su estructura porosa y del flujo de agua, principalmente subterráneo (Coke, 2004; Ordóñez-Crespo y García-Rodríguez, 2010) como lo atestiguan más de 900 km de galerías subterráneas inundadas y cavernas consideradas entre las más grandes del mundo (QRSS, 2013).

La mayor parte de los mapas topográficos en escala pequeña muestran a la Península de Yucatán como una gran planicie; sin embargo, no es una planicie homogénea, pues en ella existe una amplia diversidad de relieve y de ecosistemas, en dónde se pueden encontrar variaciones horizontales en espacios muy cortos (Lugo, *et al.* 1992; Bautista y Palacio, 2005; Bautista *et al.*, 2011). Las formas del relieve en Quintana Roo han sido escasamente estudiadas a escalas mayores a 1:250,000; algunos estudios que han considerado la diferenciación altimétrica, la inclinación del terreno y su vínculo con los procesos geomorfológicos en algunas áreas del Estado a escala media han mostrado una heterogeneidad mayor que la presentada por las cartas topográficas (Héraud 1996; Goldacker y Frausto, 2005; Frausto *et al.* 2006; Ihl *et al.* 2007; Beddows *et al.* 2007; Frausto e Ihl, 2008; Aguilar *et al.*, 2010; Frausto e Ihl 2010, Bautista *et al.*, 2011).

En la mayor parte de Quintana Roo, el clima dominante, de acuerdo con la cartografía de INEGI (2005a), es el subtipo cálido subhúmedo con régimen de lluvias de verano (Aw); la única variante se presenta en la isla de Cozumel con un tipo de clima cálido húmedo con lluvias abundantes en verano con una estación seca corta en la mitad fría del año (Am(f)) (figura 1).

Figura 1. Tipos de Climas en Quintana Roo



Archivo: Geodiversity_climas.png

La elevada cantidad de precipitación y la gran capacidad de infiltración del terreno provocan que la mayor cantidad de agua, cerca del 80%, se mueva a nivel subterráneo y el restante 20% se distribuya entre lo que intercepta la vegetación, el escurrimiento superficial y la captación directa de los cuerpos de agua: áreas de inundación, lagunas y cenotes (Universidad de Quintana Roo, 2004). La reducida pendiente topográfica propicia que los escurrimientos superficiales sean pocos, de bajo caudal y de muy corto recorrido a excepción del río Hondo en el sureste.

En el Estado se encuentran presentes 12 grupos de suelos según la carta edafológica del INEGI (2005): Leptosoles, Phaeozems, Vertisoles, Gleysoles, Luvisoles, Solonchaks, Arenosoles, Regosoles, Histosoles, Nitisoles, Cambisoles y Fluvisoles. Los Leptosoles ocupan la mayor superficie y se caracterizan por ser delgados y pedregosos; los Phaeozems son ricos en materia orgánica y se ubican principalmente en el occidente del Estado junto con los Vertisoles (ricos en arcillas) y Gleysoles que se distinguen por tener mal drenaje; los suelos rojizos en el Estado son principalmente Luvisoles, Cambisoles y Nitisoles que predominan en la porción Centro-Oeste. En las zonas costeras se presentan los suelos jóvenes, como los Regosoles, Arenosoles y Solonchaks, que presentan un alto contenido de sales; en menor porcentaje, se encuentran los Histosoles (suelos orgánicos y Fluvisoles (asociados a corrientes superficiales).

Materiales y métodos

Existe una variedad limitada de metodologías que han sido usadas para identificar y medir la geodiversidad, ya sea para su propio estudio o para su uso en la toma de decisiones sobre el manejo del territorio, de cualquier forma, muchas de las técnicas de medida de la geodiversidad se han derivado de sus equivalentes para el estudio de la biodiversidad (Benito-Calvo *et al.*, 2009; Cantú *et al.*, 2004; Ibáñez y García, 2002; Pike, 2000; Xavier-da-Silva y de Carvalho-Filho, 2004; Zwoliński y Stachowiak, 2012).

Para el presente trabajo, se optó por usar la riqueza de atributos por unidad de estudio de Jačková y Romportl (2008); en este caso, las unidades sobre las cuales se evaluó la riqueza de atributos fueron definidas por la zonificación resultante del análisis de alturas relativas de las formaciones de terreno para el Estado completo.

Para la elaboración de la carta síntesis de los atributos hipsométricos, se usaron las 80 cartas topográficas del INEGI (2005c) que cubren la superficie del Estado en formato vectorial; se unieron y se corrigieron las inconsistencias derivadas de la unión de las cartas.

A partir de la carta síntesis se construyó un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) por interpolación en formato raster con resolución horizontal 1:50000 y resolución vertical de 10 m (Chen y Yue 2010; Takagi y Shibasaki 1996; Yue *et al.*, 2007); este MDE fue utilizado para hacer la medición de las alturas relativas de las formaciones de terreno detectadas con la técnica propuesta por Priego *et al.* (2010); la representación resultante en m/km² de las formaciones

sirvió para construir una zonificación del territorio del Estado como base para la asignación de sus diferentes atributos.

Una vez establecidas las unidades territoriales para calcular la geodiversidad, se utilizó un modelo aditivo simple de categorías de diversidad temática considerando cuatro aspectos relacionados con la heterogeneidad del terreno; el modelo se expresa como:

$$G = D_g(250) + D_e(250) + D_r(50) + D_h(50)$$

Donde:	D_r = diversidad del relieve
G = Geodiversidad	D_h = diversidad hidrológica
D_g = diversidad geológica	250 = resolución espacial, en metros
D_e = diversidad edafológica	50 = resolución espacial, en metros

La geología fue simplificada al conteo de las estructuras geológicas diferentes que se encuentran reportadas dentro de cada una de las zonas definidas a partir del relieve; se utilizó la información correspondiente a la edad aproximada de las estructuras geológicas identificadas y reportadas en la cartografía 1:250000 del INEGI (2000), contabilizando el número de formaciones para cada una de las zonas inicialmente definidas (cuadro 1).

La diversidad edafológica por zona se procesó de manera similar a la información geológica, dado que la cartografía 1:250000 del INEGI (2005b) utiliza un sistema de representación, en el cual se consideran los tres grupos de suelos más abundantes o dominantes para cada polígono, pero no especifica la superficie o porcentaje ocupado por cada uno (Cotler, 2003; Jiménez-Osornio *et al.*, 2004); además, se tomaron los grupos de suelo primarios o de mayor dominancia como identificadores, contabilizándose el número de grupos primarios de suelos diferentes en cada zona (cuadro 1).

La diversidad del relieve definida a partir de un análisis de las alturas relativas que tienen las formaciones del terreno para cada punto del Estado da una primera medida de la heterogeneidad del territorio y permite la asignación de una escala valorativa de su diversidad o heterogeneidad en función de la diferencia de alturas por unidad de área (Zwoliński, 2010; Zwoliński y Stachowiak, 2012); los intervalos utilizados se presentan en el cuadro 1.

La hidrografía se trabajó con base en los registros existentes en la cartografía del INEGI (2005c) de cuerpos de agua y depresiones con inundaciones permanentes y fue enriquecido con observaciones de campo, con otras fuentes cartográficas como imágenes de satélite temáticas para identificar láminas de agua expuestas en distintas épocas del año para confirmar la inundación permanente dada la fuerte karsticidad del Estado (Frausto e Ihl, 2010) y la prácticamente nula existencia de corrientes superficiales permanentes. La jerarquización se hizo con base en los tipos y los números de cuerpos de agua o depresiones inundadas por cada una de las zonas definidas por el relieve (cuadro 1).

Cuadro 1. Categorizaciones de la diversidad de los atributos del territorio (diversidades temáticas)

Categoría	Puntaje	Atributo
Geología		
Muy Alta	5	Más de 4 formaciones geológicas en la unidad
Alta	4	4 formaciones geológicas en la unidad
Media	3	3 formaciones geológicas en la unidad
Baja	2	2 formaciones geológicas en la unidad
Muy Baja	1	1 formación geológica en la unidad
Edafología		
Muy Alta	5	8-9 tipos de suelo en la unidad
Alta	4	6-7 tipos de suelo en la unidad
Media	3	4-5 tipos de suelo en la unidad
Baja	2	2-3 tipos de suelo en la unidad
Muy Baja	1	1 tipo de suelo en la unidad
Altura relativa		
Muy Alta	5	Altura relativa de 60 a 250 m/km ²
Alta	4	Altura relativa de 30 a 60 m/km ²
Media	3	Altura relativa de 15 a 30 m/km ²
Baja	2	Altura relativa de 2.5 a 15 m/km ²
Muy Baja	1	Altura relativa < 2.5 m/km ²
Hidrología		
Muy Alta	5	Más de 4 tipos de cuerpo de agua expuesto en la unidad
Alta	4	4 tipos de cuerpo de agua expuesto en la unidad
Media	3	3 tipos de cuerpo de agua expuesto en la unidad
Baja	2	2 tipos de cuerpo de agua expuesto en la unidad
Muy Baja	1	0 – 1 tipo de cuerpo de agua expuesto en la unidad

La geodiversidad por adición de sus cuatro componentes puede tener valor mínimo de 4 y máximo de 20; para fines de la expresión cartográfica

simplificada del valor de geodiversidad, se dividió la gama completa de geodiversidades en cinco subintervalos con el algoritmo de Jenks (Jenks, 1977), el cual genera la siguiente clasificación: valores de 4 a 5 muy baja, de 6 a 7 baja, 8 a 9 media, 10 a 12 alta y 13 a 17 muy alta.

Para simplificar la evaluación visual de los elementos sobre el MDE, se elaboraron tres perfiles topográficos (toposecuencias) con el objetivo de mostrar las variaciones de las alturas, tipo de superficies (plana, cóncava o convexa) y el tipo de pendientes (horizontal a vertical), siguiendo para ello los criterios de Ortiz (1988) y De Pedraza (1996); asimismo, se plasmaron en las gráficas los resultados correspondientes a las diversidades físicas (geológica, edafológica altimétrica e hidrológica) registradas y a la geodiversidad total como suma de ellas.

Para la información de la diversidad biológica, se utilizó como un indicador genérico no cuantificado la carta de uso del suelo y vegetación serie IV del INEGI (2009), la cual está basada en información del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009 con actualizaciones a 2010 y a 2011 (Comisión Nacional Forestal, 2009) en tanto se elaboran estudios más específicos para cubrir estos aspectos.

Sobre estos elementos (la geodiversidad y la cobertura vegetal), se visualizaron los límites de las ANP en el Estado para hacer una estimación de la diversidad de paisajes, de cobertura biológica y de geodiversidad que están abarcando y establecer un juicio no métrico acerca de la pertinencia de dichas ubicaciones para estas ANP. Todos los procesos de identificación, cuantificación o asignación de atributos, se llevaron a cabo en un sistema de información geográfica manejado con ArcGIS® 9.3.

Resultados

Análisis de geodiversidad

Diversidad geológica

En la porción norte y de menor altura del Estado (figura 2A) se registra una baja diversidad geológica debido a la gran extensión que tienen los afloramientos de las formaciones del Terciario; esta gran zona se encuentra limitada hacia la costa por una franja que va de los 1000 a 1500 m de ancho en su parte sur hasta los 20 km en la parte norte. Hacia el extremo norte abundan depósitos del Cuaternario, lo cual incrementa la diversidad geológica por unidad.

Las zonas que presentan categorías muy alta y alta se ubican principalmente en la parte sur y oeste en donde se encuentran las formaciones geológicas más antiguas correspondientes a diferentes periodos del Terciario, combinadas con depósitos del Cuaternario, principalmente de tipo fluvial y lacustre en los valles y partes bajas de las cuencas (Universidad de Quintana Roo, 2004); en zonas costeras y en la isla de Cozumel, se registra una gran mezcla de espacios con depósitos del Cuaternario de tipo eólico, litoral, lacustre y palustre, mezcla que genera valores altos de diversidad geológica. Del centro y hacia el noroeste, donde la formación geológica expuesta continua hacia el Estado de Yucatán, se ubican las zonas con diversidades geológicas en los niveles de baja y muy baja.

Diversidad edafológica

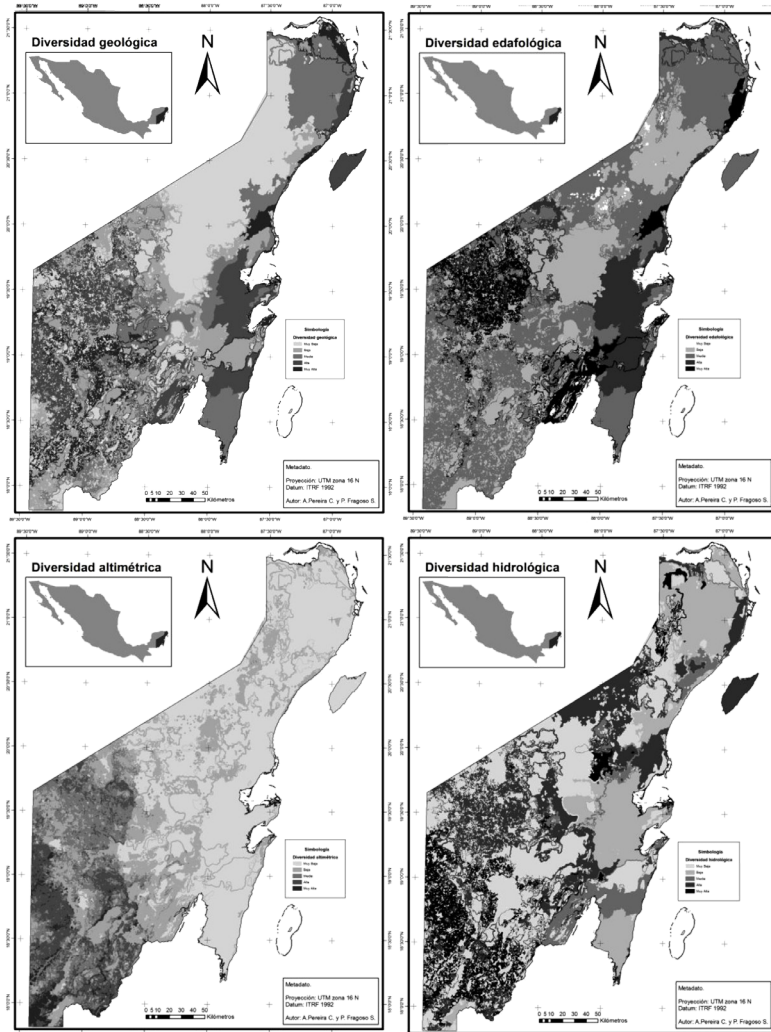
Considerando los distintos grupos de suelos que se encuentran en Quintana Roo, la figura 2B muestra las zonas con las cinco categorías de diversidad; destacan tres zonas con valores alto y muy alto: las zonas centro oeste y sur coinciden con zonas en las cuales las diversidades altimétrica, geológica e hidrológica son medias y altas; en la segunda zona la diversidad altimétrica disminuye hacia planicies con ondulaciones y hondonadas y la tercera zona se encuentra asociada con la zona de cuerpos de agua del Sistema Lagunar Bacalar al sur-sureste del Estado y sus sistema de descargas que se ramifica hasta la porción costera. En la zona centro y hacia la costa en donde se encuentran planicies de inundación se presentan categorías media y alta. Se observan dos zonas con diversidad baja de suelos en el centro del Estado y un poco más al norte en donde los Leptosoles ocupan la mayor parte del área y se encuentran asociados con los sitios de menor diversidad hidrológica igualmente.

Diversidad de alturas relativas

En Quintana Roo, los registros de altura van desde 0 msnm en las zonas costeras hasta un máximo de 380 msnm en el extremo sur. En la figura 2C puede apreciarse la diversidad de alturas relativas que hay en el Estado; se observa que se distribuyen en forma de franjas paralelas desde la zona costera con muy baja energía del relieve (categoría 1); aumenta hacia el oeste y sur hasta el extremo suroeste en la frontera con Belice y Guatemala en donde se registran los valores más altos. Entre la transición de la zona media a alta, se aprecia un área donde se alternan zonas de categorías baja, media e incluso alta. Cada uno de los diferentes espacios coincide parcialmente con los pisos altimétricos descritos; sobresale en esta distribución una serie de franjas

estrechas que corresponde a pequeños espacios en los cuales la combinación de formas del terreno incrementa la geodiversidad de manera semejante a como se incrementa la diversidad biológica en los ecotonos y pone de manifiesto zonas de transición entre espacios con diversidad relativamente homogénea.

Figura 2. Diversidad geológica, edafológica, altimétrica e hidrológica de Quintana Roo



- A.** Diversidad geológica con base en el número de tipos de materiales superficiales por edades.
B. Diversidad edafológica con base en el número de tipos de suelo por unidad morfométrica.
C. Diversidad altimétrica o energía del relieve con base en las alturas relativas de las formas de terreno.
D. Diversidad hidrológica con base en número y tipo de cuerpos de agua y depresiones con inundación permanente

Archivos: Geodiversity_divgeo.png, Geodiversity_diveda.png, Geodiversity_divalt.png y Geodiversity_divhid.png.

Diversidad de la hidrología superficial

Estudiando los cuerpos de agua superficiales, en la figura 2D se observa que cerca del 50% del territorio se encuentra dentro de las categorías de diversidad muy alta y alta, que se distribuyen principalmente en la zona oeste, central, norte y en algunas zonas costeras; en estas zonas hay abundancia de cuerpos de agua característicos de las zonas kársticas, como los llamados cenotes y lagunas, los cuales en su mayoría se encuentran conectados al manto freático en la parte central del Estado y hacia el norte; en la planicie se encuentran grandes espacios con diversidades bajas, coinciden con espacios escasamente alterados de las formaciones geológicas del Terciario y con zonas de inundaciones permanentes o semipermanentes como las que se encuentran al oeste de las bahías.

Diversidad biológica

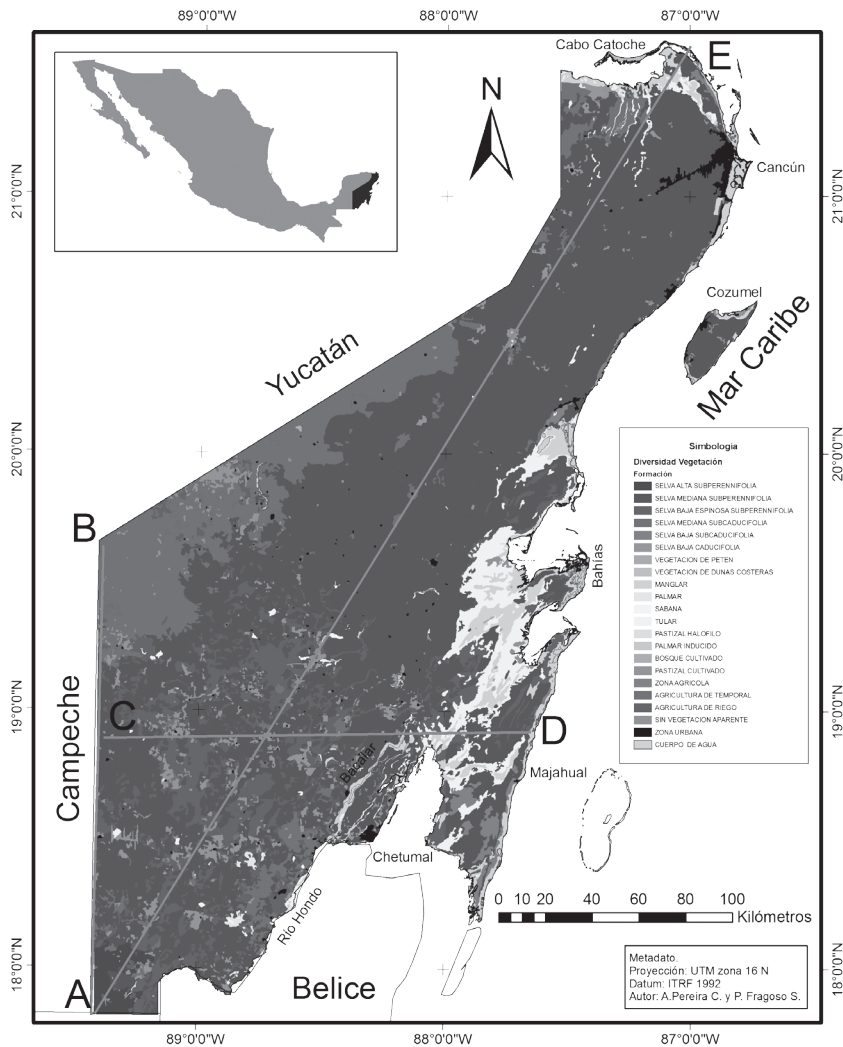
Quintana Roo es uno de los Estados del país con la vegetación mejor conservada; de acuerdo con INEGI (2009), se encuentran presentes los tres tipos de selva (alta, mediana y baja), vegetación característica de zonas de inundación (palmar, tular, manglar), zonas de pastizales y zonas cultivadas, principalmente (figura 3).

Las zonas con selva alta subcaducifolia se ubican en el extremo suroeste, en la colindancia con Campeche, Guatemala y Belice; la selva mediana ocupa la mayor parte del territorio como una franja central a lo largo de la superficie del Estado, ya que hacia el oeste, en la colindancia con Yucatán, hacia el norte y hacia las costas, se desarrolla la selva baja; esta vegetación también se encuentra en forma de manchones en el centro-sur.

En las áreas cercanas a la costa se presenta la vegetación característica de las zonas de inundación con y sin influencia marina, como el palmar, el tular y los manglares, sobresaliendo en la zona norte y en la parte centro (Zona de las Bahías); en esta última destaca la llamada vegetación de Peten.

Formando manchones distribuidos en toda la superficie estatal, se ubican zonas de pastizales, principalmente cerca de las zonas agrícolas. Quintana Roo no es un Estado con mucha superficie cultivada; las áreas agrícolas se localizan en el centro-oeste y principalmente en el sur. El Estado cuenta con 23 Áreas Naturales Protegidas (ANP) que representan el 25.3% de su superficie y se han propuesto 12 áreas más para ingresar a la lista (Prezas, 2011 "publisher": "Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).

Figura 3. Cobertura de vegetación natural y antrópica



Archivo: Geodiversity_vegetal.png

Perfiles topográficos

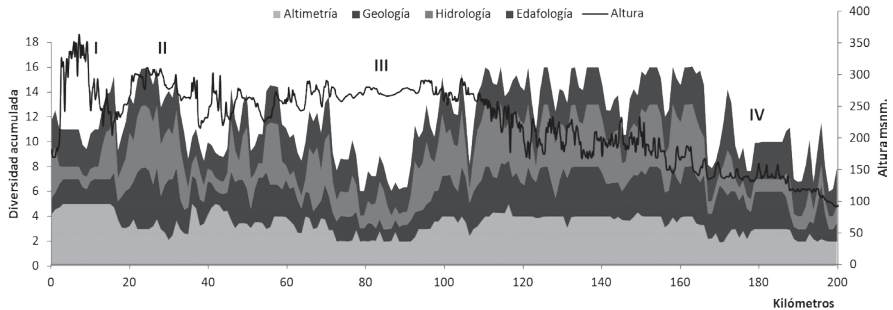
Para el análisis de las relaciones antes descritas, se construyeron tres perfiles altimétricos del territorio, los cuales permiten la comparación simultánea de los elementos componentes de la geodiversidad y de la vegetación para cada punto de los transectos seleccionados.

El primer perfil topográfico corre de sur a norte sobre el límite occidental del Estado (figura 3 A-B); a lo largo de los 200 km, se puede observar que las

alturas varían de sur a norte, de 350 hasta 80 msnm (figura 4); atraviesa por las tres formaciones geológicas más antiguas del Estado y se identifican cuatro grandes estructuras.

La primera y la segunda sección (I y II) en el sur se distinguen por su homogeneidad y gran altura; la tercera (III) se constituye de un bloque de hundimiento en donde se encuentran la mayor variedad de tipos de vegetación en un clima subhúmedo; la cuarta (IV), en el norte, se caracteriza por ser una planicie elevada debido a la intensidad de karstificación del relieve con siete tipos de vegetación y la mayor cantidad de grupos de suelos, los de mayor profundidad. La diversidad hídrica va de media a baja y está representada por cuerpos de agua en las partes bajas de las formaciones, principalmente en pequeños valles de disolución y plegamiento.

Figura 4. Perfil topográfico y de unidades de geodiversidad A-B



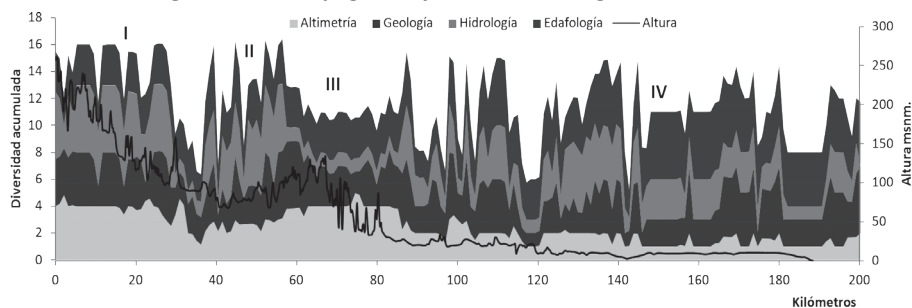
Selva alta subperennifolia y Selva baja espinosa	Selva alta subperennifolia, Selva mediana subperennifolia, Selva mediana subcaducifolia, Selva baja subcaducifolia, Selva baja subperennifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal y Tular	Selva Mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Selva baja subcaducifolia, Selva baja espinosa subperennifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal y Tular
Phaeozems, Leptosoles, Vertisoles, Gleysoles	Leptosoles, Phaeozems, Vertisoles, Gleysoles	Leptosoles, Vertisoles, Gleysoles, Phaeozems, Luvisoles, Nitisoles
Aw ₂ (x'): Caliente subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos con más de 10.2% de lluvia invernal	Aw ₁ Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, entre 5 y 10.2% de lluvia invernal	Aw ₀ Caliente subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, entre 5 y 10.2% de lluvia invernal

El segundo perfil topográfico atraviesa a lo ancho el Estado de oeste a este (figura 3 C-D), desde la parte media del límite con Campeche hasta la costa a la altura de Majahual (cerca de 250 km); se observa un cambio de alturas más abrupto (figura 5) en el extremo oeste de una altura de 250 msnm (I), después de 75 km hay un descenso mayor hasta los 50 msnm (III) y posteriormente va casi recta hasta la costa (IV). Las formaciones geológicas son formaciones del Terciario, las más antiguas se presentan en el oeste (I y II) y las formaciones recientes en la costa.

En la zona de mayor altitud existen cuerpos de agua asociados a cuencas cerradas, pero a medida que se acerca a la costa se presentan importantes zonas con cuerpos de agua, como la zona de Bacalar y zonas de inundación asociados a exposiciones del manto freático que en la parte costera del Estado se encuentra a poca profundidad.

En la zona por debajo de los 50 msnm (IV), en donde el clima es más húmedo, se presenta la mayor variedad de tipos de vegetación al incorporarse aquella que es característica de las zonas planas y con áreas con inundación temporal y permanente e igualmente en esta zona se encuentra la mayor variedad de grupos de suelos.

Figura 5. Perfil topográfico y de unidades de geodiversidad C-D



Selva mediana subperennifolia y Selva mediana subcaducifolia	Selva mediana subperennifolia, Selva mediana subcaducifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizales cultivados y Agricultura de temporal	Selva mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Pastizales cultivados, Agricultura de temporal, Tular y Manglar	Selva mediana subperennifolia, Selva baja subcaducifolia, Tular, manglar, Selva baja subperennifolia y Palmer inducido
Leptosoles, Phaeozems Vertisoles	Phaeozems, Leptosoles, Vertisoles, Gleysoles, Luvisoles	Leptosoles, Gleysoles, Vertisoles, Luvisoles, Regosoles, Histosoles	Leptosoles, Gleysoles, Solonchaks, Histosoles, Regosoles, Arenosoles
Aw_0 Caliente subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, entre 5 y 10.2% de lluvia invernial	Aw_1 Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, entre 5 y 10.2% de lluvia invernial	$Aw_1(x')$ Caliente subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con más de 10.2% de lluvia invernial	$Aw_2(x')$ Caliente subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos con más de 10.2% de lluvia invernial

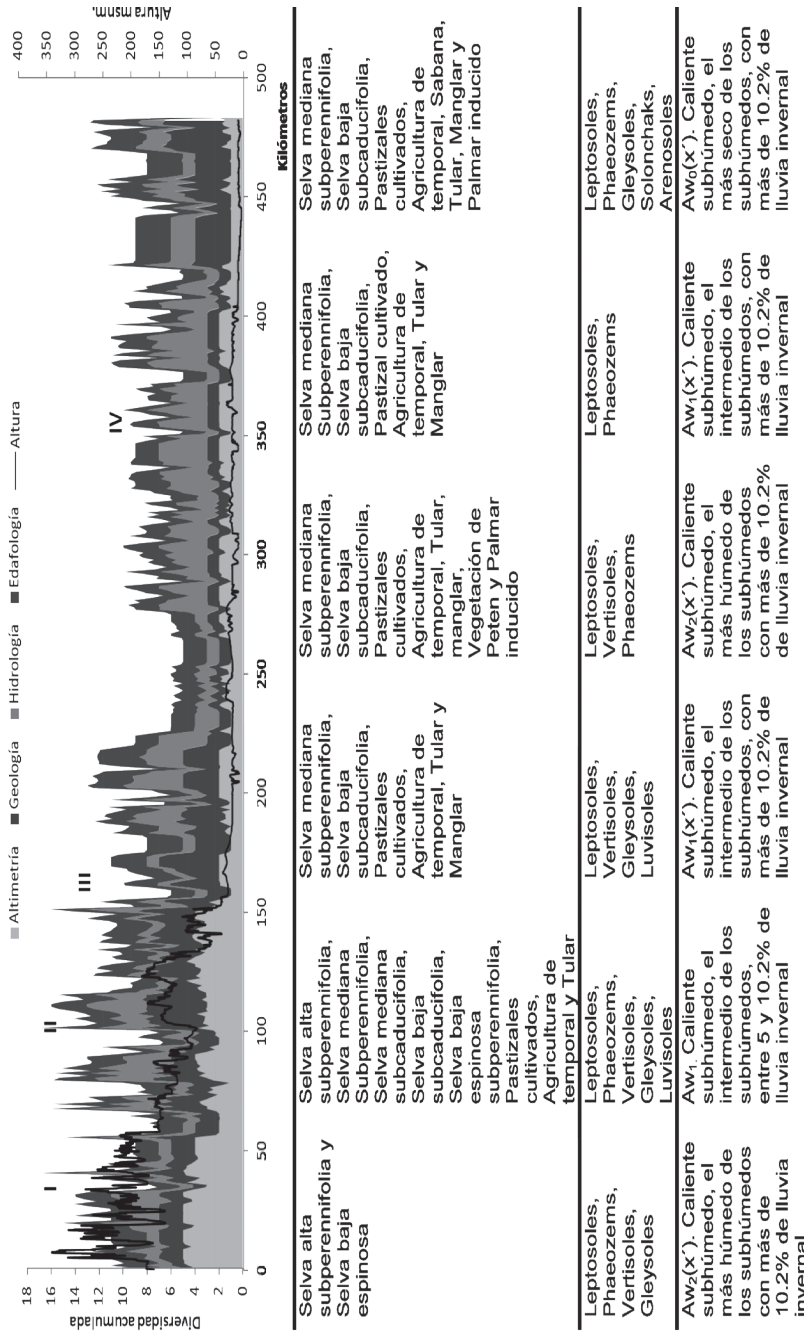
El tercer perfil topográfico va en diagonal a lo largo del Estado (figura 3 A-E), con cerca de 500 km, de suroeste a noreste. Se observa que el descenso de altura se realiza en dos partes (figura 6); la primera, del inicio hasta los primeros 50 km, y la otra después de los 100 km; también es notorio que cerca del 75% del área está por debajo de 50 m de altura. Las formaciones geológicas más antiguas se encuentran en la parte sur y las más recientes del Cuaternario en el extremo norte.

En cuanto a la diversidad hidrológica, presenta dos zonas particularmente interesantes; la primera de ellas en el suroeste, donde se aprecian cuerpos

de agua de pequeña extensión localizados entre los plegamientos y lomeríos bajos. La segunda zona corresponde a la parte baja (zona IV), en donde hay una alta diversidad hidrológica correspondiendo a la presencia principalmente de cenotes que se encuentran asociados a los sistemas de fallamientos.

La mayor variedad de vegetación se presenta en la zona II donde se alternan lomeríos y valles y en la zona IV en los últimos 400 km, en el noreste y hacia la costa donde hay abundantes zonas de inundación con presencia de selvas bajas, sabanas, tulares y manglares (figura 3). En estas dos zonas también se presentan la mayor cantidad de grupos de suelos, en la zona II suelos con mayor profundidad (Phaeozems y Vertisoles y en la zona IV suelos con influencia costera (Solonchaks y Arenosoles).

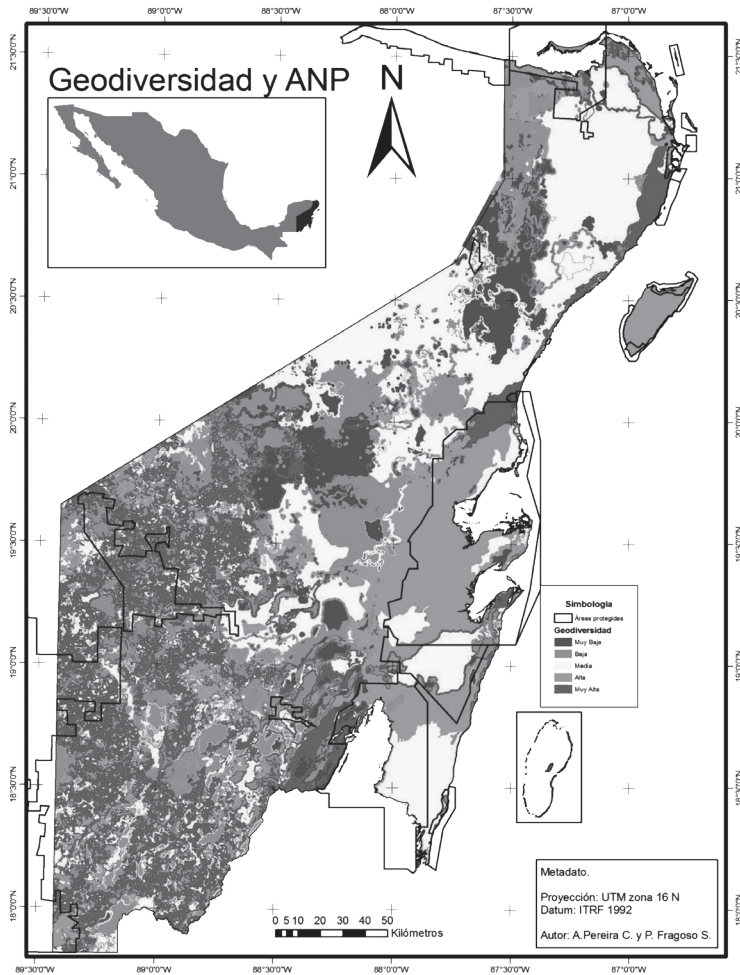
Figura 6. Perfil topográfico A-E



Geodiversidad

Calculadas las diversidades específicas por cada uno de los atributos, se diferenció la geodiversidad en cinco categorías, a partir de las cuales se construyó la representación de la figura 7. Se observa que la mayor parte del territorio se encuentra dentro de las categorías que van de media a muy alta, con una franja de poco más de 40 km de ancho de bordes irregulares y que corre de norte a sur por el centro del estado con diversidades bajas y muy bajas.

Figura 7. Geodiversidad y Áreas Naturales Protegidas de Quintana Roo



De este modo, se puede apreciar que la geodiversidad en Quintana Roo, construida a partir del relieve, la geología, la hidrología y los suelos, muestra tres grandes áreas: una zona al oeste con valores de geodiversidad de media

a muy alta, una zona intermedia en la parte central en donde los valores de geodiversidad van de media a muy baja y una tercera zona en la parte de menor altura y hacia la zona costera del Estado, en donde la geodiversidad tiene valores nuevamente de media a muy alta.

La zona con mayor geodiversidad en la porción oeste es la zona geológica más antigua del Estado; aquí el relieve con alturas por encima de los 70 msnm permite la formación de zonas erosivas y de acumulación que desarrollan diversos suelos y zonas de acumulación y escurrimientos de agua, lo cual conlleva a un cierto tipo de diversidad de la vegetación.

Otros sitios con geodiversidad alta se encuentran más cercanos a la costa; uno de ellos, asociado al Sistema Lagunar Bacalar al sureste del Estado, en donde la mezcla de suelos y la exposición de materiales parentales cerca de la superficie por el fracturamiento originó el sistema, así como la deposición compleja de materiales relacionada con abundancia de agua, ha formado un complejo en el cual la riqueza de suelos es mayor que en las áreas vecinas; el segundo de ellos es un sitio cercano a la costa en la porción norte del Estado, en donde la asociación de un sistema de hondonadas bajas al sistema de lagunas costeras con la influencia de los procesos litorales han creado igualmente una zona de alta diversidad edafológica. Los espacios que se encuentran hacia el centro y norte del Estado presentan de manera preferencial geodiversidades medias y bajas, destacando algunas áreas con geodiversidades muy bajas.

La zona intermedia entre la zona de altitud mayor a 70 msnm y la zona con altitud menor a 20 msnm presenta los valores de geodiversidad de bajos a muy bajos; esta zona homogénea se encuentra sobre la formación geológica más extensa del Estado (del Plioceno), lo suficientemente alejada de la costa para no tener fuerte influencia de ella y con una pendiente tal que permite que el agua escurra y no se acumule, por lo cual no hay tanta abundancia de cuerpos de agua expuestos como en otras zonas.

La zona al este, a pesar de tener menores alturas, presenta nuevamente geodiversidad de media a muy alta; hay una gran cantidad de cuerpos de agua formados por la disolución de la roca calcárea y la poca profundidad del manto freático; la misma disolución de la roca permite la formación de formas negativas de relieve en las cuales la acumulación de materiales permite el desarrollo de suelos con características diferenciadas convirtiéndola en una zona rica en depósitos aluviales, eólicos y lacustres. En las zonas cercanas a

la costa, los depósitos lacustres, palustres y litorales desarrollan ambientes de transición mar-tierra como las zonas de humedales en donde se presentan suelos y vegetación característicos, todo ello contribuye a la elevada geodiversidad de la zona de menor altura.

La zona costera, que va desde la parte central hacia el norte, tiene una geodiversidad muy alta por la combinación de valores altos en los aspectos geológicos, hidrológicos y edafológicos y no por su diversidad altimétrica, del centro hacia el sur, la geodiversidad es media y alta; aquí se encuentra un gran espacio relativamente homogéneo con valores de diversidad altimétrica escasos, pero que al ser planicies de inundación marina costeras presentan diversidades geológicas en superficie de medias a altas y favorecen la ocurrencia de diferentes grupos de suelos que les permiten alcanzar grados semejantes de diversidad en el aspecto edafológico.

La riqueza y la diversidad biológica en la escala usada para este trabajo manifiesta la existencia de un mosaico de formaciones vegetales particularmente rico con más de diez clases diferentes, diversidad que se vería incrementada si se revisaran las composiciones específicas por comunidad, tal como lo demuestran los estudios sobre diversidad ecológica de la región y la gran cantidad de endemismos reportados para la Península de Yucatán (CONABIO, 1995; Orians *et al.*, 1995; Ibarra, *et al.*, 1996; Ochoa y Flores, 2006; Gutierrez *et al.*, 2011; Escalante *et al.*, 2007a; Escalante *et al.*, 2007b).

Las partes central y hacia el sur del Estado muestran una gran heterogeneidad en la vegetación, en donde pueden hallarse desde formaciones de selva mediana hasta selvas espinosas subcaducifolias en las laderas expuestas y selvas bajas inundables combinadas con vegetación de humedales en los bajos y cauces temporales y extraordinarios, tal como lo reportan para Campeche en la zona de bajos inundables Palacio *et al.* (2012).

Discusión

La utilización del término geodiversidad es mayor cada día, pero las metodologías para su evaluación y valoración aún son limitadas. Hasta el momento, la mayor parte de los estudios utilizan métodos cualitativos en los cuales la delimitación de las unidades geomorfológicas y el inventario de los componentes de la geodiversidad (geología, suelos, relieve e hidrología) son valorados en algún intervalo de manera frecuentemente subjetiva. En este trabajo, para reducir la subjetividad de la calificación,

se utilizó una escala de cinco clases en cada uno de los componentes de la geodiversidad, basada en el número de atributos diferentes de cada uno de los componentes que van de muy baja a muy alta.

Este enfoque permite comparar en la misma escala semicuantitativa atributos que pueden tener un número variable de manifestaciones y permite comparar las diferentes zonas del Estado de manera objetiva, independientemente de la percepción que se tenga de ellas.

Si bien existen índices y modelos más finos para medir la diversidad que la simple riqueza de atributos, ellos requieren de información que en muchos casos no existe para el territorio nacional.

La cuantificación específica que se requiere de cada una de las distintas manifestaciones de un atributo para tener un indicador cuantitativo de la dominancia de una de esas manifestaciones sobre las otras y un indicador de la homogeneidad del espacio muestreado respecto a ese atributo específico no se tiene para muchos de los atributos.

Un ejemplo específico es el caso de la información sobre suelos, la cual se tiene disponible en polígonos relativamente amplios, para los cuales INEGI reporta los grupos de suelos que sobrepasen el 20% de cobertura al interior de la unidad y hasta tres de ellos. En un espacio dado, hay tres grupos de suelos, y cada uno de ellos ocupa al menos el 20% de la superficie de la unidad; sin embargo, esta aproximación deja como elemento libre el 40% de la superficie asumiendo una distribución equitativa de la superficie entre los grupos reportados y generando una gran incertidumbre.

En comparación, el conteo simple del número de grupos proporciona una mayor certeza, ya que, independientemente de su abundancia relativa, se tiene la seguridad de su existencia, lo cual permite ganar certidumbre en los análisis a costa de la profundidad y del detalle de la información, que de todas formas no están disponibles.

Considerando las limitantes para cada uno de los atributos, se optó por usar un análisis geomorfométrico del terreno como la base para la asignación del resto de los atributos. El análisis de los componentes de la geodiversidad en el Estado se llevó a cabo con base en la información disponible; la cobertura vegetal, la geología y los suelos se encuentran a escala 1:250000 y el relieve y la hidrología a 1:50000.

Éste es un problema cuando se quieren hacer estudios a nivel estatal en el país sobre calidad y certidumbre, escala y disponibilidad de información; la solución en esta investigación fue iniciar con las categorías de baja resolución geología y suelos para identificar sus variaciones y posteriormente señalar los atributos más finos, relieve e hidrología.

Se llevó a cabo el análisis morfométrico para medir con mayor exactitud la heterogeneidad espacial que subyace esa imagen de relativa homogeneidad que se manifiesta en escala 1:250000. En este trabajo, se utiliza un indicador bidimensional para resaltar e identificar unidades espaciales que de otra forma serían prácticamente indistinguibles, y se presenta como propuesta complementaria al método tradicional de identificación de unidades.

La imagen de la Península de Yucatán como una plataforma kárstica relativamente homogénea cambia cuando se analizan las características fisiográficas y biológicas a escalas medias y grandes. La energía del relieve de la Península de Yucatán es escasa cuando se compara con otras zonas del país o del mundo, en las cuales las formaciones volcánicas generan estructuras y paisajes más agrestes.

Sin embargo, no se están comparando dos objetos de la misma naturaleza, ya que la Península es básicamente un gran depósito sedimentario de carácter platfórmico en tanto que otras regiones son producto de procesos orogénicos más intensos y de mayor energía; por otro lado, la comparación se hace en términos de criterios de clasificación desarrollados para espacios de escala nacional o continental, no a escala regional.

Como ejemplo, se puede citar la geodiversidad reportada de los Cárpatos polacos para los que se considera que una estructura con más de 50 m de altura relativa es de "muy alta geodiversidad" (Zwoliński, 2010); en este trabajo, orientado exclusivamente a Quintana Roo, este valor es de "alta geodiversidad", ya que en el Estado encontramos formaciones de terreno reconocibles con alturas relativas de más de 100 m que corresponden a la clase de "muy alta geodiversidad".

De tiempo atrás, de manera tanto coloquial como técnica se ha venido considerando que este gran macizo kárstico de la Península de Yucatán es una estructura relativamente homogénea, como lo refieren Lugo *et al.* (1992). Esta percepción que se basa en análisis a escalas pequeñas, es decir de escaso detalle, queda claramente invalidada por los niveles de diversidad encontrados en los cuatro aspectos analizados en el presente estudio; la imagen de homogeneidad y la existencia de un alto porcentaje del territorio estatal declarado Área Natural Protegida (ANP), como reporta Prezas (2011) “publisher”: “Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, son conceptos que se contradicen.

De acuerdo con diversas observaciones de autores, como Escalante *et al.* (2007), un ambiente poco diverso con condiciones climáticas relativamente homogéneas no conduce a la existencia de dicha riqueza y biodiversidad. Según Burnett *et al.* (1998) y Nichols *et al.* (1998), “los paisajes compuestos de condiciones abióticas espacialmente heterogéneas deberían proveer una gran diversidad de nichos potenciales para plantas y animales comparados con los paisajes homogéneos”. La relativa estabilidad climatológica ofrece condiciones que permiten que dicha heterogeneidad espacial se manifieste; los mismos autores indican “...existe una asociación íntima entre diversidad biótica y abiótica, teniendo implicaciones significativas en las estrategias de conservación a largo plazo”.

Según Carcavilla *et al.* (2008) y Serrano y Ruiz (2007), la geodiversidad debe ser de gran utilidad para la identificación de ambientes o paisajes con una diversidad biológica propia; en otras palabras, teóricamente donde hay diversidad biológica debe haber diversidad de ambientes o paisajes, lo cual ha sido probado en algunas zonas de México (Priego *et al.*, 2003; Gámez *et al.*, 2012).

La distribución de las alturas relativas de las formaciones de terreno conforman espacios con atributos relativamente homogéneos, tal como se define el término de caracterización de la geodiversidad de la Península Ibérica (Benito-Calvo *et al.*, 2009); en este trabajo, se relaciona con la presencia de las selvas altas en los sitios de mayores variaciones en las alturas relativas y de mayor heterogeneidad geomorfológica en el suroeste del Estado de manera semejante a lo reportado para bosques del noreste de Estados Unidos (Nichols *et al.*, 1998).

En los perfiles topográficos o toposecuencias (figuras 4, 5 y 6) se aprecia que los sitios donde hay una mayor cantidad de formaciones vegetales distintas y en donde predominan las formaciones que se consideran como más diversas coinciden con los sitios que presentan las geodiversidades más altas. Lo anterior confirma que la relación hallada por los autores mencionados es válida aun para paisajes de baja energía y con aparente escases de recursos hídricos superficiales.

La heterogeneidad espacial que se manifiesta en las variaciones en altura relativa, número de grupos de suelos y disponibilidad de agua superficial principalmente son los elementos de la geodiversidad que mayormente contribuyen a la existencia de ambientes distintos y, por tanto, a colecciones de especies o formaciones vegetales diversas.

La relación manifiesta entre la geodiversidad y la biodiversidad como conceptos síntesis de la cantidad, variedad y calidad de atributos abióticos y bióticos, respectivamente, muestra la influencia que tienen la una en la otra. En este caso, es básicamente unidireccional; los tiempos de cambio para cada uno de los componentes de estos paisajes son diferentes.

Al poner en orden decreciente la velocidad a la cual cambia cada uno de los componentes estudiados, se pone de manifiesto la direccionalidad de los cambios y las relaciones; así, los cambios geológicos toman cientos de millones de años; los geomorfométricos toman desde unos millones hasta cientos de miles, los hidrológicos y edafológicos, unos pocos miles; y los biológicos, unos cuantos cientos de años.

Por lo tanto, la cobertura biológica del espacio se ve más afectada por los otros componentes, y puede afectar escasamente a los otros conforme nos alejamos en la escala temporal. Las interacciones más fuertes serán las que se den entre los aspectos biológicos con los edafológicos e hidrológicos, siendo muy escaso su efecto sobre los componentes geológicos y geomorfométricos.

Estas relaciones son de suma importancia para el manejo del territorio en vista de la capacidad que se tiene como especie para modificar estos componentes del paisaje, la ocupación de los valles con actividades agrícolas, el reencauzamiento de ríos, la contaminación de los suelos y la deforestación; son actividades que, si bien son imprescindibles para mantener a la población, modifican fuertemente las tres capas más dinámicas de las cinco estudiadas.

Además, en los últimos 100 años se ha desarrollado la capacidad para modificar sensiblemente a escala regional los aspectos geomorfométricos del territorio, creando grandes represas y gigantescos canales que son equivalentes a estructuras que de manera natural tomarían cientos de miles de años en formarse, lo cual está cambiando la faz del planeta y su dinámica, cuyas consecuencias no se tienen previstas con certeza.

En general, se pueden agrupar algunas actividades del hombre en dos categorías opuestas y complementarias, el aprovechamiento del territorio con actividades extractivas y de producción con los cambios que implican al territorio y sus atributos, y las actividades de conservación de dicho territorio.

Prezas (2011) «publisher»: «Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio reporta un número elevado de ANP para Quintana Roo, que supone la existencia de una riqueza biológica congruente no sólo con el número de ANP, sino con su extensión. Al sobreponer los límites de las ANP existentes en el Estado (figura 7), podemos ver que, efectivamente, para la mayor parte de ellas, la elección de sitios con altas biodiversidades ha coincidido con sitios en los cuales la geodiversidad es alta.

Algunas de las ANP que se muestran en este trabajo fueron decretadas por los atributos de las porciones marinas que involucran; este estudio no se desarrolló para abarcar estos espacios subacuáticos, pero permite plantear interrogantes sobre el comportamiento de la geodiversidad en puntos de cambio tan drásticos como el que aborda la entrada a medios subacuáticos en la medición de la geodiversidad.

De la misma manera, los resultados obtenidos permiten asegurar que información de mayor detalle podría contribuir de manera importante para explicar la distribución espacial de la diversidad biológica, para identificar las áreas de alta riqueza de especies, para diseñar áreas protegidas en zonas de difícil acceso, para definir estrategias de conservación (Parks y Mulligan, 2010; Priego *et al.*, 2003) y para identificar servicios ambientales o ecosistémicos (Gray, 2011).

Con estos resultados queda de manifiesto que la geodiversidad propicia la diversidad de ambientes; sin embargo, en la medida que se conozcan los detalles del relieve a escalas grandes se comprenderá mejor la gran diversidad de ambientes en el karst de Quintana Roo, lo cual hace necesaria la realización de estudios de mayor detalle que permitan el reconocimiento, la identificación

y el registro de la geodiversidad que se traducen en heterogeneidad ambiental y en diversidad de especies.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la metodología empleada no sólo es adecuada para la medición de la geodiversidad en ambientes de baja energía, como la Península de Yucatán, sino que permite compensar al menos en parte la carencia de información y la incertidumbre asociada con información a escalas medias y pequeñas.

Para la zona de estudio, se demuestra la relación unidireccional entre los componentes geológicos y de relieve con la biodiversidad y la interacción bidireccional de la biodiversidad con los componentes hidrológico y edafológico.

En Quintana Roo existen diferencias altimétricas que han permitido el desarrollo de una geodiversidad y biodiversidad características. En este artículo se utilizó como medida de geodiversidad el conteo de objetos diferentes, es decir, la riqueza de tipos geológicos, de tipos de suelos, unidades altimétricas e hidrología, como la definen Gray (2008b) y Kozłowski (2004).

Este trabajo es el primero para el Estado de Quintana Roo en el que se reportan los pisos altitudinales regionales para fundamentar que la aparente homogeneidad del relieve no es tal y que en esas grandes planicies kársticas existe una amplia diversidad de ambientes producto de la heterogeneidad morfométrica y estructural del terreno. Se identificaron cuatro pisos altitudinales regionales; éstos, combinados con siete formaciones geológicas, seis subtipos climáticos y 12 grupos de suelos, dan como resultado seis tipos de selvas más nueve cubiertas vegetales, así como coberturas agrícolas.

El Estado de Quintana Roo no es homogéneo; presenta zonas de muy alta a muy baja geodiversidad en espacios bien definidos y cuyos atributos contribuyentes principales están igualmente bien definidos.

Se identificaron tres grandes áreas: una zona al oeste del Estado con valores de geodiversidad de media a muy alta; una zona intermedia en la parte central, en donde los valores de geodiversidad van de media a muy baja; y una tercera zona en la parte de menor altura y hacia la zona costera del Estado, en donde la geodiversidad tiene valores nuevamente de media a muy alta.

Las Áreas Naturales Protegidas se encuentran en las áreas con mayor geodiversidad y biodiversidad en el Estado. La geodiversidad está íntimamente relacionada con la biodiversidad a través de la relación sinérgica de los componentes de la primera.

Agradecimientos

Se agradece al Proyecto “Elaboración del Programa Estatal de acción ante el Cambio Climático” de la Universidad de Quintana Roo por las facilidades brindadas para el uso de la información cartográfica del Estado de Quintana Roo y el apoyo financiero.

Bibliografía

- Aguilar, Y.; Mendoza, M.; Frausto, O.; Bollo, M.; Bautista, F. (2010): *Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains*. México: Geos, pp. 115-116.
- Bautista, F.; Palacio-Aponte, G.; Quintana, P.; Zinck, J.A. (2011): *Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan*, México: *Geomorphology*, 135:308-321. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.014
- Bautista, F., Palacio, A.G. (2005): *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. Campeche, Campeche; Mérida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- Beddows, P.; Blanchon, P.; Escobar-Briones, E.; Torres-Talamante, O. (2007): “Los cenotes de la península de Yucatán” en *Arqueología Mexicana*, 14:32-35.
- Benito-Calvo, A.; Pérez-González, A.; Magri, O.; Meza, P. (2009): *Assessing regional geodiversity: the Iberian Peninsula*. *Earth Surf Process Landf*, 34:1433-1445.
- Burnett, M.R.; August, P.V.; Brown, J.H. Jr; Killingbeck, K.T. (1998): *The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity I. A Patch-Scale Perspective*. *Conserv Biol*, 12:363-370.
- Cantú, G.; Scott, J.; Strand, E. (2004): *Assessment of current and proposed nature reserves of Mexico based on their capacity to protect geophysical features and biodiversity*. *Biol Conserv* 115:411-417.
- Carcavilla, L.; Durán, J.J.; López-Martínez, J. (2008): *Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico*. *Geo-Temas*, 10:1299-1303.
- Chen, C.; Yue, T. (2010): *A method of DEM construction and related error analysis*. *Comput Geosci*, 36:717-725.
- Coke, J. (2004): *Geography of caves in Quintana Roo*. *Assoc Mex Cave Stud Act Newsl*, 27:93-97.
- Comisión Nacional Forestal (2009): *Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009*. Gobierno de la República, México.
- CONABIO (1995): *Atlas de Reservas de la Biosfera y otras áreas naturales protegidas*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.
- Cotler, A. H. (2003): “El uso de la información edáfica en los estudios ambientales” en *Gac Ecológica*, 33-42.
- Escalante, T.; Cordero, V.S.; Morrone, J.J.; Linaje, M. (2007a): “Áreas de endemismo de mamíferos terrestres de México: un caso de estudio usando modelos de nicho ecológico, análisis de Parsimonia de endemismos y ajustes de goloboff” en *Interciencia Rev Cienc Tecnol América*, 32:151-159.

- Escalante, T.; Szumik, C.; Morrone, J.J. (2007b): "Áreas de endemismos de los mamíferos de México: Reanálisis y comparación con estudios previos" en *Darwiniana*, 45:41-43.
- Frausto, Ó.; Ihl, T., López, J.R., Goldacker S, Chale G, Giese S, Wurl J, Careaga P, Bacab R (2006) Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán. *Teor Prax* 87-103.
- Frausto O, Ihl T (2008) Capítulo 2 Mapa de formas exocarsticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. *Estud. geohidrológico norte Quintana Roo México*. pp 41-54
- Frausto O, Ihl T (2010) Vulnerabilidad a la inundación en las formas exocarsticas del noreste de da Península de Yucatan. *Universidade de Coimbra*, p 16
- Gámez N, Escalante T, Rodríguez G, Linaje M, Morrone JJ (2012) Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna. *Rev Mex Biodivers* 83:258-272.
- Goldacker S, Frausto O (2005) Identification of areas at risk of flooding in the south de Yucatan peninsula, Mexico. *UACH, México*, pp 483-49
- Gray M (2008a) Geodiversity: developing the paradigm. *Proc Geol Assoc* 119:287-298.
- Gray M (2008b) Geoheritage 1. Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage. *Geosci. Can.* 35:
- Gray M (2011) Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environ Conserv* 38:271-274.
- Gutierrez C, Ortíz J, Flores J, Zamora P, Domínguez M, Villegas P (2011) Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia de Nohalal- Sudzal Chico, Tekax, Yucatán, México. *Floresta Veracruzana* 13:7-14.
- Héraud M (1996) Le Karst du Yucatan: Pays des Mayas. *Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeau*.
- Ibáñez JJ, García A (2002) Diversidad: biodiversidad edáfica y geodiversidad. *Edafología* 9:329-385.
- Ibarra G, Villaseñor JL, Duran R (1996) Riqueza de especies y endemismo del componente arbóreo de la Península de Yucatán, Mexico. *Bol Soc Botánica México* 57:49-77.
- Ihl T, Frausto O, López JR, Giese S, Goldacker S, Bautista F, Verdinelli GB (2007) Identification of geodisasters in the state of Yucatán, Mexico. *Neues Jahrb Für Geol Paläontol - Abh* 246:299-311.
- INEGI (2000) *Cartas Geológicas 1:250000*.
- INEGI (2005a) *Carta de Climas para la República Mexicana, 1:1000000*.
- INEGI (2005b) *Cartas Edafológicas serie II, 1:250000*.
- INEGI (2005c) *Cartas Topográficas, 1:50000*.
- INEGI (2009) *Cartas De Uso del Suelo y Vegetación serie IV, 1:250000*.
- Jačková K, Romportl D (2008) The relationship between geodiversity and habitat richness in Šumava national park and Křivoklátsko Pla (Czech Republic): a quantitative analysis approach. *J Landsc Ecol* 1:23-38.
- Jenks G (1977) *Optimal data classification for choropleth maps*. University of Kansas Dept of Geography.
- Jiménez-Osornio, J.J.M.; Bautista-Zuñiga, F.; Estrada-Medina, H.; González-Iturbec, J.A. (2004): «Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán» en *Terra Latinoam*, 22: 243-254.
- Kozłowski, S. (2004): "Geodiversity. The concept and scope of geodiversity" en *Przegląd Geol.* Vol. 52: 833-83.
- Lugo, H. (1990): *El relieve de la República Mexicana*. *Inst. Geol.*, 9: 82-111.
- Lugo, H.; Aceves, J.F.; Espinasa, R. (1992): "Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán" en *Rev. Inst. Geol. México: UNAM*, 101: 143-150.
- Nichols, W.F.; Killingbeck, K.T.; August, P.V. (1998): "The Influence of Geomorphological Heterogeneity on Biodiversity II. A Landscape Perspective" en *Conserv. Biol.*, 12: 371-379. doi: 10.1111/j.1523-1739.1998.96237.x

- Ochoa, M.; Flores, O. (2006): *Áreas de Diversidad y Endemismo de la Herpetofauna Mexicana*. México: UNAM.
- Ordóñez-Crespo, I.; García-Rodríguez, M. (2010): "Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México)" en *M. Rev. Electrónica Medioambiente*, 15–35.
- Orians, G.H.; Dirzo, R.; Cushman, J.H.; Medina, E.; Wright, S.J. (1995): "Tropical forest biodiversity and ecosystem functioning" en Watson, R.T.; Heywood, V.H. (eds.) *Glob. Biodivers. Assess.* Cambridge University Press, pp. 339–345.
- Ortiz, M. (1988): *Perfiles geomorfológicos complejos*. México: Serie Varia, IG-UNAM.
- Palacio, A.G.; Noriega, R.; Zamora, P. (2012): *Caracterización físico-geográfica del paisaje conocido como "bajos inundables". El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche*. Investig. Geográficas Bol. Inst. Geogr.
- Parks, K.E.; Mulligan, M. (2010): "On the relationship between a resource based measure of geodiversity and broad scale biodiversity patterns" en *Biodivers. Conserv.*, 19: 2751–2766.
- De Pedraza, G.J. (1996): *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. España: Rueda.
- Pike, R.J. (2000): "Geomorphometry-diversity in quantitative surface analysis" en *Prog. Phys. Geogr.*, 24:1–20.
- Prezas, B. (2011): *Áreas naturales protegidas en Quintana Roo. Riqueza Biológica Quintana Roo. Un análisis para su conserv.* México, D.F.; San Cristóbal de las Casas, Chiapas; Chetumal; Mérida, Yucatán, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio); Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Gobierno del Estado de Quintana Roo, Programa de Pequeñas Donaciones-México, pp. 300–309.
- Priego, Á.; Bocco, G.; Mendoza, M.E.; Garrido, A. (2010): *Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Priego, Á.; Moreno, P.; Palacio, J.L.; López, J.; Geissert, D. (2003): *Relación entre la heterogeneidad del paisaje y la riqueza de especies de flora en cuencas costeras del estado de Veracruz, México*. Investig. Geográficas Bol. Inst. Geogr.
- QRSS (2013): *Quintana Roo Speleological Survey*. <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm>. Accessed 20 Nov 2013
- Serrano, E.; Ruiz, P. (2007): *Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial: el caso de Tierras Caracena (Soria)*. Bol. Asoc. Geógrafos Esp., 79–98.
- Takagi, M.; Shibasaki, R. (1996): "An interpolation method for continental DEM generation using small scale contour maps" en *Int. Arch Photogramm Remote Sens.*, 31: 847–852.
- Universidad de Quintana Roo (2004): *Programa Estatal de Ordenamiento Territorial*, pp. 3987.
- Xavier-da-Silva, J.; De Carvalho-Filho, L.M. (2004): *Geodiversity: Some simple geoprocessing indicators to support environmental biodiversity studies*. Dir. Mag., 1-4.
- Yue, T-X; Du Z-P; Song D-J; Gong, Y. (2007): "A new method of surface modeling and its application to DEM construction" en *Geomorphology*, 91: 161-172.
- Zwoliński, Z. (2010): "The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts." en *Landf Anal*, 11: 77-85.
- Zwoliński, Z.; Stachowiak, J. (2012): "Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism" en *Quaest Geogr.*, 31: 99-107.