

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LA HETEROGENEIDAD ESPACIAL DE ECOSISTEMAS URBANOS EN CARACAS, VENEZUELA: ESTUDIO DE CASO DE LA LOCALIDAD DE LÍDICE

Dayana Ortiz Castillo¹ y José Renato De Nóbrega²*

¹Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Centro de Ecología, Laboratorio de Eco-fisiología Vegetal, Caracas, Venezuela. ²Postgrado de Ecología y Laboratorio de Ecología Humana del Centro de Ecología Aplicada del Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. *dayamarortiz@gmail.com

RESUMEN

Los ecosistemas urbanos presentan características particulares vinculadas al modo de vida de la especie humana que deben ser consideradas para la comprensión de sus relaciones ecológicas. Por esto, los estudios ecológicos urbanos no pueden realizarse a escalas macro espaciales que homogenicen extensiones territoriales, sino debe considerarse su heterogeneidad espacial a escala fina y su variabilidad, lo cual incorpora el tipo de vegetación, el material de la superficie construida y la tipología de las edificaciones urbanas. Así, este trabajo evalúa la variabilidad temporal de la heterogeneidad espacial a escala fina de un ecosistema urbano como caso de estudio en la ciudad de Caracas, empleando una adaptación de un sistema de clasificación ecológica de alta resolución para paisajes urbanos y sistemas ambientales. La investigación enfatiza los niveles de complejidad de la dimensión espacial y temporal del sistema y la evolución experimentada particularmente por la cobertura de la vegetación. Para ello, se construyó un sistema de información geográfica con imágenes aéreas correspondientes a tres momentos temporales y se empleó el sistema de clasificación. La evaluación de la variabilidad temporal de la heterogeneidad reveló un aumento tanto en el número como en la riqueza de parches, con la correspondiente disminución del tamaño promedio de los mismos y un aumento en su compactación. Se detectaron cambios en la composición y configuración del mosaico urbano del área de estudio a nivel de paisaje. Esta perspectiva de estudio redimensiona las investigaciones urbanas, ya que comprende el paisaje urbano como un mosaico de unidades dinámicas de heterogeneidad ecológica.

Palabras clave: ecología urbana, análisis espacial, sistemas socio-ecológicos, biocomplejidad, sistemas de información geográfica.

Abstract

Temporary variability of the spatial heterogeneity of urban ecosystems in Caracas, Venezuela: Case study of the locality of Lídice

Urban ecosystems present particular characteristics linked to the way of life of the human species that must be considered in order to understand their ecological relationships. For this reason, urban ecological studies cannot be carried out at

macro-spatial scales that homogenize territorial extensions, but rather consider their fine-scale spatial heterogeneity and variability, which incorporates the type of vegetation, the material of the constructed surface and the typology of urban buildings. Thus, this work evaluates the temporal variability of the fine-scale spatial heterogeneity of an urban ecosystem as a case study in the city of Caracas, using an adaptation of a high-resolution ecological classification system for urban landscapes and environmental systems. The research emphasizes the levels of complexity of the spatial and temporal dimension of the system and the evolution experienced particularly by vegetation cover. For this, a geographic information system was built with aerial images corresponding to three time points and the classification system was used. The evaluation of the temporal variability of heterogeneity revealed an increase in both the number and richness of patches, with a corresponding decrease in the average size of the patches and an increase in their compaction. Changes in the composition and configuration of the urban mosaic of the study area were detected at the landscape level. This study perspective resizes urban research, since it includes the urban landscape as a mosaic of dynamic units of ecological heterogeneity.

Keywords: Urban ecology, spatial analysis, socio-ecological systems, biocomplexity, geographic information systems.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades son sistemas socioecológicos que suelen presentar una notable heterogeneidad espacial, debido a la fuerte influencia de los modos y estilos de vida de la especie humana en la configuración del paisaje urbano. En los estudios tradicionales de análisis espacial a escala de paisaje, las ciudades son consideradas como manchas o parches homogéneos dentro de un mosaico de paisajes naturales que presentan diversos grados de intervención humana. Sin embargo, la heterogeneidad espacial de los ecosistemas urbanos no puede estudiarse del mismo modo que la heterogeneidad en los ecosistemas naturales.

Las categorías usadas para la clasificación de unidades de heterogeneidad ecológica en ciudades deben incorporar elementos estructurales a escala fina de la heterogeneidad espacial. Estos elementos o componentes estructurales influyen en los procesos ecológicos que se expresan en un parche urbano, según sus coberturas relativas dentro de dicho parche. En este sentido, Cadenasso *y col.* (2007) plantearon que el tipo de vegetación, el material de la superficie construida y la tipología de las edificaciones, son elementos que influyen en el funcionamiento del ecosistema urbano debido a su efecto diferencial sobre la cantidad y distribución de organismos, materiales, energía e información.

Este tipo de perspectiva sobre la heterogeneidad espacial de la ciudad permite redimensionar las investigaciones ecológicas urbanas, al integrar elementos que diversas disciplinas estudian de modo fragmentado. El

comprender el paisaje urbano como un mosaico de unidades o parches de heterogeneidad ecológica compuestos por elementos biofísicos y socioculturales, en el que los procesos urbanos se entienden de modo integral como procesos ecológicos, representa asimismo un enfoque útil para la gestión, la planificación y la mitigación de los múltiples problemas ambientales vinculados a las ciudades.

En Venezuela, la toma de decisiones en la gestión urbana se realiza comúnmente según unidades político-territoriales (estados, municipios o parroquias), bajo criterios administrativos, socioeconómicos, culturales, urbanísticos o físico-naturales asociados a características geográficas, uso de recursos o factores de riesgo. Si bien las ciudades presentan generalmente un alto grado de deterioro ambiental, pocas veces se asumen criterios ecológicos en su gestión, posiblemente por considerar lo ecológico y lo social como categorías excluyentes. El abordar la heterogeneidad espacial de las ciudades venezolanas desde el enfoque de la ecología urbana, a partir de la delimitación de unidades de heterogeneidad ecológica, propiciaría la comprensión de procesos ecológicos a escala fina dentro de la ciudad. Estas unidades podrían pensarse como las unidades espaciales para la gestión urbana bajo criterios ecológicos. Resulta así de gran interés realizar estudios a escala local de la heterogeneidad espacial de los diversos sectores que componen áreas metropolitanas, como la ciudad de Caracas, pues permiten comprender los procesos ecológicos asociados a los ecosistemas urbanos que la componen.

Una manera de emprender el estudio sinérgico de la sostenibilidad del crecimiento urbano es a través del enfoque de la ecología urbana, que busca comprender las relaciones existentes entre patrones espaciales de urbanización y procesos ecológicos (Henríquez, 2014). La heterogeneidad espacial tiene innumerables influencias en los procesos del ecosistema, y por lo tanto en la sostenibilidad de las ciudades (McPhearson *y col.*, 2016; Pickett *y col.*, 2017; Zhou *y col.*, 2017). De aquí la importancia de realizar estudios de ecosistemas urbanos que incorporen evaluaciones detalladas de las unidades de heterogeneidad ecológica, sus características internas e interacciones con el resto del mosaico urbano y su variación en el tiempo.

Cadenasso *y col.* (2006) destacaron que se adquiere una mejor comprensión de la heterogeneidad espacial urbana cuando se aborda como un mosaico cambiante de parches, y la dinámica de dichos parches es espacialmente explícita y cuantificable. Así, la complejidad del ecosistema urbano aumenta con la complejidad de la configuración espacial y temporal de los parches que lo componen. La variabilidad temporal de los parches se vincula directamente con las dinámicas y procesos que se establecen en el sistema socioecológico, alterando su biocomplejidad. La biocomplejidad, de acuerdo con la definición de Pickett *y col.* (2005), es el grado en el cual los sistemas ecológicos que comprenden componentes biológicos, sociales y físicos incorporan tanto la heterogeneidad espacialmente explícita, como en este caso, como la

conectividad de la organización, y la contingencia histórica a través del tiempo. Estas tres dimensiones (heterogeneidad, conectividad, e historia) constituyen ejes de complejidad creciente, especialmente en sistemas acoplados humano-naturaleza. Corresponden a las dimensiones de la complejidad espacial, la complejidad de la organización, y la complejidad temporal vinculadas al concepto de biocomplejidad desarrollado originalmente por Cottingham (2002).

La dimensión espacio temporal de la complejidad se resumiría en la secuencia: riqueza de tipos de parches - frecuencia de los tipos de parches - configuración de los parches - cambio interno de los parches - cambio del mosaico de parches (Pickett *y col.*, 2005). La teoría de parches puede contribuir a la evaluación de la complejidad del sistema urbano, y la comprensión de la complejidad en su estructura espacial es un primer paso hacia la exploración de la relación entre la estructura del sistema y su funcionamiento (Pickett *y col.*, 2005).

A partir de la reconceptualización de la heterogeneidad urbana desde una perspectiva ecológica, Cadenasso *y col.* (2007) desarrollaron un novedoso modelo de clasificación del paisaje urbano que denominan HERCULES (por sus siglas del inglés: High Ecological Resolution Classification for Urban Landscapes and Environmental Systems), centrado en la lógica de parches. A diferencia de los esquemas clásicos, el parche es reconocido como una unidad de heterogeneidad, cuya identidad viene dada por las coberturas relativas de seis características que se desprenden de los tres elementos ya mencionados: vegetación, material superficial y edificaciones. El nuevo esquema tiene la ventaja de permitir el tratar cada elemento por separado.

Con base en lo referido, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar, por vez primera, la variabilidad temporal de la heterogeneidad espacial de un ecosistema urbano como caso de estudio en la ciudad de Caracas, mediante una adaptación de este nuevo enfoque metodológico. Se hizo énfasis en los niveles de complejidad de la dimensión espacial y temporal del sistema, y en la evolución experimentada particularmente por la cobertura de la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio. Se evaluó la variabilidad temporal de la heterogeneidad espacial del sistema socio-ecológico asociado a la localidad de Lidice, ubicada en la vertiente sur del Parque Nacional (P.N.) Waraira Repano, al noroeste de la ciudad de Caracas, capital de Venezuela. En la actualidad la localidad presenta espacios de urbanización planificada y de ocupación no planificada, esta última principalmente en las laderas de los cuerpos de agua (quebradas) que atraviesan la localidad de norte a sur (Ortiz, 2016). La ubicación geográfica del área de estudio en coordenadas UTM (Datum REGVEN) es entre 62555,60

y 63189,51 E y 1163425,55 y 1165173,93 N. La poligonal aproximada de la extensión territorial de la localidad para el año 2011, trazada según criterios referentes al área habitada por sus pobladores y los límites naturales establecidos por las quebradas que atraviesan el sector, se representa en la Figura 1. El área tiene una extensión de 564.057,51m².

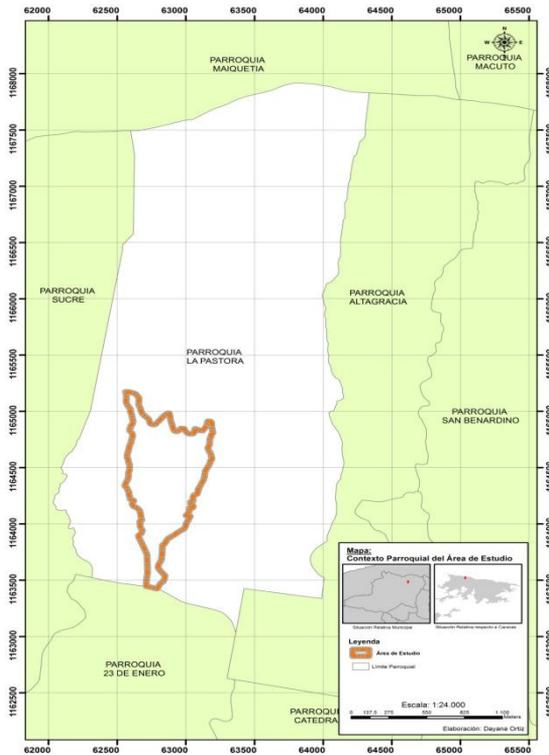


Figura 1. Ubicación espacial relativa de la localidad de Lidice respecto a la parroquia la Pastora y otras parroquias aledañas del Municipio Libertador en la ciudad de Caracas. Año 2011.

El análisis del paisaje se realizó para tres momentos dentro de un período de 75 años. Estos momentos son los años 1936, 1974 y 2011, en los cuales el paisaje expresa diferentes etapas de transformación de la localidad (Ortiz, 2016).

Procesamiento digital de fotografías aéreas. Las fotografías aéreas disponibles del área de estudio, en los tres momentos considerados, fueron procesadas digitalmente para ser incorporadas a un Sistema de

Información Geográfica (SIG) realizado con el software ArcGis 9.3 (ESRI ©). Las imágenes se georeferenciaron ajustándose en el SIG, de modo que pudiesen superponerse con la poligonal del área de estudio actual y proceder así al análisis espacial de los distintos sectores en los años correspondientes a las fotografías procesadas. Las fuentes de origen y características específicas de las fotografías empleadas se reportan en el Anexo 1.

Delimitación y clasificación de los parches. Se delimitaron cualitativamente los parches urbanos (unidades de heterogeneidad ecológica) detectados a escala local 1:1000, con base en la guía de interpretación de parches de Marshall (Cadenasso *y col.*, 2013), y las especificaciones de McGrath *y col.* (2007) y Haar y Marshall (2013). La delimitación de parches consistió en distinguir visualmente diferentes conglomerados espaciales heterogéneos contiguos, con base en habilidades de fotointerpretación con criterio ecológico urbano referido a las coberturas relativas de los componentes estructurales que influyen en los procesos ecológicos del ecosistema, tales como el tipo de vegetación, el material de la superficie construida y la tipología de las edificaciones. Cada conglomerado de heterogeneidad distinguible se delimitó como un parche. Como tamaño mínimo de parche se consideró 20 m en dos direcciones ortogonales respecto a la imagen, siguiendo la recomendación de Zhou *y col.* (2014).

Para la clasificación de los parches se empleó una adaptación del ya mencionado esquema de clasificación HERCULES, desarrollado por Cadenasso *y col.* (2007). Los tres elementos de la estructura biofísica del terreno urbano (las edificaciones, los materiales de la superficie y la vegetación) en los que se fundamenta la clasificación son desglosados en seis características, en el orden siguiente: (1) vegetación gruesa (árboles y arbustos), (2) vegetación fina (hierbas y gramíneas), (3) suelo desnudo, (4) pavimento, (5) edificaciones y (6) tipología de las edificaciones. Cada parche es clasificado con base en la cobertura relativa de cada una de las cinco primeras características enumeradas previamente. La cobertura relativa de cada característica se expresa en una escala de categorías ordinales, con el fin de minimizar inconsistencias en su estimación. Las categorías y su interpretación son las siguientes: 0: ausente; 1: presente hasta un 10%; 2: 11–35% de cobertura; 3: 36–75% de cobertura, y 4 > 75% de cobertura. La característica correspondiente a tipos de edificios se expresa en cuatro categorías nominales, identificadas cada una por una letra (Figura 2). Cada parche queda clasificado entonces en un espacio de seis dimensiones, donde todas las características en conjunto definen al parche de heterogeneidad. Este esquema da lugar a una secuencia alfanumérica - de cinco dígitos y una letra - que identifica a cada parche y describe su heterogeneidad estructural en los seis elementos mencionados (Figura 2). Cada característica puede variar de forma independiente, y la variación en cualquier característica puede definir un nuevo parche. De este modo,

parches con igual porcentaje de cobertura de vegetación gruesa pueden diferir con base en el porcentaje de la cobertura de edificios; dos parches con el mismo tipo y densidad de construcción se pueden distinguir si uno contiene mayor cobertura de vegetación gruesa.

PARCHE	VEGETACIÓN GRUESA	VEGETACIÓN FINA	SUELO DESC	PAVIMENTO	COBERTURA DE EDIFICIOS	TIPO DE EDIFICIOS
	4	1	0	1	2	S
	4	0	0	0	0	N
	1	2	0	3	2	C
	1	1	4	1	0	N
	1	1	0	3	2	M
	2	4	0	0	0	N

Figura 2. Ejemplos de parches urbanos clasificados usando la herramienta HERCULES. Las categorías de clasificación definidas como cubierta proporcional de la vegetación gruesa y fina, suelo desnudo, pavimento, y edificios se pondera en 5 niveles (0 = ninguno, 1 = presente 10%; 2 = 11- 35%; 3 = 36- 75%, y 4 = > 75%). Los tipos de edificios se identifican como N = ninguno, S = Sencillo, C = Conectado, o M = Mixto. (Tomado de: Cadenasso *y col.*, 2007).

Una vez delimitados los parches de la localidad existentes para cada uno de los años considerados, se vectorizó cada uno de los tipos de cobertura interna, estimando el área de cada polígono obtenido por medio del SIG. Así, los polígonos se combinaron con las capas vectorizadas de edificaciones, suelo desnudo, pavimento y vegetación para calcular las diversas coberturas internas de cada parche a partir de la superficie (m²) que ocupaban cada una de ellas. A partir de los porcentajes internos de cobertura de cada parche este se clasificó según el método ya descrito, sin considerar la característica “tipo de edificaciones”, debido a la imposibilidad de chequeos en campo de la misma.

Medidas descriptivas. A cada parche se midió el área (m²) y perímetro (m) y se calculó un índice de forma dado por el cociente entre su perímetro y el perímetro de la forma geométrica más simple o compacta con la misma área. En un formato poligonal o vectorial, como en este caso, la forma de

parche más compacta es el círculo. Parches compactos, de forma simple, tendrán valores del índice cercanos a 1, mientras que los parches geoméricamente más complejos tendrán valores superiores a 1.

En cada uno de los años considerados se caracterizó el paisaje de la localidad en términos de: (a) el número total de parches delineados y la riqueza de parches, entendido esto último como el número de tipos de parches distintos de acuerdo con su composición interna, (b) un índice de equidad o uniformidad de la distribución de las áreas entre los distintos tipos de parches, y un índice de dominancia, dado por el porcentaje que representa el área del parche más extenso, (c) un índice de diversidad de parches que integra la riqueza y la equidad, y (d) medidas descriptivas resumen del área e índice de forma de los parches (media aritmética, desviación estándar, coeficiente de variación, valor máximo y valor mínimo). Como índice de diversidad se utilizó el índice de Shannon:

$$H' = \sum_{i=1}^R p_i \ln p_i$$

donde p_i es el área relativa del tipo de parche i y R es la riqueza de parches.

Como índice de equidad se utilizó:

$$E = \frac{H'}{\ln R}$$

el cociente entre el valor observado del índice de Shannon y el máximo valor que adoptaría si todos los tipos de parches tuviesen la misma área. El índice E está acotado entre 0 y 1, con 1 indicando máxima equidad.

Se evaluó el cambio en el tiempo de la vegetación como elemento de cobertura dominante en los parches. Para ello se registró en cada año el número y área porcentual de aquellos parches en los que la vegetación (gruesa y/o fina) presentó los mayores rangos de cobertura (rangos 3 o 4, es decir, más del 36% del área del parche).

RESULTADOS

El número de unidades de heterogeneidad ecológica delimitadas y la riqueza de estas unidades aumentó en el tiempo (Tabla 1). Esto puede apreciarse en los mapas de los parches delimitados visualmente en cada año considerado, donde los parches son identificados por números del 0 en adelante (Figura 3), y en los mapas de tipos de parches según su composición interna, identificados con el código de cinco dígitos del sistema HERCULES (Figura 4).

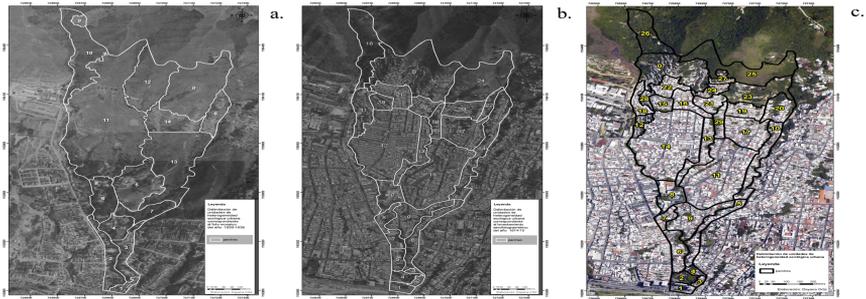


Figura 3. Mapas de las unidades de heterogeneidad ecológica urbana (parches) delimitadas para el ecosistema urbano de Lidice, Caracas, en los años evaluados: (a) 1936, (b) 1974, (c) 2011.

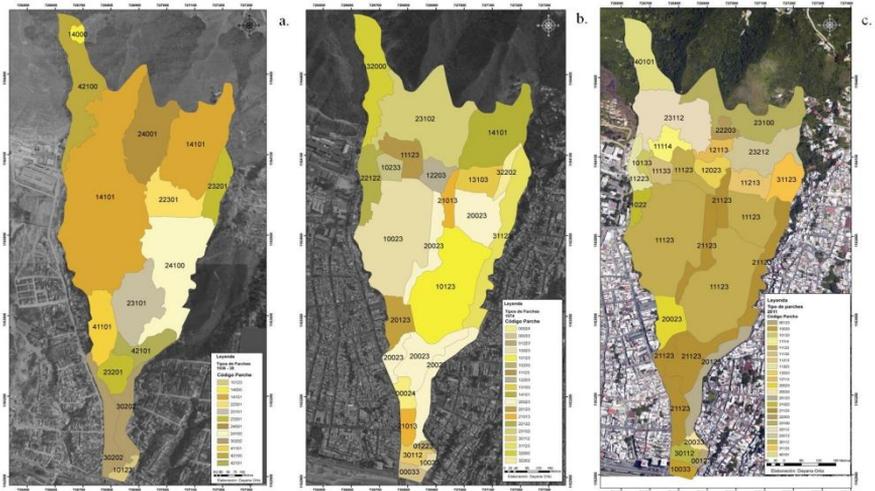


Figura 4. Mapas de la clasificación HERCULES de las unidades de heterogeneidad ecológica delimitadas para los tres momentos de estudio: (a) 1936-38, de los 15 parches delineados, 12 resultaron diferentes en cuanto a su composición interna; (b) 1974, de los 25 parches delineados, 19 resultaron diferentes en cuanto a su composición interna; (c) 2011, de los 30 parches delineados, 22 resultaron diferentes en cuanto a su composición interna.

Para 1936 se distinguían visualmente 15 parches de los cuales se identificaron 12 tipos distintos (Figuras 3a y 4a). En la mayoría predominaba las coberturas internas de vegetación fina y gruesa, y era escasa la cobertura de edificaciones. Sólo tres tipos de parches se repitieron, en este caso dos veces: el tipo 14101 (parches 11 y 0) caracterizado por un bajo porcentaje de vegetación gruesa, alto porcentajes de vegetación fina, baja cobertura de suelo descubierto, sin pavimento y escasa cobertura de edificaciones; el tipo 23201 (parches 8 y 4) con mayor

cobertura de vegetación gruesa que el anterior, pero menor porcentaje de vegetación fina, mayor cobertura de suelo descubierto, y similares porcentajes de pavimento y edificaciones; y el tipo 30202 (parches 2 y 3) con un porcentaje de vegetación gruesa aún mayor que los anteriores, sin vegetación fina y un mayor porcentaje de cobertura de edificaciones.

Para 1974 se delimitaron 25 parches de los cuales se identificaron 19 tipos diferentes (Figuras 3b y 4b). Sólo dos tipos de parches se presentan más de una vez: el tipo 20023 cinco veces (parches 6, 8, 9, 13 y 17) y el tipo 21013 dos veces (parches 5 y 16). Se caracterizan principalmente por su mayor cobertura de edificaciones, bajo a moderado pavimento, ausencia de suelo, moderada a baja vegetación.

Para 2011 el número de parches delimitados ascendió a 30, de los cuales se identificaron 22 tipos distintos (Figuras 3c y 4c). Solo dos tipos de parche se presentan más de una vez: el tipo 11123 cuatro veces (parches 11, 14, 16 y 17), y el tipo 21123 seis veces (parches 6, 7, 9, 10, 13 y 29), ambos caracterizados por el predominio de los componentes no naturales, pavimento y edificaciones.

El incremento del número de parches entre 1936 y 1974 fue de 67 %, más pronunciado que el incremento posterior entre 1974 y 2011, el cual fue sólo de 20%.

Muy pocos tipos parches se repitieron entre los años considerados. Así, sólo 2 de los 12 tipos de parches identificados en 1936 (aprox. 17%) se repitieron en 1974 (los tipos 14101 y 10123), mientras que sólo 4 de los 18 tipos de parches identificados en 1974 (aprox. 22%) se repitieron en 2011 (los tipos 31123, 30112, 20023 y 11123). El mosaico de parches cambia en el tiempo, tanto en número como en composición interna.

El tamaño de los parches disminuyó en el tiempo, tanto en promedio como en valores mínimo y máximo, así como en su variabilidad absoluta y relativa, dadas por la desviación estándar y coeficiente de variación, respectivamente (Tabla 1). La disminución en la variabilidad sugiere una tendencia en el tiempo hacia una mayor uniformidad en la distribución del tamaño entre los parches. La reducción porcentual en el tamaño promedio de los parches entre 1936 y 1974 fue del 40%, mucho mayor que la reducción experimentada posteriormente entre 1974 y 2011 del 17%.

El promedio del índice de forma alcanza un mayor valor en 1936 que en los años posteriores, lo cual sugiere un aumento en la compactación promedio de los parches en el tiempo, acompañando la disminución del tamaño promedio (Tabla 1). En la zona sur de la localidad, de suaves pendientes, existen parches adyacentes similares en su forma en los tres momentos de estudio.

La mayor diversidad de parches se presentó en la etapa intermedia de la secuencia histórica de transformación – año 1974 – según muestra el índice correspondiente, aunque la riqueza alcance su máximo posteriormente en 2011. Esto es producto de un mayor valor del índice de equidad para 1974, lo cual indica una distribución de la superficie entre los tipos de parches mucho más equitativa en ese año en comparación con los otros. Esto se corrobora en el valor del índice de dominancia. Para 1936 y 2011, años extremos en la secuencia, el tipo de parche más extenso representó un gran porcentaje del área (42% y 35%, respectivamente), mientras que el parche más extenso en 1974 sólo representó un 17% del área, un porcentaje mucho menor (Tabla 1).

El número y el área porcentual de los parches en los que la vegetación gruesa o fina predominan (más del 36% del área del parche) disminuyeron en el tiempo (Tabla 2). Para 1936 la vegetación es el componente predominante en 13 de los 15 parches del paisaje; estos 13 parches abarcaban el 95% del área de la localidad para ese momento (75% con preponderancia de vegetación fina y 20% con vegetación gruesa). Para 1974 el número y área porcentual de parches con predominio de vegetación se redujo drásticamente a prácticamente la mitad. Entre 1974 y 2011 la magnitud de la reducción del área porcentual es menor para la vegetación fina que para la vegetación gruesa. El porcentaje del área de parches con predominio de vegetación gruesa disminuyó de manera prácticamente constante (6 puntos porcentuales) entre 1936-1974 y 1974-2011.

Tabla 1. Medidas descriptivas del paisaje urbano de Lidice en cada etapa o año considerado.

	Años		
	1936	1974	2011
Número de parches	15	25	30
Riqueza de parches	12	19	22
Equidad	0,78	0,83	0,75
Diversidad de parches	1,95	2,44	2,31
Dominancia	42	17	35
Área de parches (m ²)			
Promedio	37603,83	22562,30	18801,92
Desviación estándar	42458,97	23740,48	19936,13
Coeficiente de variación	1,13	1,05	1,06
Mínimo	3038,58	2339,07	2145,82
Máximo	173068,95	85341,61	86804,05
Índice de forma			
Promedio	1,66	1,57	1,60
Desviación estándar	0,34	0,39	0,36
Coeficiente de variación	0,21	0,25	0,22
Mínimo	1,24	1,11	1,13
Máximo	2,37	2,51	2,45

Tabla 2. Número y área porcentual de parches en los que la vegetación gruesa o fina presenta rangos de cobertura 3 o 4 (más del 36% del área del parche) en cada uno de los años.

Componente	1936		1974		2011	
	Número	Área (%)	Número	Área (%)	Número	Área (%)
Vegetación fina	8	75	3	24	3	21
Vegetación gruesa	5	20	4	14	3	8
Total	13	95	7	38	6	29

DISCUSIÓN

La heterogeneidad espacial del paisaje urbano aumentó en el tiempo, al incrementar el número de parches de heterogeneidad y cambiar la composición interna de los mismos. El incremento en el número y tipo de parches expresa cambios en el mosaico urbano en el tiempo. Los resultados hacen evidente el incremento en la complejidad estructural del sistema socio-ecológico urbano, una de las dimensiones incorporadas en el concepto integral de biocomplejidad de un sistema.

La comprensión de la complejidad estructural creciente en el sistema en estudio requiere considerar entonces aquellos procesos y contingencias históricas que se manifestaron entre los tres momentos considerados, y que dejaron sus legados o herencias en el paisaje descrito.

El paisaje en 1936: condición rural. El primer momento considerado en la secuencia de transformación del paisaje, año 1936, refleja la etapa rural de poblamiento del área. De allí el menor número y riqueza de parches, en los cuales predominan las coberturas de vegetación en su composición interna. Los parches de gran tamaño se presentan entre las zonas media y norte de la localidad, muy poco urbanizadas, y corresponden a sectores de sabanas ubicadas entre las quebradas (parches 0, 11, 12, y 13). La vegetación herbácea se alterna con áreas de cultivos de una finca ubicada en la localidad para dicho momento. Destaca la presencia de áreas de sabana por encima del límite norte de la poligonal del área de estudio, lo que coincide con lo reportado por Vareschi (1969) para la zona. La vegetación gruesa corresponde a bosques ribereños vinculados a las quebradas (predomina en parches 4, 6, 7 y 10). Las escasas edificaciones están asociadas principalmente a parches de menor extensión ubicados al sur del área de estudio, más cercanas al centro de la ciudad (Figuras 3a y 4a).

El paisaje en 1974: efectos de la urbanización. El siguiente momento de la secuencia, año 1974, muestra un paisaje que manifiesta los efectos de dos procesos de intensificación de la ocupación humana del espacio, que ocurrieron luego de 1936. En primer lugar, un gran proceso de urbanización planificado y controlado producto del desarrollo en dos

etapas de la denominada Urbanización Obrera Municipal de Lídice, durante las décadas de 1940 y 1950. En segundo lugar, la proliferación de asentamientos no planificados (barrios), establecidos y desarrollados con mayor preponderancia a partir de la década de 1960 en el sector norte (colindante con el P.N. Waraira Repano) y en las laderas de los cuerpos de agua (quebradas) (Ortiz, 2016). Como resultado de estos procesos, el paisaje experimentó un incremento notable en el número y tipo de parches de heterogeneidad. Los dos parches de mayor tamaño corresponden precisamente a las áreas planificadas de la gran urbanización mencionada (parches 12 y 15). Resalta la forma alargada de los parches que corresponden a los asentamientos no planificados, pues estos siguen las márgenes de las quebradas que avanzan de norte a sur (parches 6, 11, 13, 14, 16 y 22). Estos procesos de ocupación humana del terreno explican que muchos parches presenten una mayor cobertura interna de edificaciones, exceptuando aquellos ubicados en la zona norte adyacente al P. N. Waraira Repano (Figura 3b), en los que destacan dos parches con viviendas incipientes alternadas con vegetación fina y gruesa (parches 0 y 24) y un parche con predominio de vegetación gruesa, asociada a la quebrada Agua Salud (parche 15).

El paisaje en 2011: condición actual. El tercer y último momento considerado refleja prácticamente la situación urbana actual. El número y riqueza de parches incrementó, pero en un porcentaje menor. Las mayores frecuencias de tipos de parches corresponden a las ya mencionadas zonas de asentamientos informales asociadas a los márgenes de las quebradas y a las áreas planificadas urbanísticamente de las dos etapas de la Urbanización Obrera Municipal de Lídice. Durante el periodo de 37 años transcurrido desde 1974, las viviendas improvisadas se extienden más allá del límite norte de la poligonal. Esta zona de asentamientos informales al norte se fragmenta en parches de menor tamaño, posiblemente relacionado con la consolidación de estas viviendas entre 1983 y 2002 (Ortiz, 2016). Esta consolidación urbana generó cambios en los tipos de edificaciones existentes, expresándose en la imagen como extensiones con una configuración distinta respecto a otras zonas de menor consolidación. Destaca el retroceso del área de asentamientos no planificados del extremo norte del parche 0, el cual puede estar vinculado con la vaguada ocurrida en 1999, fenómeno que provocó pérdidas de viviendas y vidas humanas en esta zona (Ortiz, 2016).

Variabilidad temporal no lineal en la heterogeneidad espacial de la localidad. El mayor incremento de la heterogeneidad espacial detectado entre 1936 y 1974 con respecto al observado entre 1974 y 2011 - en cuanto al aumento porcentual del número y tipo de parches y la disminución porcentual del tamaño promedio de los mismos - refleja que los cambios experimentados en la localidad al pasar de la etapa rural a la urbana fueron más intensos que los cambios urbano-urbano posteriores. Al respecto, Pickett *y col.* (2016) destacaron que el humano, por ser

componente fundamental del ecosistema urbano, amplifica la dinámica de su heterogeneidad en comparación con la de los sistemas donde ejerce un menor dominio.

Pickett *y col.* (2016) plantearon que la heterogeneidad es más que un mero patrón. Al ser dinámica, la heterogeneidad puede actuar a la vez como impulsora y como resultado de procesos biofísicos y sociales y sus interacciones. Una matriz heterogénea en un momento dado es resultado de estados anteriores de heterogeneidad, ya que la interacción de la heterogeneidad con procesos y eventos en un momento dado condiciona la heterogeneidad en momentos posteriores. Con base en esto, la variación del mosaico de heterogeneidad espacial en la localidad urbana de Lídice, desde el período de uso rural del suelo (1936) al período de uso urbano reflejado en al año 1974, podría comprenderse como una compleja interacción de los mosaicos correspondientes a los distintos momentos consecutivos de procesos de cambios urbano-urbano en una heterogeneidad dinámica.

Con relación a la configuración de los parches, la adyacencia de parches similares encontrados en la zona sur de la localidad en los tres momentos evaluados se explica a que en la misma ocurrieron los primeros asentamientos urbanos, los cuales comenzaron a consolidarse cuando aún en la zona media y alta se daba un uso rural del territorio (Ortiz, 2016). Esta configuración urbana temprana al sur permaneció, manifestando cambios menores en su uso a través del tiempo. En cuanto a la zona media, en la que se encuentra el área urbana planificada, la misma ha sufrido modificaciones en décadas recientes que generan patrones similares de parches adyacentes que se evidencian en los resultados del año 2011.

De la potencialidad del enfoque y la metodología. Este tipo de análisis temporal de la complejidad espacial de los ecosistemas urbanos permite comprender la estructuración de las áreas urbanas, proceso que depende de múltiples factores (Vasishth y Sloane, 2002). En este sentido, Cadenasso *y col.* (2006) plantearon que se pueden generar mapas de unidades espaciales con base en diversas características como la densidad de población, la zonificación, el tiempo de desarrollo, la distribución del ingreso, el nivel de educación de las personas o el uso del suelo. Cada uno de estos mapas podría mostrar una configuración del sistema en un tiempo determinado, estructurado por una o varias variables. La comparación de las estructuras de parches que surgen desde perspectivas diferentes puede dar idea de la relación entre la estructura integrada y el funcionamiento del sistema en estudio. La configuración de unidades de heterogeneidad espacial delimitadas a partir de los elementos de cobertura del suelo urbano - tales como vegetación gruesa, vegetación fina, suelo descubierto, pavimento y edificaciones, considerados en el presente estudio - podría superponerse con parches generados con base en características socioculturales del sistema -como las señaladas en el párrafo anterior -

para la construcción así de un mapa base de estructura integrada. Este mapa integrado podría relacionarse posteriormente con procesos del ecosistema urbano - tales como la transferencia de calor, la captura de carbono, cambios en la biodiversidad, entre otras - para de esta manera estudiar relaciones ecológicas urbanas estructura-función.

CONCLUSIONES

Un aspecto a considerar en el estudio de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas urbanos es su variabilidad temporal, la cual se vincula directamente con las dinámicas y procesos que se establecen en este tipo de sistemas ecológicos alterando su biocomplejidad. La complejidad del ecosistema aumenta en función del aumento en la complejidad de la configuración espacial de los parches que lo componen.

En el estudio del sistema socio-ecológico de Lídice, como caso de un ecosistema urbano de la ciudad de Caracas, la evaluación de la variabilidad temporal de la heterogeneidad espacial en tres momentos de su historia (1936, 1974 y 2011) reveló un aumento tanto en el número como en la riqueza de parches, con la correspondiente disminución del tamaño promedio de los mismos y un aumento en su compactación. Se detectaron cambios en la composición y configuración del mosaico urbano del área de estudio a nivel de paisaje.

Este tipo de perspectiva permite redimensionar las investigaciones urbanas, ya que comprende el paisaje urbano como un mosaico de unidades de heterogeneidad ecológica dinámica que se componen de aspectos biofísicos y socioculturales, en el que los procesos urbanos de modo integral se entienden como procesos ecológicos. Representa así un enfoque útil para la gestión y planificación de las ciudades, y la mitigación de la multiplicidad de problemas ambientales vinculados a las mismas.

AGRADECIMIENTOS

A Adrián León por su valiosa asesoría con el sistema de información geográfica y los análisis espaciales realizados. A Ricardo Noite y Danyela Vallejo por su colaboración en campo y apoyo técnico en la vectorización de mapas. El software ArcGis 9.3 (ESRI ©) fue facilitado por la Dirección General de Conservación de Cuencas Hidrográficas del MINEC. Agradecemos a los árbitros de este trabajo por sus observaciones, las cuales permitieron una versión final mejorada. El trabajo expone parte de la tesis doctoral realizada por Dayana Ortiz en el Postgrado de Ecología de la UCV, incorporando nuevos resultados y análisis.

LITERATURA CITADA

- Cadenasso, M., S.T.A. Pickett y J. Grove. 2006. Dimensions of ecosystem complexity: Heterogeneity, connectivity, and history. *Ecological Complexity* 3: 1-12.
- Cadenasso, M., S.T.A. Pickett y K. Schwarz. 2007. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Front Ecol Environ.* 5(2): 80-88 pp.
- Cadenasso, M.L., S.T.A. Pickett, B. McGrath y V. Marshall. 2013. Ecological Heterogeneity in Urban Ecosystems: Reconceptualizing Land Cover Models as a Bridge to Urban Design. En: S.T.A. Pickett, M. L. Cadenasso, Brian McGrath (Eds), *Resilience in Ecology and Urban Design: Linking Theory and Practice for Sustainable Cities*, 107-129 pp.
- Cottingham, K. 2002. Tackling biocomplexity: the role of people, tools, and scale. *BioScience* 52:793-99.
- Haar, S. y V. Marshall, 2013. Mega Urban Ecologies. En: *Urban Design Ecologies Reader*, B. McGrath (ed.). London: Wiley.
- Henríquez, C. 2014. Modelando el crecimiento de ciudades medias: Hacia un desarrollo urbano sustentable. Ediciones Universidad Católica de Chile. 287 pp.
- McGrath, B., V. Marshall, M. L. Cadenasso, M. Grove, S. T. A. Pickett, R.A. Plunz, y J. Towers. 2007. *Designing Patch Dynamics*: Baltimore. New York: Columbia University.
- McPhearson, T., S. T. A. Pickett, N. Grimm, J. Niemelä, M. Alberti, T. Elmqvist, C. Weber, D. Haase, J. Breuste y S. Qureshi. 2016. Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities. *BioScience*, Volume 66, Issue 3, Pages 198-212, <https://doi.org/10.1093/biosci/biw002>
- Ortiz, D. 2016. Estudio de la heterogeneidad espacial en ecosistemas urbanos: Caso del sistema socio-ecológico vinculado a la localidad de Lídice, Parroquia La Pastora, en la ciudad de Caracas. Tesis Doctoral presentada ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al título de Doctora en Ciencias mención Ecología. Postgrado de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 269 pp.
- Pickett, S.T.A., M.L. Cadenasso, E.J. Rosi-Marshall, K.T. Belt, P. M. Groffman, J. M. Grove, E. G. Irwin, S. S. Kaushal, S.L. LaDeau, C. H. Nilon, C. M. Swan y P. S. Warren. 2017. Dynamic heterogeneity: a framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems. *Urban Ecosyst.* (2017) 20:1-14.
- Vasishth, A. and D., Sloane. 2002. Returning to ecology: an ecosystem approach to understanding the city. In: Dear, M. J. (Eds.). *From Chicago to L. A.: Making Sense of Urban Theory*. Sage Publishers Thousand Oaks. 347-366 pp.
- Vareschi, V. 1969. Las sabanas del Valle de Caracas. *Acta Botánica Venezolánica*. Vol. 4 (1/4): 425-522 pp.
- Zhou, W., M. Cadenasso, Schwarz, K. y S.T.A. Pickett. 2014. Quantifying Spatial Heterogeneity in Urban Landscapes: Integrating Visual Interpretation and Object-Based Classification. *Remote Sens* 6: 3369-3386 pp.
- Zhou, W., S.T.A. Pickett y M.L. Cadenasso. 2017. Shifting concepts of urban spatial heterogeneity and their implications for sustainability. *Landscape Ecology* 32, 15-30. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0432-4>.

ANEXOS

ANEXO 1. Especificaciones técnicas de las fotografías aéreas históricas del área de estudio (Fuente: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, IGVSB).

CÓDIGO	FECHA DE VUELO	ALTURA RELATIVA	TIPO DE CÁMARA	ESCALA
Misión 8-385	Año 1936-1938	4200 m.	RMK 21	Aproximada:
Misión 8-972				1:70.000
030198-5294	Año 1974-1975	3800 m.	Wild RC-10	1:25.000
0304166-488	Año 1983	2346,96 m.	Wild RC-10	De foto: 1:10.000
0304193-656	Año 2002	-	Wild RC-30	De vuelo: 1:25.000

La fotografía aérea de alta resolución del área de estudio tomada en 2011 fue obtenida en el Gobierno de Distrito Capital.