

ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD Y HETEROGENEIDAD DE LOS PAISAJES DE MÉXICO

Angel G. Priego Santander¹ & Miguel Angel Esteve Selma²

RESUMEN

La presente investigación abarca el territorio de México y su objetivo es conocer y evaluar la distribución de la complejidad y heterogeneidad de los paisajes físico-geográficos de este país. Para lograr esto, se aplicaron dos índices de complejidad; uno de riqueza y otro de diversidad al mapa de paisajes naturales de México, a escala 1:500 000. Los resultados indican que México es un mosaico geocológico donde espacialmente alternan unidades de diversa heterogeneidad y complejidad, de forma continua. Aún los geosistemas más simples y homogéneas, contienen una elevada riqueza de unidades inferiores.

Palabras claves: Paisajes; heterogeneidad, complejidad; diversidad; México.

ANALYSIS OF THE COMPLEXITY AND HETEROGENEITY OF THE LANDSCAPES OF MEXICO

ABSTRACT

This research covers the territory of Mexico and aims to understand and evaluate the distribution of the complexity and heterogeneity of the physical-geographical landscapes of this country. To achieve this, two indicators of complexity were applied; one of richness and a diversity to map natural landscapes of Mexico at 1: 500 000. The results indicate that Mexico is a mosaic geocological where spatially alternating units of varying heterogeneity and complexity, continuously. Even the most simple and homogeneous geocosystems, contain a high richness of lower units.

Key Words: Landscapes; heterogeneity; complexity; diversity; México.

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, ExHacienda de San José de la Huerta. C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México. e-mail: apriego@ciga.unam.mx

²Departamento de Ecología e Hidrología, Facultad de Biología de la Universidad de Murcia, Campus Espinardo. C.P. 30100, Murcia, España. e-mail: maesteve@um.es

1. INTRODUCCIÓN

La geoecología o su término sinónimo ecología del paisaje, es fruto de la integración del enfoque ecológico (típicamente más funcional) y del enfoque paisajístico (típicamente más estructural) en una perspectiva holística (HASSE, 1986), lo que MOSS (2001) denominó el enfoque geoecológico de la ecología del paisaje. En este sentido, los análisis de heterogeneidad geoecológica han probado ser una herramienta eficaz para el entendimiento de la distribución espacial de la biodiversidad, así como para la comprensión de la dinámica de los procesos espaciales y de la fragmentación ecológica de los territorios (LAVRINENKO, 2012; PRIEGO-SANTANDER *et al.*, 2013).

De acuerdo con la revisión hecha por HAINES-YOUNG y CHOPPING (1996), los resultados de los estudios de heterogeneidad son usados para cuantificar la estructura del paisaje. La información es utilizada entonces, para hacer inferencias sobre procesos ecológicos particulares dentro del paisaje o como base para evaluar la conservación de patrones estructurales específicos (HULSHOFF, 1995; STEIN y KREFT, 2014).

En México, durante la última década se han emprendido diferentes estudios sobre la heterogeneidad y complejidad de los paisajes geográficos, pero estos análisis abarcan territorios parciales y casi siempre se han hecho como parte de otras investigaciones; por ejemplo, sectores de algunas zonas costeras (ACOSTA-VILLEGAS y PRIEGO-SANTANDER, 2010; FLORES-DOMÍNGUEZ y PRIEGO-SANTANDER, 2011; PRIEGO-SANTANDER *et al.*, 2013); parte de un área protegida (CORTES-MÁRQUEZ *et al.*, 2010) y solo en una ocasión, la totalidad de un estado del país (RAMÍREZ-SÁNCHEZ y PRIEGO-SANTANDER, 2012).

Sin embargo, la cartografía de la heterogeneidad del paisaje es imprescindible en dos direcciones de investigación: a) identificar las unidades morfológicas dominantes, subdominantes, raras y únicas de un territorio dado y b) conocer la representatividad de los geosistemas en el sistema de áreas protegidas (GANZEI e IVANOV, 2012). O sea, la cartografía de la heterogeneidad permite conocer las unidades más ricas y diversas de un territorio (probables áreas de elevada biodiversidad), establecer cuáles son más frecuentes y su inverso (las más raras), así como aquellas que existen en ejemplares únicos (probables áreas de elevado endemismo). Por otra parte, los mapas de heterogeneidad geoecológica permiten evaluar la representatividad de la diversidad y riqueza de los paisajes en el sistema de áreas protegidas y en consecuencia, formular propuestas de prioridades para la protección y conservación de ecosistemas a nivel geográfico. KLIMINA y MIRZEKHANOVA (2014) afirman que el criterio de la conservación de la diversidad del paisaje es un indicador de la sustentabilidad del desarrollo de una región particular, mientras SCHIPPERS *et al.*, (2015) concluyen que la resiliencia de un territorio está determinada por la diversidad del paisaje y la organización espacial, de ahí la importancia y urgencia de emprender este tipo de estudios.

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta aquí, el objetivo de esta investigación es conocer la distribución espacial de la heterogeneidad y complejidad geoecológica del país.

La cartografía de la heterogeneidad y complejidad de los paisajes de México permitirá esclarecer la distribución de los geosistemas más ricos, complejos y diversos del país y en el mediano plazo, profundizar en su representatividad dentro del sistema de áreas protegidas, así como esclarecer el papel de dicha heterogeneidad en los sistemas productivos actuales.

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO. SITUACIÓN, EXTENSIÓN Y LÍMITES

México se sitúa en el subcontinente de América del Norte y posee una extensión aproximada de 2 millones de km². Limita al norte con los Estados Unidos de América; al Sur con Guatemala y Belice; al este con el Golfo de México y el Mar Caribe y al oeste con el Océano Pacífico. En las Figuras 1 y 2, se ofrece la situación del área de estudio dentro de América del Norte.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS

La presente investigación se apoya en los postulados de la Geografía del Paisaje. La acepción científica del concepto de paisaje surgió en las ciencias geográficas y se desarrolló más ampliamente, dentro del enfoque teórico-metodológico de la Geografía Física Compleja o Geografía del Paisaje (SOCHAVA, 1963; PREOBRAZHENSII, 1966; ISACHENKO, 1973; HASSE, 1986; ROUGERIE y BEROUTCHACHVILI, 1991; SOLNTSEV, 1997; BASTIAN, 2000, 2001; SHAW y OLFIELD, 2007; SEMENOV y SNYTKO, 2013; MATEO, 1984, 2002, 2007, 2015; MIKLÓS, 2012, 2016). Los paisajes geográficos, geocomplejos, geosistemas o complejos territoriales naturales (CTN) son partes de la superficie que se distinguen cualitativamente de las restantes, poseen límites naturales o antropo-naturales y tienen una definida integridad cualitativa. Se pueden definir, resumidamente, como sistemas territoriales compuestos por componentes naturales y complejos de diferente rango taxonómico, formados bajo la influencia de los procesos naturales y de la actividad modificadora de la sociedad humana, que se encuentran en permanente interacción y se desarrollan históricamente (MATEO, 1984, 2007, 2015).

La heterogeneidad del paisaje geográfico varía en el espacio dependiendo de la proporción entre polígonos y unidades tipológicas. Es común apreciar el uso del concepto de heterogeneidad del paisaje para referirse a la heterogeneidad de la vegetación o del uso del suelo (KOTLIAR y WIENS, 1990; FORMAN, 1995; BUREL y BAUDRY, 2002; GANZEI e IVANOV, 2012; CRUZ-GARCÍA, *et al.*, 2015; SCHIPPERS *et al.*, 2015), donde se considera como tal, la variación espacial en los atributos de agregación y contraste. Se entiende por agregación la dispersión de los parches de tipos de cobertura y contraste como el grado de diferencia entre parches o entre parches y matriz. En el presente trabajo, se comprende por heterogeneidad del paisaje la diferenciación de la estructura horizontal de los geocomplejos, condicionada por la distinta composición en tipos y número de polígonos, con respecto a la unidad superior (ROWE, 1995; GANZEI e IVANOV, 2012). Por otra parte, la complejidad del paisaje (aunque puede ser considerada parte de la heterogeneidad) hace más hincapié en la complicación de la estructura morfológica, pero con independencia de la unidad superior, es decir, solo considera la información al interior de la unidad que se analiza Snacken y Antrop (1983).

2.3 EVALUACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LA COMPLEJIDAD Y HETEROGENEIDAD GEOECOLÓGICA

El mapa de paisajes de México (PRIEGO-SANTANDER *et al.*, 2012), distingue cinco unidades taxonómicas a escala 1:500 000; a saber, clase, subclase, grupo, subgrupo y especie (PRIEGO-SANTANDER Y BOCCO-VERDINELLI 2016). Partiendo de esta base cartográfica, se computó el número de polígonos y de clases tipológicas de especies por subgrupos y con esta información, se calculó la complejidad y heterogeneidad geoecológica, a nivel de subgrupos de paisajes.

TABLA 1
Indicadores de complejidad y heterogeneidad geoecológica

Índice	Ecuación	Referencia
Complejidad Corológica (CC)	$CC = n_i / A$	Snacken y Antrop (1983)
Complejidad Tipológica (CT)	$CT = n_i / N_c$	Snacken y Antrop (1983)
Riqueza Relativa de Paisajes (R)	$R = N_c / N_{c_{max}}$	Romme (1982)
Diversidad Máxima de Paisajes ($H_{max.}$)	$H_{max.} = \ln(N_c)$	Turner (1989)

n_i : número de polígonos de la clase i ; N_c : número de clases de paisajes presentes; $N_{c_{max.}}$: número máximo de clases de paisajes posibles de ocurrir; A : área de la unidad (km^2).

Las peculiaridades de la taxonomía, composición y distribución espacial de los paisajes de México se pueden consultar en los metadatos de PRIEGO-SANTANDER *et al.*, (2012) y han sido recientemente ampliadas por PRIEGO-SANTANDER y BOCCO-VERDINELLI (2016).

De acuerdo con FORMAN (1995), usualmente 2 ó 3 indicadores son suficientes para obtener respuesta a una pregunta específica sobre métricas del paisaje. En el presente estudio se emplearon cuatro indicadores, a saber: complejidad corológica y complejidad tipológica (SNACKEN y ANTROP, 1983) para evaluar la complejidad de los paisajes, así como riqueza relativa de paisajes (ROMME, 1982) y diversidad máxima de paisajes (TURNER, 1989) para valorar la heterogeneidad geocológica. La Tabla 1 presenta las ecuaciones de cada indicador. Con estos resultados se obtuvieron las estadísticas básicas y se realizaron análisis de correlación con el propósito de conocer la probable asociación entre indicadores, para facilitar la optimización de la cartografía. Todo el procesamiento estadístico se ejecutó en BioStat 5 (ANALYSTSOFT, 2015).

Se realizó la clasificación de los valores según los métodos de clases iguales y recesos naturales. Este último método de clasificación (recesos naturales) encuentra agrupaciones inherentes en los datos, identificando puntos de ruptura entre las clases mediante algoritmos de optimización. El propósito fue construir cartogramas para ambos enfoques y así conocer cual ofrece mayor diferenciación espacial y proceder entonces a la evaluación de la complejidad y heterogeneidad geocológica. En ambos casos, se elaboraron cartogramas en cinco clases. Consideramos “inapropiado” proponer una clasificación directa de la complejidad y heterogeneidad de los geosistemas de México en el sistema clásico de Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta complejidad o heterogeneidad geocológica. Ello debido a que aún los geocomplejos más simples y homogéneos presentan una singular riqueza de unidades inferiores a nivel de subclases de paisajes. Por esta razón, a las categorías inferiores las denominamos “básica” y “notable”, respectivamente.

La escala de trabajo fue la del mapa base de paisajes naturales de México, o sea, 1:500 000 y la edición final de los cartogramas se realizó a escala aproximada de 1: 13 500 000. Debido a la escala final de edición, la discusión de la distribución de las variables de complejidad y heterogeneidad se apoya en la propuesta de regionalización físico-geográfica de México, propuesta por BOLLO-MANENT *et al.*, (2015). Toda la información se integró, procesó y editó, con apoyo en aplicaciones de Sistema de Información Geográfica ArcGIS Desktop (ESRI, 2012).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CORRELACIÓN ENTRE INDICADORES DE HETEROGENEIDAD

Para el caso de México a escala regional, se encontró una correlación significativa entre los indicadores de complejidad (tipológica y corológica), así como entre riqueza y diversidad de paisajes. La Tabla 2 ofrece los resultados obtenidos y como se puede apreciar, la riqueza y diversidad no se asociaron con los indicadores de complejidad. Estos resultados parecen bastante coherentes, puesto que las variables de complejidad consideran en ambos casos el número de polígonos, mientras que riqueza y diversidad son elaboraciones matemáticas exclusivas de las clases tipológicas.

Lo anterior permitió la elaboración de sistemas matriciales para optimizar la cartografía. Las Tablas 3 y 4 ofrecen los resultados de la correspondencia espacial encontrada entre los índices de complejidad en el primer caso y entre los índices de riqueza y diversidad en el segundo. En ambos resultó más útil la diferenciación espacial por el método de recesos naturales, que respeta los puntos de discontinuidad inherentes a los datos y por ende, las peculiaridades naturales del territorio.

TABLA 2
Matriz de correlación entre indicadores de heterogeneidad geocológica

Indicadores de Heterogeneidad	CC		RP		CT	
	r	p	r	p	r	p
RP	-0.05	0.49	-	-		
CT	-0.30	<0.001	0.06	0.37	-	-
H _{max.}	-0.10	0.17	0.90	<0.001	0.03	0.65

Las correlaciones marcadas (negritas y cursivas) son significativas a $P < 0.05$. CC: Complejidad corológica, RP: Riqueza de paisajes, CT: Complejidad tipológica, H_{max.}: Diversidad máxima de paisajes.

La Tabla 3 refleja la correlación negativa encontrada entre los indicadores de complejidad. Siendo posible y cierta la coincidencia geográfica de unidades con equitatividad entre el número de polígonos y el área, así como entre el número de polígonos y de clases tipológicas (mínimos valores de las variables CT y CC), resulta muy improbable la coexistencia geográfica de unidades con máximos valores de complejidad, puesto que ello implicaría geosistemas con muchos polígonos en muy poca área (muy alta complejidad corológica), coincidiendo con geosistemas que posean muchos polígonos en muy pocas clases tipológicas (muy alta complejidad tipológica), lo cual resulta contradictorio y al menos a esta escala, permanece como una hipótesis para México. Sin embargo, los casos extremos inversos (máximo valor de una variable y mínimo de la otra) si ocurren, sugiriendo la posibilidad de dos subcategorías dentro de un mismo grado de complejidad.

TABLA 3
Correspondencia espacial entre complejidad corológica y tipológica de los paisajes de México

CC	CT				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Muy Baja	T	T	T	T	T
Baja	T	T	T	T	<i>h</i>
Media	T	T	T	T	<i>h</i>
Alta	T	T	T	T	<i>h</i>
Muy Alta	T	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>

CC= complejidad corológica, CT= complejidad tipológica. **T**: Tesis, casos ciertos de correspondencia espacial; *h*: Hipótesis, casos no encontrados para el ejemplo de México a la escala de análisis.

La Tabla 4 permite apreciar la correlación positiva y elevada encontrada entre la riqueza y la diversidad máxima de los paisajes de México. Es comprensible porque ambos indicadores, aunque con diseño matemático diferente, solo ocupan la misma variable, es decir, el número de clases tipológicas. Al contrario de los casos de complejidad, aquí predominan las hipótesis sobre los hechos ciertos de coincidencia geográfica. Sin embargo, la correspondencia no es directa en 100%, porque la riqueza de paisajes es una valoración proporcional entre el número de clases existentes y el número máximo de clases posibles de ocurrir, mientras que la diversidad máxima de paisajes maximiza la heterogeneidad al interior de un territorio dado de forma directa por el número de clases presentes. Por esta razón, los casos extremos inversos (máximos valores de una variable y mínimos de la otra) son casi imposibles en un mismo territorio, pues difícilmente

coincidan geográficamente, geosistemas con máxima diversidad y muy baja riqueza y vs., ya que ambas posibilidades se excluyen mutuamente.

TABLA 4
Correspondencia espacial entre riqueza y diversidad máxima de los paisajes de México

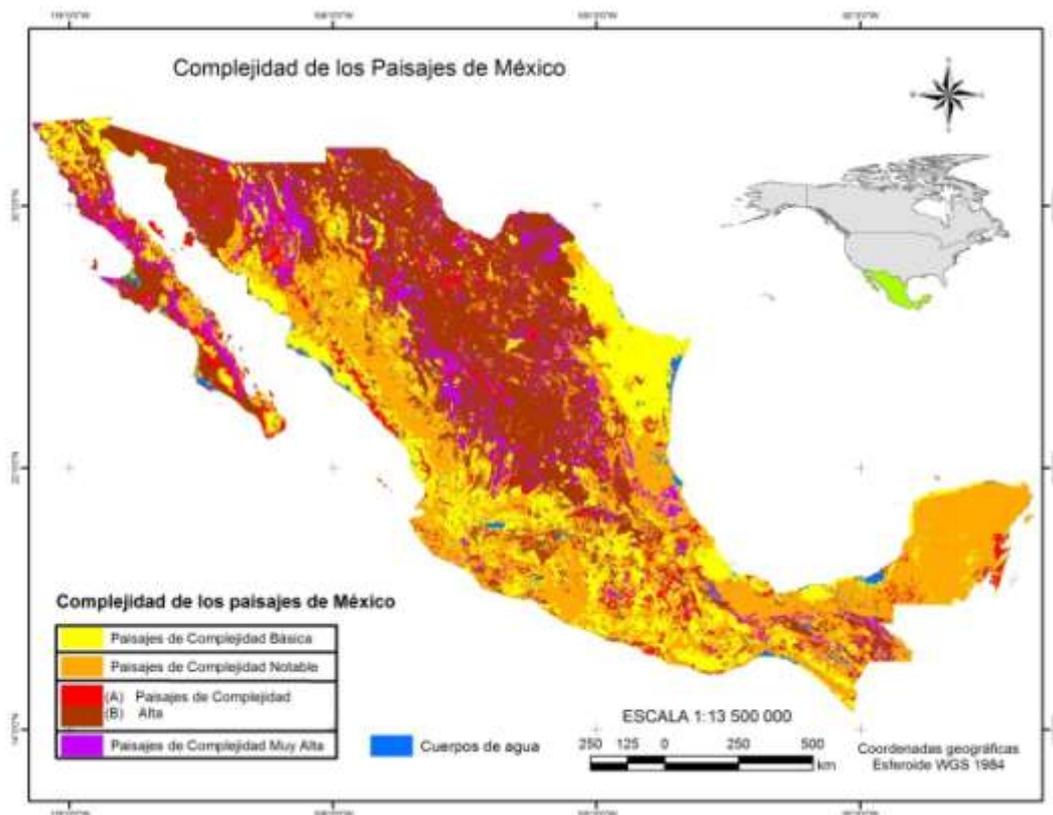
R	$H_{max.}$				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Muy Baja	T	T	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>
Baja	<i>h</i>	<i>h</i>	T	<i>h</i>	<i>h</i>
Media	<i>h</i>	<i>h</i>	T	T	<i>h</i>
Alta	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	T	T
Muy Alta	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	<i>h</i>	T

R= riqueza de paisajes, $H_{max.}$ = diversidad máxima de paisajes. **T**: Tesis, casos ciertos de correspondencia espacial; *h*: Hipótesis, casos no encontrados para el ejemplo de México a la escala de análisis.

3.2 COMPLEJIDAD DE LOS PAISAJES DE MÉXICO

Como se puede apreciar en la Figura 1, se distinguieron cinco clases de complejidad del paisaje (Tabla 5), siendo dos de ellas subcategorías de un mismo grado, posibilidad que se sugirió anteriormente.

FIGURA 1
Complejidad de los paisajes de México



En México predominan los paisajes de complejidad notable y de complejidad alta (tipo B); a continuación aparecen los paisajes de complejidad básica y finalmente los geosistemas de complejidad muy alta y alta (tipo A), en ese orden (ver Tabla 6). Los paisajes de complejidad básica se caracterizan por la ocurrencia de valores medios de complejidad corológica y bajos a muy bajos de complejidad tipológica o vs., o sea, relativa proporcionalidad entre el número de clases de paisajes y el número de polígonos, en relativamente grandes superficies. Estos geocomplejos se distribuyen fundamentalmente, en las provincias físico-geográficas Sierra Madre Occidental, Península de Yucatán, Sierra Madre del Sur, Eje Neovolcánico, Llanura Costera Meridional del Golfo de México y en menor proporción, en la Península de Baja California y en la Llanura Costera Septentrional del Golfo de México, abarcando más de 31 % de la superficie de México (ver Tabla 6).

TABLA 5
Grados de complejidad de los paisajes de México

Complejidad de los Paisajes	Símbolo	Rangos		Características
		CC	CT	
Paisajes de complejidad básica		0.004-0.069	1.000-74.333	Baja a muy baja complejidad. Fuerte desproporción relativa entre número de polígonos (muy pocos) y área de las unidades (muy extensas) o pequeñas proporciones del número de polígonos (pocos) y de clases tipológicas (pocas).
Paisajes de complejidad notable		0.004-0.043	4.875-126.000	Media a muy baja complejidad. Cierta desproporción relativa entre número de polígonos (pocos) y área de las unidades (extensas) y al unísono, pocas clases tipológicas.
Paisajes de complejidad alta		0.012-0.029	132.000-463.500	(A) Baja a muy baja complejidad corológica y alta a muy alta complejidad tipológica. Fuerte desproporción relativa entre número de polígonos (pocos) y área de las unidades (extensas) o fuerte desproporción relativa entre número de polígonos (muchos) y clases tipológicas (pocas).
		0.044-0.215	1.000-64.600	(B) Alta a muy alta complejidad corológica y baja a muy baja complejidad tipológica. Fuerte desproporción entre número de polígonos (muchos) y área de las unidades (pequeña extensión) y al unísono, elevada equitatividad entre número de polígonos y de clases tipológicas.
Paisajes de complejidad muy alta		0.053-0.058	131.556-191.778	Media a Alta complejidad. Fuerte desproporción relativa entre número de polígonos (muchos) y área de las unidades (pequeña extensión) o elevada desproporción entre número de polígonos (muchos) y clases tipológicas (pocas).

Los paisajes de complejidad alta (tipo B), se caracterizan por la ocurrencia de alta a muy alta complejidad corológica y baja a muy baja complejidad tipológica, es decir, unidades con muchos polígonos en poca superficie y al unísono, cierto equilibrio entre el número de entidades

geográficas y la cantidad de clases tipológicas a las que pertenecen. Estos geocomplejos abarcan más de 30 % del territorio de México y se distribuyen en la porción centro-norte del país, abarcando las provincias físico-geográficas de Sierras y Llanuras del Norte Centro de México, Mesas del Centro de México, Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental, Llanura Sonorense, la porción más septentrional de la Sierra Madre Occidental y una parte importante de la Península de Baja California, principalmente.

Los paisajes de complejidad básica se extienden por más de 21 % del territorio de México y tienen como peculiaridad la ocurrencia de geosistemas con relativamente pocos polígonos en grandes extensiones de superficies o pequeñas proporciones del número de polígonos y de las clases tipológicas a las que pertenecen. Se distribuyen por casi todo el territorio mexicano de manera fragmentada, pero aparecen en área compacta en las regiones de Grandes Llanuras de Norteamérica en México (en su parte más meridional), Llanura Costera Septentrional del Golfo de México, en la parte norte de la Llanura Costera Meridional del Golfo de México, y además, en la periferia de las regiones montañosas del pacífico mexicano, así como en varios fragmentos de la Península de Baja California, de la Sierra Madre Occidental y de la Sierra Madre del Sur.

TABLA 6
Distribución de los grados de complejidad del paisaje en México

Grados de complejidad del paisaje	Área	
	km ²	%
Paisajes de complejidad básica	415 621.18	21.23
Paisajes de complejidad notable	611 227.84	31,21
Paisajes de complejidad alta	A	133 048.87
	B	604 457.48
Paisajes de complejidad muy alta	168 886.60	8,62
Cuerpos de Agua	24 921.32	1.27

Los paisajes de complejidad muy alta y de complejidad alta tipo A son los de distribución más restringida y atomizada, apareciendo como pequeños parches al interior de las clases anteriores, como se puede apreciar en la Figura 1. Los primeros se caracterizan por ocurrir en unidades con numerosos polígonos en área relativamente pequeña o con pocas clases tipológicas. Los segundos se presentan en geocomplejos con pocos polígonos en grandes extensiones geográficas o muchos polígonos en pocas clases tipológicas. Entre ambos abarcan algo más de 15 % del territorio mexicano, principalmente, en forma atomizada al interior y periferia de las categorías anteriores.

3.3 HETEROGENEIDAD DE LOS PAISAJES DE MÉXICO

En la Figura 2 se puede apreciar el mapa de la heterogeneidad de los paisajes de México, mientras que la Tabla 7 ofrece la leyenda del mapa y la Tabla 8 la distribución de las categorías en el territorio mexicano. Como ocurrió en el caso de la complejidad geocológica, tres categorías de heterogeneidad abarcan más de 80 % del territorio mexicano y otras dos poseen una distribución más restringida.

En México predominan los paisajes medianamente heterogéneos, que abarcan casi 33 % del territorio nacional y están formados por 5-11 clases tipológicas, abarcando importantes territorios de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre del Sur, Sierra de Chiapas y Guatemala, Cordillera Centroamericana, Sierra Madre Oriental y más fragmentados, en la Península de Baja California.

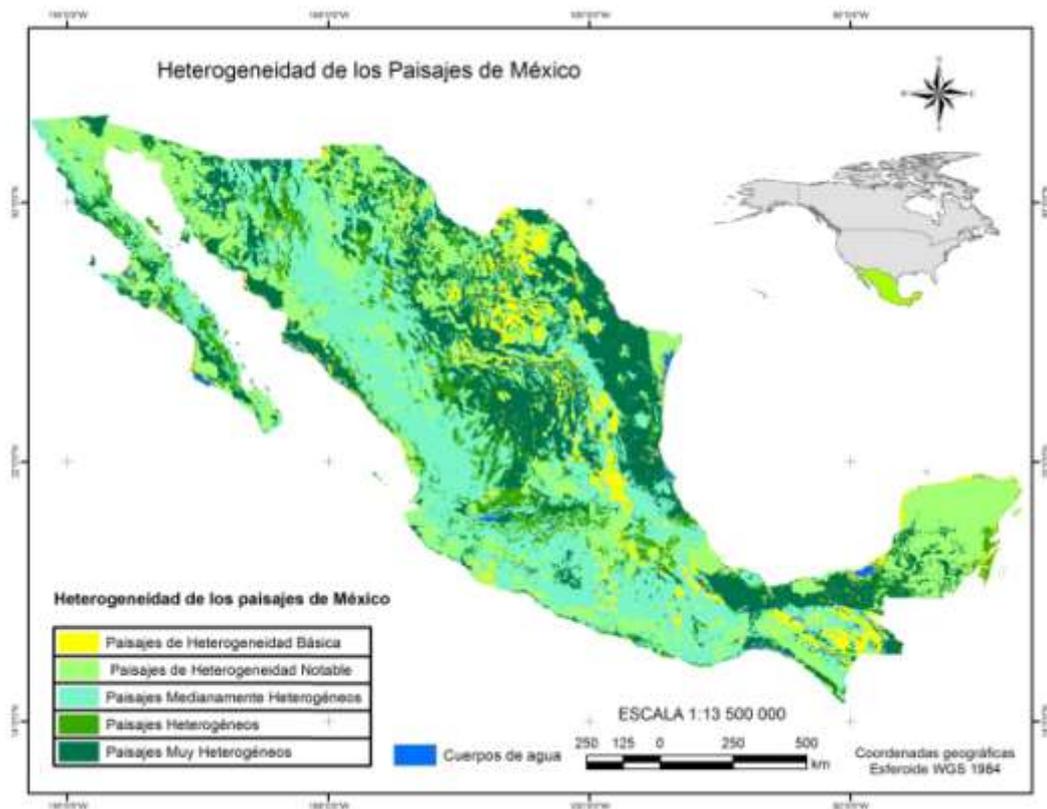
A continuación se sitúan los paisajes de heterogeneidad notable, que se caracterizan por poseer 2-4 clases tipológicas y se distribuyen en más de 26 % del territorio mexicano, abarcando la inmensa mayoría de la Península de Yucatán, así como fragmentos importantes de la Llanura Costera del Golfo de México (tanto septentrional como meridional), sectores de las Grandes Llanuras de Norteamérica en México, de las Sierras y Llanuras del Norte Centro de México, de

las Mesas del Centro de México, de la Llanura Sonorense, de la Sierra Madre del Sur, de la Cordillera Centroamericana y de la Península de Baja California, principalmente.

En tercer lugar aparecen los paisajes muy heterogéneos, cuya peculiaridad es poseer la máxima riqueza en la composición con 18-23 unidades tipológicas inferiores y se extienden en más de 25 % del área del territorio. Estos geosistemas aparecen en la Llanura Costera Meridional del Golfo de México, Eje Neovolcánico, Llanura Costera Septentrional del Golfo de México, Mesas del Centro de México, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y en forma de fragmentos más pequeños, en la Península de Baja California, Cordillera Centroamericana y Llanura Sonorense, fundamentalmente. También se reporta de forma atomizada en la Península de Yucatán, en las Grandes Llanuras de Norteamérica en México y en la Sierra de Chiapas y Guatemala.

Por último aparecen las categorías de paisajes heterogéneos y paisajes de heterogeneidad básica, que entre ambas abarcan algo más de 13 % del total del país. La primera se presenta en casi todo el territorio nacional en forma fragmentada y se caracteriza por la presencia de unidades formadas por 12-17 geosistemas, siendo su presencia más significativa en el Eje Neovolcánico, en la Sierra Madre Occidental, Península de Yucatán, Llanura Sonorense y en la Península de Baja California.

FIGURA 2
Heterogeneidad de los paisajes de México



En el caso de los paisajes de heterogeneidad básica, se trata de geocomplejos formados por una sola clase tipológica, o sea, literalmente no poseen diversidad a esta escala y su presencia es más significativa en la Sierra de Chiapas y Guatemala, en la Sierra Madre Oriental y en las Sierras y Llanuras del Centro Norte de México, apareciendo también en forma de fragmentos aislados en la Península de Yucatán y en la costa de la Sierra Madre del Sur.

TABLA 7
Heterogeneidad de los paisajes de México

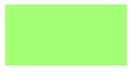
Heterogeneidad de los Paisajes	Símbolo	Rangos		Características
		R	H _{max.}	
Paisajes de heterogeneidad básica		≤ 0.043	0.00	Muy Baja riqueza y diversidad de paisajes. Geocomplejos formados por una sola clase tipológica.
Paisajes de heterogeneidad notable		0.087-0.174	0.693-1.386	Muy Baja riqueza y hasta Baja diversidad de paisajes. Geocomplejos formados por 2-4 clases tipológicas.
Paisajes medianamente heterogéneos		0.217-0.478	1.609-2.398	Baja a Media riqueza y diversidad de paisajes. Geocomplejos formados por 5-11 clases tipológicas.
Paisajes heterogéneos		0.479-0.739	2.399-2.833	Media a Alta riqueza y diversidad de paisajes. Geocomplejos formados por 12-17 clases tipológicas.
Paisajes muy heterogéneos		0.783-1.00	2.890-3.135	Alta a Muy Alta riqueza y diversidad de paisajes. Geocomplejos formados por 18-23 clases tipológicas.

TABLA 8
Distribución de los grados de heterogeneidad del paisaje en México

Grados de heterogeneidad del paisaje	Área	
	km ²	%
Paisajes de heterogeneidad básica	125.470,21	6,41
Paisajes de heterogeneidad notable	521.054,28	26,61
Paisajes medianamente heterogéneos	641.210,46	32,75
Paisajes heterogéneos	146.114,82	7,46
Paisajes muy heterogéneos	499.392,20	25,50
Cuerpos de Agua	24 921.32	1.27

3.4 ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA COMPLEJIDAD Y HETEROGENEIDAD DE LOS PAISAJES DE MÉXICO.

La complejidad y heterogeneidad de los paisajes mexicanos debe ser interpretada cuidadosamente. Los grados de la clasificación se refieren al valor de los indicadores de CC, CT, R y H_{max.}; pero los conceptos de “simplicidad” y “homogeneidad” en modo alguno deben entenderse como “pobreza” o “sencillez”. Por ejemplo, los paisajes de complejidad básica de México incluyen 56 subgrupos de paisajes y los paisajes de heterogeneidad básica 47 subgrupos de paisajes, entre los que se encuentran montañas kársticas en clima templado; planicies magmáticas en clima semifrío; montañas kársticas en clima cálido; planicies biógenas en clima cálido; planicies tectónicas en clima árido y montañas kársticas en clima árido, entre otros muchos geosistemas (ver PRIEGO-SANTANDER *et al.*, 2012 y PRIEGO-SANTANDER Y BOCCO-VERDINELLI, 2016). Estos hechos sugieren prudencia en la interpretación de los resultados y la comprensión de que están condicionados por la escala regional de análisis.

Tres grados de complejidad dominan más de 83 % del territorio de México (Tabla 6), sin embargo, los dos restantes se presentan de forma atomizada por todo el territorio nacional. Igual comportamiento se observa en la riqueza y diversidad geocológica, donde tres grados de heterogeneidad abarcan más de 84 % del territorio y los dos restantes se presentan de forma constante, aunque en menor proporción, en el resto del área (Figura 2 y Tabla 8).

La Tabla 9 resume la distribución de las Subclases de paisajes según grados de complejidad y heterogeneidad y junto a las Figuras 1 y 2, ratifican que se trata de un territorio con elevado contraste geocológico.

Los paisajes de complejidad básica y de complejidad alta (tipo B) están presentes en todo el territorio nacional. La mayor cantidad de unidades inferiores de paisajes a nivel de Subclases se encuentra en los paisajes en clima templado húmedo (26) y son de complejidad básica, pero el mayor porcentaje de superficie es ocupado por geosistemas del clima templado seco (26.6 %) y son de complejidad alta (tipos A y B). Los paisajes de complejidad muy alta en México, están presentes en tres de las cinco Subclases que se reportan para el país (A.2, A.3 y B.1), precisamente las que abarcan la mayoría del territorio nacional. Incluso las montañas en clima frío húmedo (A.1), de muy restringida distribución espacial, incluyen dos subgrupos de paisajes y uno de ellos clasifica como de complejidad alta. Los paisajes en clima cálido seco (segunda unidad en restricción territorial), incluyen 26 subgrupos de geosistemas, la mayoría en la categoría de complejidad alta (Tabla 9).

TABLA 9

Composición de los grados de complejidad y heterogeneidad de los geosistemas de México, a nivel de Subclase de Paisajes

Grados de Complejidad y Heterogeneidad		Subclases de Paisajes									
		A.1		A.2		A.3		B.1		B.2	
		Nc	%	Nc	%	Nc	%	Nc	%	Nc	%
C	Complejidad básica	1	0.1	26	8.5	9	4.7	11	2.5	9	5.7
	Complejidad notable			13	10.4	6	15.9	9	3.4	5	1.9
	Complejidad alta (tipo A)			2	3.6	2	0.9	10	26.6		
	Complejidad alta (tipo B)	1	0.01	21	1.2	6	1.4	16	2.3	12	1.9
	Complejidad muy alta			1	0.1	1	1.1	7	7.5		
H	Heterogeneidad básica	2	0.06	16	1.6	7	1.4	14	3.2	8	0.2
	Heterogeneidad notable			27	4.5	7	8.7	20	11.2	8	2.5
	Medianamente heterogéneos			16	14	7	7.1	12	9.9	7	2.1
	Heterogéneos			3	2.05	2	1.1	3	3.9	2	0.5
	Muy heterogéneos			1	1.9	1	5.8	4	14.03	1	4.1

C: Complejidad, H: Heterogeneidad. Nc: Número de unidades de paisajes (grupos o subgrupos de paisajes). Subclases de paisajes. A.1: Paisajes en clima frío húmedo, A.2: Paisajes en clima templado húmedo, A.3: Paisajes en climas cálido húmedo, B.1: Paisajes en clima templado seco, B.2: Paisajes en clima cálido seco.

Similares regularidades se aprecian en la distribución de la heterogeneidad de los paisajes de México (Figura 2 y Tabla 9), pues las unidades A.2 y B.1 incluyen la mayor cantidad de subunidades y el mayor porcentaje de superficie, respectivamente. Salvo la Subclase A.1, en el resto de las subclases de paisajes se reportan todos los grados de heterogeneidad geocológica. Esto ratifica lo que se aprecia en la Figura 2; o sea, México es un territorio de amplio contraste

en la heterogeneidad de sus paisajes y se caracteriza por la distribución proporcional de la riqueza y diversidad geoecológica en todo el territorio nacional.

La constante alternancia entre geocomplejos con tan diverso grado de complejidad y heterogeneidad, le confiera al territorio de México una elevada connotación ecológica. Ello, junto a las peculiaridades de su evolución biogeográfica y geotectónica, condiciona la elevada diversidad biológica que se reporta en el país. Los resultados obtenidos sobre la complejidad y heterogeneidad de los paisajes de México, pueden apoyar las investigaciones biogeográficas actuales, para explicar el despliegue espacial de la biodiversidad a nivel nacional y desde el punto de vista aplicado, el diseño del sistema de áreas protegidas, así como la definición de prioridades en las políticas públicas de protección y conservación de la naturaleza. Sin embargo, en todos los casos debe considerarse que se trata de una escala regional, o sea, sus propósitos básicos son indicativos y no deben emplearse para la toma de decisiones a nivel local. Esto sugiere la posibilidad de emprender estas investigaciones a escalas más detalladas (1:50 000, 1:250 000), lo cual permitiría esclarecer las regularidades locales de la distribución de la complejidad y heterogeneidad geoecológica.

4. CONCLUSIONES

A escala regional, México se caracteriza por la correlación significativa y negativa de la complejidad tipológica y corológica de sus paisajes, mientras que la riqueza y diversidad geoecológica presentan una asociación muy elevada y positiva.

México se caracteriza por el elevado contraste en la distribución de la complejidad y heterogeneidad de sus paisajes geográficos. Tres grados de complejidad y de heterogeneidad abarcan más de 80 % de la superficie del país, mientras los dos restantes se presentan de forma atomizada en todo el territorio nacional. La principal peculiaridad espacial es la alternancia constante de paisajes con diverso grado de complejidad y heterogeneidad, lo cual le confiere una elevada connotación ecológica.

La escala regional de análisis, con carácter indicativo, ha permitido esclarecer dos hechos significativos: a) aún los geocomplejos más simples y homogéneos de México abarcan una singular riqueza de unidades inferiores a nivel de subclase de paisajes, lo cual sugiere prudencia en el tratamiento de los grados de la clasificación y al mismo tiempo, revela que cualquier unidad puede ser importante para la conservación de valores naturales y b) la necesidad de emprender estas investigaciones a escalas más detalladas que permitan definir las regularidades locales de la distribución de la complejidad y heterogeneidad geoecológica, ya que la escala regional posee sobre todo carácter indicativo.

Estos resultados pueden apoyar las inferencias sobre la biogeografía actual del territorio de México y el diseño de políticas públicas para la conservación de la naturaleza a nivel nacional, dado el carácter regional de la escala de análisis.

5. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo del Proyecto CONACyT 261300 y la beca DGAPA (Julio 2015-Abril 2016), para el desarrollo de esta investigación y estancia académica. Así mismo, los autores agradecen a la Universidad de Murcia todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA-VILLEGAS, M. A. y A.G. PRIEGO-SANTANDER. (2010): Evaluación del potencial ecoturístico de un sector de la región Sierra-Costa de Michoacán, México. *Memorias del II Congreso de Ciencia y Arte del Paisaje*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 13 al 17 de Octubre de 2010. Academia Mexicana de Paisaje y Universidad de Guadalajara. CD., pp: 1-30
- ANALISTSOFT. (2015): Biostat. *Programa de Análisis Estadístico*. Versión v5. <http://www.analystsoft.com/es/>

- BASTIAN, O. (2000): Landscape classification in Saxony (Germany), a tool for holistic regional planning. *Landscape and Urban Planning* 50 (1-3): 145-155
- BASTIAN, O. (2001): Landscape Ecology - towards a unified discipline? *Landscape Ecology* 16: 757-766
- BOLLO-MANENT, M., HERNÁNDEZ-SANTANA, J.R., PRIEGO-SANTANDER, A.G., ZARAGOZA-ÁLVAREZ, R.A., ORTÍZ-RIVERA, A., ESPINOSA-MAYA, A. & R. RUÍZ-LÓPEZ. (2015): *Una propuesta de regionalización físico-geográfica de México*. Editorial CIGA-UNAM, Morelia, Michoacán, México, 59 p.
- BUREL, F. & J. BAUDRY. (2002): *Ecología del Paisaje*. Editorial Mundiprensa, Madrid, España, 353 p.
- CRUZ-GARCÍA, L.M., ARREOLA-LIZARRAGA, J.A., MENDOZA-SALGADO, R.A., GALINA-TESARO, P., BELTRÁN-MORALES, L.F. & A. ORTEGA-RUBIO. (2015): Applying ecological diversity indices with ecosystem approach at ecoregional level and prioritizing the decree of new protected natural areas. *Interciencia* 40 (3): 179-184
- ESRI. (2012): ArcGIS Desktop. *ESRI-GIS Mapping Software*. ESRI Inc. CA, USA. <http://www.esri.com/>
- FLORES-DOMÍNGUEZ, A.D. & A.G. PRIEGO-SANTANDER. (2011): Zonificación funcional ecoturística de la zona costera de Michoacán, México a escala 1:250 000. *Revista Geográfica de América Central*, Número Especial EGAL 2011 Costa Rica, pp: 1-15.
- FORMAN, R.T. (1995): *Land mosaics: The ecology of landscape and regions*. Camb. Univ. Press, 632 p.
- GANZEI, K.S. & A.N. IVANOV. (2012): Landscape diversity of the Kuril Islands. *Geography and Natural Resources* 33 (2): 142-148
- HAINES-YOUNG, R. & M. CHOPPING. (1996): Quantifying landscape structure: a review to forested landscapes. *Progr. Phys. Geogr.* 20: 418-445
- HASSE, G. (1986): *Theoretical and methodological foundations of landscape ecology*. In: Landscape Ecology. Abstract of Lecture. International Training Course. Institute of Geography and Geocology, GDR Academy of Science, Leipzig, pp: 4-7
- HULSHOFF, R.M. (1995): Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecology* 10 (2): 101-111
- ISACHENKO, A.G. (1973): *Principles of landscape science and physical geography regionalization*. Trad. R.J. Zatorski. Edit. J.S. Massey, Melbourne, 311 p.
- KLIMINA, E.M. & Z.G. MIRZEKHANOVA. (2014): Developing the system of regional indices of landscape diversity for poorly developed territories. *Geography and Natural Resources* 35 (1): 88-93
- KOTLIAR, N.B. & J.A. WIENS. (1990): Multiple scales of patchiness and patch structure: a hierarchical framework for the study of heterogeneity. *Oikos* 59: 253-260
- LAVRINENKO, I.A. (2012): Landscape diversity of specially protected natural territories of Nenets Autonomous Okrug. *Geography and Natural Resources* 33 (1): 37-44
- MIKLÓS, L. (2012): The concept of the landscape and its acceptance in the practice. *Landscape & Environment* 6 (2): 93-104
- MIKLÓS, L. (2016): *The Landscape, the European Landscape Convention and the Law*. "Landscape and Landscape Ecology. Proceedings of the 17 th International Symposium on Landscape Ecology." In: Luboš HALADA, Andrej BAČA, Martin BOLTÍŽIAR (Editors), Published by the Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Nitra, Slovakia, pp: 7-17.
- MATEO, J. (1984): *Apuntes de Geografía de los Paisajes*. Universidad de La Habana, Ministerio de Educación Superior. La Habana, 470 p.
- MATEO, J. (2002): *Geoecología de los Paisajes: Bases para la Planificación y Gestión Ambiental*. Universidad de La Habana, Ministerio de Educación Superior. La Habana, 205 p.
- MATEO, J. (2007): *Geografía de los Paisajes. Primera Parte: Paisajes Naturales*. Universidad de La Habana, Ministerio de Educación Superior. La Habana, 211 p.
- MATEO, J. (2015): *Teoría y Metodología de la Geografía*. Editorial Universitaria Félix Varela. La Habana, 363 p.

- MOSS, M. 2001. Preamble. Pages ix-x, *In: D van der Zee y I. S. Zonneveld (eds.) Landscape Ecology Applied in Land Evaluation, Development and Conservation*. ITC pub. 81, IALE, pub. MM-1
- PREOBRAZHENSKII, V.S. (1966): *Landshaftnyye issledovaniya*. Editorial Nauka, Moscú, 127 p.
- PRIEGO-SANTANDER, A.G. & G. BOCCO-VERDINELLI. (2016): *Paisajes Naturales*. En: Moncada-Moya, O. & A. López-López (Coordinadores): *Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea*, Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México, 375 p.
- PRIEGO-SANTANDER, A.G., BOCCO VERDINELLI, G., PALACIO PRIETO, J.L., VELÁZQUEZ MONTES, A., ORTÍZ PÉREZ, M.A., HERNÁNDEZ SANTANA, J.R., GEISSERT KIENTZ, D., ISUNZA VERA, E., BOLLO MANENT, M., GRANADOS OLIVA, A., TROCHE SOUZA, C., BAUTISTA ZÚÑIGA, F., ROJAS VILLALOBOS, H.L. y A. GERARDO PALACIO. (2012): *Paisajes físico-geográficos de México a escala 1:500 000*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Marco atípico, edición digital. http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/index.php?option=com_abook&view=book&catid=12:coleccionesciga&id=50:mapa-de-paisajes-de-mexico&Itemid=16 (consulta: 2 de Febrero de 2016)
- PRIEGO-SANTANDER, A.G., CAMPOS, M., BOCCO, G. & L.G. RAMÍREZ-SANCHEZ. (2013): Relationship between landscape heterogeneity and plant species richness in the Mexican Pacific coast. *Applied Geography* 40: 171-178.
- RAMÍREZ-SÁNCHEZ, L.G. y A.G. PRIEGO-SANTANDER. (2012): Heterogeneidad geocológica de los paisajes del estado de Michoacán, México. *Memorias del IV Congreso de Geografía Tropical*, Palacio de las Convenciones de Ciudad de La Habana, Cuba, 14 al 18 de mayo de 2012. Instituto de Geografía Tropical de Cuba, GP-80, CD s/p.
- ROMME W.H. (1982): Fire and landscape diversity in subalpine forest of Yellowstone National Park. *Ecol. Monogr.* 52: 199-221.
- ROUGERIE, G. and N. BEROUTCHACHVILI. (1991): *Geosystemes et Paysages. Bilan et Methodes*. Collection Géographie. Edit. Armand Colin, Paris, 302 p.
- ROWE, J.S. (1995): Eco-Diversity, the key to Biodiversity, pp: 2-9 *In: A protected areas gap analysis methodology. WWF Canada Discussion Paper*, 68 p.
- SCHIPPERS, P., VAN DER HEIDE, C.M., KOELEWIJN, H.P., SCHOUTEN, M.A., SMULDERS, R.M., COBBEN, M.M., STERK, M., VOS, C.C. and J. VERBOOM. (2015): Landscape diversity enhances the resilience of populations, ecosystems and local economy in rural areas. *Landscape Ecology* 30: 193-202.
- SEMENOV, Y.M. and V.A. SNYTKO. (2013): The 50th anniversary of the appearance of V.B. Sochava's first article on the geosystem. *Geography and Natural Resources* 34 (3): 5-8.
- SHAW, D.J.B. & J. OLDFIELD. (2007): Landscape science: a Russian geographical tradition. *Annals of the Association of American Geographers* 97 (1): 111-126.
- SNACKEN, F. & M. ANTROP. (1983): *Structure and dynamics of landscape system*. *In: Landscape Synthesis, Geocological Foundations of Complex Landscape Management*. Veda Publ., Bratislava, Eslovenia, pp: 10-30.
- SOCHAVA, V.B. (1963): The definition of some concepts and terms in Physical Geography. *Dokl. In-ta geografii Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3: 50-59.
- SOLNTSEV, V.N. (1997): *Los paisajes contemporáneos como mecanismos sistémicos de la interacción entre la Sociedad y la Naturaleza*. En: *Cambios del Medio Natural. Aspectos Globales y Regionales*. Editorial de la Universidad Estatal de Moscú, pp: 8-16.
- STEIN, A. & KREFT, H. (2014): Terminology and quantification of environmental heterogeneity in species-richness research. *Biological Reviews*. doi: 10.1111/brv.12135
- TURNER, M.G. 1989. Landscape Ecology: The effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst* 20: 171-197.