

RESILIENCIA GENERAL

DEL PAISAJE URBANO: EL ANÁLISIS CARTOGRÁFICO APLICADO EN QUERÉTARO, MÉXICO

GENERAL URBAN LANDSCAPE RESILIENCE: APPLIED CARTOGRAPHIC ANALYSIS IN QUERÉTARO, MEXICO

Dovile Kukukaite ^{1*}

E-mail: dkukukaite09@alumnos.uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2180-4206>

Miguel Ángel Bartorila ¹

E-mail: miguel.bartorila@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1078-4956>

Universidad Autónoma de Querétaro. México.

*Autor de correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Kukukaite, D. & Bartorila, M. A. (2025). Resiliencia general del paisaje urbano: el análisis cartográfico aplicado en Querétaro, México. *Universidad y Sociedad*, 17(2), e5024.

RESUMEN

El cambio climático inquieta a los investigadores, porque se vive sus efectos a través de las condiciones climáticas extremas y los desastres naturales. Se tiene que preparar el hábitat para estas perturbaciones imprevistas. La teoría de la resiliencia general afirma que cualquier sistema socio ecológico puede tener una estructura capaz de absorber cualquier tipo de perturbación. Como el paisaje puede ser considerado un sistema socio ecológico, puede ser resiliente a las condiciones inciertas y cambiantes, aceleradas por el cambio climático y la incertidumbre social. Para saber qué es la resiliencia general del paisaje urbano, cómo comprenderla y analizarla, este artículo interrelaciona las teorías existentes y operacionaliza sus parámetros. Con base en la investigación documental, se plantea que la superposición socio ecológica, la continuidad espacial, y la densidad heterogénea en la apertura al intercambio son los principios básicos en el estudio de la resiliencia general del paisaje urbano. Adicionalmente, creamos un marco de análisis cartográfico para comprender la resiliencia general del paisaje y lo aplicamos en cinco sectores urbanos de Querétaro (México). Se presenta los resultados en cartografías de acuerdo con los principios básicos definidos anteriormente. Los casos de estudio demuestran que el paisaje de la ciudad carece de resiliencia general, pero evidencia que, a través de la cartografía, se pueden indicar los espacios no favorables e, incluso, sugerir la posible solución.

Palabras clave: Resiliencia general, Urbanismo de paisaje, Heterogeneidad en la densidad, Superposición socio ecológica, Continuidad espacial.

ABSTRACT

Climate change concerns researchers because its effects are experienced through extreme weather conditions and natural disasters. Habitat must be prepared for these unforeseen disturbances. The general resilience theory states that any socio-ecological system can have a structure capable of absorbing any type of disturbance. Since the landscape can be considered a socio-ecological system, it can be resilient to uncertain and changing conditions, accelerated by climate change and social uncertainty. To understand what general resilience of the urban landscape is, how to comprehend and analyze it, this article interrelates existing theories and operationalizes their parameters. Based on documentary research, it is proposed that socio-ecological overlap, spatial continuity, and heterogeneous density in openness to exchange are the basic principles in the study of the general resilience of the urban landscape. Additionally, we created a cartographic analysis framework to understand the general resilience of the landscape, applying it to five urban sectors in Querétaro (Mexico). The results are presented in cartographies according to the previously defined basic principles. The case studies demonstrate that the city's landscape lacks general resilience, but also indicate that,

through cartography, unfavorable spaces can be identified and even possible solutions suggested.

Keywords: General resilience, Landscape urbanism, Heterogeneity in density, Social-ecological overlap, Spatial continuity.

INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento de la filosofía de la complejidad, se ha vivido en un entorno social incierto. La condición de la sociedad del riesgo se agrava aún más por el calentamiento global, lo que hace cada vez más difícil predecir las circunstancias ambientales del hábitat. Se deben estimar las condiciones futuras y los posibles riesgos para trazar pautas del diseño. Sin este punto de vista, se crean paisajes que resultan fragmentados y deteriorados. La construcción de elementos urbanos a menudo funciona como barreras para la continuidad ecológica y como enclaves de marginación social. Se pueden encontrar muchos ejemplos de paisajes urbanos que son incapaces de adaptarse a las condiciones cambiantes del lugar. En otras palabras, esos paisajes no son resilientes: pierden el equilibrio en futuros previsibles (Schmidt, 2022). De ahí que la resiliencia sea una propiedad esencial de un paisaje urbano para evitar desastres y facilitar la calidad de vida y la seguridad de sus habitantes.

En un entorno complejo y en constante cambio, el urbanismo de paisaje investiga la relación entre la teoría ecológica y el urbanismo (Waldheim, 2016). Por tanto, el paisaje es un medio capaz de responder a la transformación y adaptación, operando como modelo de procesos urbanos. La evaluación de procesos amplía las perspectivas sobre la forma y el espacio. Por ejemplo, la propuesta de Koolhaas y OMA para el Parque de la Villette en París permite que los patrones de circulación horizontal entrecrucen las bandas programáticas y apoyen el intercambio entre ellas. Waldheim (2016) recopila este y otros ejemplos similares en la teoría del urbanismo de paisaje. Es la perspectiva que compartimos sobre el diseño urbano, basada en la comprensión de las interacciones espaciales en las que los organismos y los flujos participan en un paisaje (Picket et al., 2013).

Por lo demás, un paisaje presenta propiedades sistémicas, ya que puede ser considerado como un conjunto de elementos y funciones que, por su naturaleza y disposición, confieren a cada territorio un aspecto determinado. La teoría del urbanismo de paisaje afirma que un paisaje es un campo en el que ocurren procesos urbanos (Waldheim, 2016). En consecuencia, se considera que los procesos socio ecológicos del paisaje urbano hacia la resiliencia pueden ocurrir a través de cierta función de las variaciones espaciales. Además, el paisaje es un sistema vivo que se adapta a las condiciones ambientales

(Cumming, 2011). Por lo tanto, éste puede describirse como un sistema adaptativo, particularmente socio ecológico, ya que “los subsistemas sociales y naturales coevolutivos se conectan a través de retroalimentación, desfases temporales e interacciones entre escalas” (Fischer, 2018, p.143).

Como todos los sistemas socio-ecológicos, el paisaje también tiene la capacidad de resiliencia: la resistencia a las perturbaciones y la capacidad de adaptarse a los cambios para mantener sus funciones principales (Cumming, 2011; Schmidt, 2021; Walker & Salt, 2006;). Según la teoría de Walker & Salt (2006), los factores de resiliencia general describen la capacidad de cualquier sistema para resistir, adaptarse y recuperarse de cualquier tipo de perturbación. Por lo tanto, en el diseño de paisajes urbanos, los sistemas socio-ecológicos se relacionan con los servicios ecosistémicos y el espacio a través de los atributos de resiliencia socioespacial (Walker & Salt, 2006). La comprensión de estas relaciones orienta el análisis y el diseño hacia la resiliencia general del paisaje. Asimismo, la ecología del paisaje presenta herramientas morfológicas para entender su funcionamiento (Forman & Godron, 1984).

En este artículo se propone cómo se pueden reflejar las interacciones socio ecológicas resilientes y qué pautas se pueden seguir para crear paisajes urbanos que sean resilientes a cualquier perturbación en tiempos de incertidumbre. Se revisa la literatura existente, se construye el concepto de resiliencia general del paisaje urbano para estudiar sus relaciones y definir sus principios. Estos principios guían la descripción y el análisis cartográfico. A continuación, se presenta una descripción más detallada de la metodología aplicada y los resultados obtenidos que son experimentados en cinco sectores urbanos de Querétaro, México. Al final, se discute los resultados que describen las variaciones espaciales de los paisajes urbanos que influyen en su resiliencia general.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de crear una metodología de análisis de la resiliencia general de un paisaje urbano, dividimos la investigación en tres etapas: (1) la definición y operacionalización de la resiliencia general para el paisaje urbano, (2) la construcción del marco de análisis con base en los principios básicos de la resiliencia general del paisaje urbano, y (3) la aplicación cartográfica del análisis en casos de estudio en la ciudad de Querétaro. La metodología se apoya en las teorías de resiliencia general, espacial y paisajística en relación con los principios de la ecología del paisaje y del urbanismo de paisaje. Interrelacionamos los conceptos existentes para integrarlo en uno nuevo que refleja la resiliencia de los paisajes urbanos como sistemas socio-ecológicos de una manera general.

Asimismo, se revisa los ejemplos que muestran las posibilidades de cuantificar y representar espacialmente la resiliencia general. Allan et al. (2013) y Cumming (2011) han propuesto la mayoría de los procesos operativos en la representación espacial de sistemas socio-ecológicos. Se amplían con la literatura adicional para adaptarlos al contexto urbano, luego se infiere los parámetros operativos según los elementos paisajísticos. Finalmente, se genera los principios básicos para el análisis de la resiliencia general del paisaje urbano, se investiga las medidas óptimas para su caracterización y se comprueba con la aplicación del análisis en cinco sectores urbanos de Querétaro, México.

Del paisaje en el diseño urbano a la resiliencia general del paisaje

Regularmente, los diseñadores urbanos, arquitectos y planificadores contemplan el paisaje desde una perspectiva visual. Los consideran como parches verdes dentro de una ciudad que proporcionan el hábitat para la vida silvestre y la biodiversidad. Sin negar los beneficios mencionados, un paisaje es mucho más que simplemente un verdor. Desde el punto de vista del urbanismo de paisaje, el diseño urbano de un lugar depende básicamente de su paisaje: se reconoce así el potencial de un paisaje para operar como medio para procesos urbanos. Waldheim (2016) lo describe como un medio indeterminado para condiciones urbanas que exigen cambios.

Siguiendo los principios de Waldheim (2016), se supone que ese medio puede tener cierta configuración que genera condiciones adecuadas para los sistemas socio-ecológicos desde una manera resiliente. Revisamos las teorías existentes sobre resiliencia y seleccionamos aquellas que reflejan la posibilidad de una comprensión general de los espacios resilientes.

Walker & Salt (2006) presentan el concepto de resiliencia general: la capacidad de un sistema para adaptarse y absorber perturbaciones imprevistas. Ellos destacan tres factores que determinan la resiliencia general de los sistemas adaptativos: diversidad, modularidad y capacidad de retroalimentación. La diversidad de un sistema socio ecológico describe el número de diferentes tipos de componentes sociales y ecológicos que lo componen. El modularidad se refiere a la agrupación de componentes dentro del sistema. Por último, la capacidad de retroalimentación representa el tiempo y la potencia de la respuesta que genera el sistema a las perturbaciones.

Por otro lado, Cumming (2011) sugiere que la resiliencia de un sistema socio ecológico influye y es influenciada por el espacio en el que se encuentra. Llamándola como la teoría de la resiliencia espacial, el autor plantea la posibilidad de comprender la resiliencia de los sistemas socio ecológicos a través del espacio y, en consecuencia, de crear espacios resilientes. Actualmente, Schmidt (2022)

tiene el concepto más desarrollado de resiliencia del paisaje. Tras revisar el estado del arte existente, la autora lo relaciona con la capacidad del paisaje para recuperarse rápidamente de eventos disruptivos, crisis o restablecer el equilibrio.

Considerando lo anterior, se sugiere que la resiliencia general del paisaje es una función de variaciones espaciales que permite que un paisaje absorba y se recupere rápidamente de cualquier perturbación. Esta idea se puede aplicar a cualquier tipo de paisaje. Sin embargo, se está interesado en el contexto urbano, ya que es especialmente difícil predecir amenazas específicas a un paisaje urbano. Esto se debe a que un paisaje urbano no es sólo un medio ecológico, sino también un medio para transformaciones sociales, económicas y culturales (Elmqvist et al., 2013).

Operacionalización de la resiliencia general del paisaje urbano y nivel de apertura al intercambio

Como cualquier sistema, un paisaje puede describirse a través de sus límites, componentes y relaciones entre ellos. Según los principios de la ecología del paisaje, se interpreta los límites como un área de interés del paisaje, los componentes como un mosaico de diferentes parches y límites entre ellos, y las relaciones como una matriz donde los componentes pueden interactuar (Forman & Godron, 1984). En adelante utilizamos estos conceptos para determinar los elementos del paisaje.

Componentes del paisaje urbano que describen su resiliencia general.

La consideración de los componentes del paisaje como un mosaico de parches lleva al cuestionamiento de qué tipo de parches se deben identificar y cómo se deben agrupar. Cumming (2011) afirma que la cobertura del suelo y su uso describen las relaciones ecológicas y sociales que se encuentran en el espacio. Para definir las categorías de uso y cobertura del suelo, se intersecciona las variaciones espaciales y los factores de resiliencia general. Se considera las variaciones espaciales generales, que no son específicas de una ubicación en particular, para crear un modelo general de análisis de paisaje. Según Forman & Godron (1984), el mosaico de un paisaje básicamente depende del acomodo de sus parches y de los límites entre ellos.

No obstante, se encuentra algunas contradicciones al sintetizar los resultados de la intersección (Tabla 1). Por ejemplo, se nota que la capacidad de retroalimentación se reduce cuando se busca aumentar la diversidad y viceversa. Este conflicto se da cuando se busca la apertura óptima de los límites o el equilibrio entre lo homogéneo y lo heterogéneo. Retomamos estos parámetros como el nivel de apertura: se busca una mayor apertura al intercambio (paisaje heterogéneo con límites abiertos) para

aumentar la diversidad en el paisaje, y una menor apertura al intercambio (paisaje homogéneo con límites cerrados) para desarrollar la capacidad de retroalimentación.

Sin embargo, en lugar de buscar un valor intermedio de la apertura para equilibrar la diversidad y la capacidad de retroalimentación, la resiliencia general optima se puede lograr a través de la modularidad. Espacialmente, ésta se presenta como la heterogeneidad en la densidad de apertura: unos espacios cerrados homogéneos entre otros abiertos y heterogéneos. Básicamente, el principio de la porosidad se constituye en los espacios abiertos que funcionan como membranas permeables que permiten el paso de algunos componentes, pero no de otros, donde prospera la diversidad (Picket et al., 2013).

Tabla 1: Variaciones del paisaje que teóricamente sustentan los factores de resiliencia general.

Factor de resiliencia general (Walker & Salt, 2006)	Ecología del paisaje (Forman & Godron, 1984)	Variaciones del paisaje que lo sustentan desde el punto de vista ecológico	Variaciones del paisaje urbano que lo sustentan desde el punto de vista social
Diversidad	Parches y límites entre ellos	Alta conectividad (Peterman et al., 2016) y una distancia corta entre diferentes componentes (Gilarranz, 2020)	Usos mixtos y manzanas cortas (Jacobs, 1993, citado en Allan et al., 2013, p.247)
Modularidad		Alta conectividad y una heterogeneidad espacial en la densidad de los fragmentos de hábitat (Gilarranz, 2020)	Forma urbana policéntrica (Batty, 2001; Kloosterman & Musterd, 2001, citado en Allan et al., 2013, p.247) y una flexibilidad de la red; Moudon, 1989, citado en Allan et al., 2013, p.247)
Capacidad de retroalimentación		Baja conectividad y un contexto homogéneo (Peterman et al., 2016)	Áreas cerradas y baja densidad del vecindario (Mouratidis & Poortinga, 2020)

Fuente: Elaboración propia.

Los componentes sociales pueden ser caracterizados por los diferentes tipos de uso del suelo. De acuerdo con el esquema de Santos (1986), se distingue el uso institucional, comercial o residencial del suelo como su participación en el subsistema social. Los diferentes niveles de apertura al intercambio social se relacionan con los diferentes tipos de uso del suelo. Por ejemplo, se considera que el uso residencial es el más cerrado al intercambio porque el acceso a interactuar está determinado únicamente por los habitantes del sector. Por otro lado, el uso comercial está abierto a los actores sociales que busquen un intercambio comercial. Finalmente, el uso institucional es el más abierto al intercambio social, ya que es público y el acceso se restringe únicamente en función de su uso específico. Además, la apertura al intercambio de un parche puede variar debido a sus límites. En un contexto social, los más comunes son las barreras físicas, como muros y rejas. Así, un parche abierto al intercambio social por su uso puede considerarse cerrado si lo delimitan muros o rejas.

Adicionalmente, la apertura al intercambio ecológico está relacionada con el suelo como organismo vivo y su cobertura. Partiendo del concepto de suelo vivo, las diferentes coberturas del suelo permiten participar más o menos en los procesos de sucesión ecológica (Margalef, 1997). Un suelo sellado tiene un potencial muy bajo para desarrollar un intercambio ecológico. No obstante, el suelo desnudo permite el intercambio físico y biológico a nivel del suelo. Por último, el suelo con vegetación o cuerpos de agua tiene el potencial más significativo para apoyar el intercambio ecológico, ya que ofrece un hábitat para seres vivos más grandes. Las relaciones entre los diferentes parches de vegetación se describen con su forma y sus conexiones permiten comprender cómo se mueven y se dispersan las diferentes especies. En el caso del paisaje urbano, el intercambio ecológico es más limitado, pues la mayoría de las zonas verdes están aisladas o separadas.

Paisaje como medio para las relaciones socio ecológicas

De manera similar, las funciones específicas de un lugar, las podemos identificar a través del área de dinámica entre los componentes. En cierta manera, la conectividad describe la relación entre los diferentes componentes del sistema – el uso y la cobertura del suelo, y el paisaje indica la posibilidad que los sistemas socio ecológicos tienen

para desarrollarse de una manera resiliente. Los procesos socio-ecológicos directos ocurren sólo donde ciertas áreas de uso del suelo integran vegetación, agua o al menos suelo desnudo. El medio para la integridad socio-ecológica puede describirse por la superposición de diferentes usos del suelo y el paisaje abierto al intercambio ecológico.

En conjunto, la posibilidad de que un paisaje desarrolle relaciones socio-ecológicas depende, en gran parte, de su continuidad espacial. La continuidad socio espacial expresa las posibilidades que un paisaje ofrece para el intercambio y la convivencia social. La continuidad ecológica es una conexión entre diferentes parches de hábitat natural. Solamente una matriz de paisaje continua, la que no presenta fracturas al intercambio social o ecológico, puede ser resiliente (Cumming, 2011).

Principios para el análisis de la resiliencia general del paisaje

En este punto, se concluye que la operacionalización de la resiliencia general del paisaje urbano depende de su uso y cobertura del suelo. Diferentes usos y coberturas del suelo presentan diferentes niveles de apertura al intercambio. Como características del paisaje, la superposición de parches sociales y ecológicos, la continuidad espacial y la heterogeneidad en la densidad de apertura, permiten la descripción de su resiliencia general. Se clasifica estas características como principios de la resiliencia general del paisaje. A continuación, los describimos a detalle y se sugiera cómo se puede leer en una cartografía para interpretar la resiliencia general de un paisaje urbano. De acuerdo con los resultados de una revisión de investigaciones existentes se genera la medición de parámetros espaciales específicos relacionados con los tres principios. Se divide el modelo de análisis según los tres principios establecidos anteriormente.

Principio I: Superposición socio ecológica

Se considera que la superposición socio ecológica es la intersección de espacios abiertos al intercambio ecológico con diferentes usos del suelo. Ésta demuestra los espacios donde los sistemas socio ecológicos operan directamente. Se afirma que la superposición socio ecológica se da cuando áreas de alto potencial para sustentar la vida cubren diversos usos del suelo y los servicios ecosistémicos locales resultan para fines tanto personales como comunitarios.

Walker & Salt (2006) resaltan la importancia de superposición con relación a la resiliencia general. Y aunque ellos hablan de la superposición de derechos y la combinación de propiedades públicas y privadas, su intersección con los ecosistemas también es sustancial. El cambio climático afecta el acceso a los servicios de ecosistemas locales, y los vulnerables socios económicamente son los que tienen el peligro de no acceder a algunos de ellos.

La combinación de roles cívicos y gubernamentales en el cuidado de los ecosistemas locales permite la protección y conservación de los servicios ecosistémicos (Elmqvist et al., 2013).

Por ejemplo, las situaciones ecotonales, como nuevas categorías de estudio, permiten comprender el nivel de doble marginación: urbana y ecológica, así como su simbiosis y/o integración funcional. La superposición socio ecológica está presente cuando dos o más tipos diferentes de uso del suelo cruzan un área abierta al intercambio ecológico (de nivel alto o medio). Los diferentes tipos de uso del suelo incluyen la infraestructura residencial, comercial e institucional.

Distinguimos doble descripción de la superposición socio ecológica: (1) la superposición general, la que se representa a través del porcentaje del área abierta al intercambio ecológico (de nivel alto o medio), y (2) la superposición específica, la que se describe con porcentajes de diferentes usos del suelo dentro de esas áreas. Consideramos que alta superposición general es cercana al 100% y baja - a 0%. Además, la superposición socio ecológica se aumenta cuando se ocupan los tres diferentes tipos del uso del suelo y el porcentaje se divide de una manera equitativa.

Principio II: Continuidad espacial

En conjunto, se debe analizar la continuidad socio espacial y ecológica de una matriz del paisaje para poder describir su resiliencia. Se considera un paisaje continuo mientras no se identifique ninguna fractura social o ecológica. En otras palabras, la continuidad socio ecológica es la presencia de cualquier nivel de conectividad espacial en un paisaje. La continuidad es una condición que permite el intercambio.

En cuanto a la cuestión de la continuidad espacial para las interacciones sociales, las barreras físicas, como muros y rejas, fracturan el paisaje al delimitar el movimiento físico y establecer fronteras simbólicas. Además, los enclaves, como colonias cerradas, y ciertos vacíos urbanos funcionan como barreras a la continuidad socio espacial. Los espacios cerrados y homogéneos impiden el intercambio diverso para satisfacer las necesidades sociales, biológicas y físicas de los habitantes. Las personas, que no son parte de esos espacios cerrados, necesitan rodearlos para acceder a los bienes mencionados. Si la distancia óptima para transitar a pie es hasta 400 m (Yang & Diez-Roux, 2012), un área cerrada al intercambio social no debe ser mayor a 12.56 ha, pues en ese caso funciona como una fractura. Así, las personas que no usan ese lugar pueden recorrerlo caminando y no necesitan recurrir al automóvil. El tránsito automovilístico fractura el espacio social induciendo una velocidad a la vida social

que impide su manifestación espontánea. Y el espacio privado dentro del automóvil separa sus usuarios de la realidad social.

En cuanto a la continuidad ecológica, la variedad de diferentes tipos y tamaños de fragmentos de hábitat propicia diferentes dinámicas ecológicas en cuanto a la presencia y el desplazamiento de determinadas especies o la organización de las comunidades biológicas locales. Kirk et al. (2023) delimitan la continuidad del hábitat natural siempre que el área de suelo sellada entre diferentes parches de soporte de vida no sea mayor a 100 m pues generan una fractura.

Principio III: Heterogeneidad en la densidad de apertura

La heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio es la variedad en el tamaño de agrupamientos de parches de diferentes niveles de apertura. Un paisaje tiene una densidad heterogénea de apertura si su mosaico no se compone de parches del mismo tamaño y los no tienen el mismo nivel de apertura.

Para buscar la densidad heterogénea en la apertura al intercambio social, se sugiere que un conjunto de espacios cerrados rodeados por otros abiertos es ventajoso para la resiliencia general. Los espacios cerrados para una mayor cohesión social son aquellos de uso residencial y/o con límites claramente definidos. Por otro lado, el uso del suelo comercial o institucional y/o con límites suaves o nulos encarna espacios que fomentan la vitalidad social (Mouratidis & Poortinga, 2020). El mejor modelo para la heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio social es una combinación de grandes parches residenciales (cerrados) mezclados con diversos parches (abiertos) de otros usos (comercial o institucional) de alta densidad. Sin embargo, no se debe de olvidar que esas áreas residenciales grandes no pueden ser mayores a 12.56 ha para no fracturar el espacio social.

En el ámbito ecológico, la diversidad - capacidad de retroalimentación se relaciona de manera opuesta: la capacidad de retroalimentación de comunidades separadas se desarrolla mejor en parches pequeños y bien delimitados, y la biodiversidad se fomenta en grandes áreas de límites suaves. Entonces, el mejor modelo para la heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio ecológico es una combinación de grandes parches de vegetación con parches separados diversos de alta densidad. Si bien, las áreas grandes intactas permiten la sucesión natural y la estabilidad, y las áreas de hábitat pequeñas son favorables para las especies vulnerables debido a la ausencia de depredadores y menos competidores (Szangolies et al., 2022).

Por ejemplo, una gran extensión de vegetación es aquella que tiene más de 4,4 ha (Beninde et al., 2015). La biodiversidad disminuye rápidamente en áreas verdes más pequeñas que este tamaño. Sin embargo, una pequeña zona de vegetación puede considerarse como zona verde en general si su superficie es superior a 100 m². Szangolies et al. (2022) demuestran que este tamaño es suficiente para actuar como un paso intermedio y una fuente de alimento en un paisaje fragmentado.

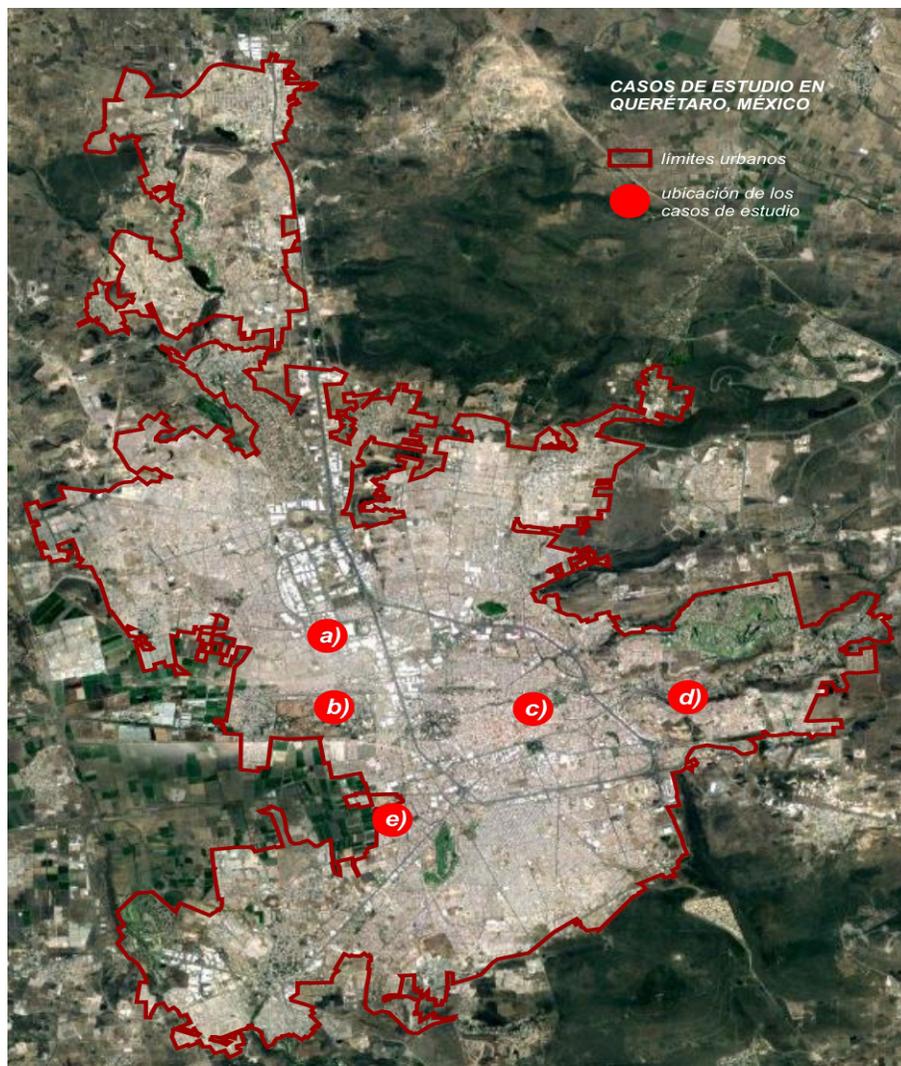
Para facilitar la lectura de la heterogeneidad en la densidad, se propone el uso de algoritmos de detección de agrupamientos. Los agrupamientos urbanos son las unidades geográficas que son homogéneas internamente y se distinguen de sus alrededores. Los agrupamientos pueden ser identificados a través de una técnica basada en píxeles, cuando a una región específica se le asigna un pixel. Una división de la cartografía a píxeles del mismo tamaño y atribución de valores extremos a cada uno de ellos (Petrović & Popović-Božović, 2016), permite destacar la diferencia entre las áreas abiertas y cerradas al intercambio. De esta manera se facilita la identificación de áreas heterogéneas y se puede analizar su variabilidad en el espacio determinado.

La evaluación de heterogeneidad hasta el momento tiene dos valores: (1) heterogéneo - existe diferencia en un solo bloque, o (2) homogéneo - un solo agrupamiento del mismo color. Aún podemos especificar la evaluación: la densidad en la apertura al intercambio social es heterogénea cuando existen al menos 2 tamaños de agrupamientos cerrados y ninguno de ellos es mayor a 12.56 ha. Por otro lado, la densidad en la apertura al intercambio ecológico es heterogénea cuando existen al menos 2 diferentes tamaños de agrupamientos, y al menos uno de ellos es mayor a 4.4 ha.

Área del estudio

Finalmente, la metodología del análisis cartográfico de la resiliencia general del paisaje es aplicado en cinco sectores urbanos de Querétaro, México. Querétaro es una metrópolis del centro de México que presenta alta fragmentación espacial. Como la ciudad se sitúa en un cruce importante del tránsito de bienes del país, las nuevas vías, y consigo las nuevas urbanizaciones, se desarrollan cada vez más alejadas de las existentes, creando enclaves y vacíos urbanos (Pfannenstein et al., 2018). Para la aplicación del análisis cartográfico se seleccionaron los espacios urbanos que se ubican en diferentes partes de la ciudad (Figura .1).

Fig 1: Sectores urbanos en los cuáles se aplicó el análisis cartográfico de la resiliencia general del paisaje urbano en Querétaro, México.



Fuente: Elaboración propia.

Los sectores urbanos seleccionados se encuentran dentro de los límites urbanos de la ciudad y tienen contextos urbanos diferentes: a) el primer sector está ubicado en un área urbanizada densamente, b) el segundo está ubicado a lado de un vacío urbano, c) el tercero está en el centro histórico de la ciudad, d) el cuarto se encuentra en una zona de alta diversidad tanto social como ecológica y e) el quinto está al borde de la zona urbana con el área rural.

RESULTADOS-DISCUSIÓN

Aplicando la metodología descrita anteriormente, se obtiene resultados relacionados con la superposición socio ecológica, la continuidad espacial y la heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio. Para ello, seleccionamos un fragmento de 500 m x 500 m de cada caso de estudio, ya que tomamos en cuenta las medidas relevantes del análisis (Figura. 2a).

Dentro de aquellos límites, se identifica los usos y las coberturas del suelo de cada lote con base en la información de Google Earth. Para representar los diferentes niveles de apertura al intercambio, se propone utilizar distintos niveles de sombreado. Por ejemplo, para el contexto social se proponen 3 diferentes intensidades de negro para identificar el uso institucional, comercial y usos residenciales. Asimismo, para la cobertura de suelo se proponen líneas en paralelo para el suelo desnudo, líneas en cruz para la vegetación y/o cuerpos de agua, y ninguno para el suelo sellado. Este tipo de sombreado diverso permite la lectura de los usos del suelo y las coberturas del suelo en superposición.

Superposición socio ecológica

Primeramente, se aplica el análisis de la superposición socio ecológica en los cinco sectores urbanos seleccionados. En esta parte, fue esencial presentar los diferentes usos del suelo y la apertura al intercambio ecológico en una sola cartografía. Se considera que la cobertura es abierta al intercambio ecológico cuando es de nivel alto o medio; y la cobertura es cerrada al intercambio ecológico cuando tiene nivel de apertura bajo (Figura. 2b). Las dos variables se empalmaron en la cartografía, ya que el contexto social se representa con los sombreados sólidos, y el contexto ecológico con los sombreados en línea. Se calcula el porcentaje del área total con cobertura abierta al intercambio ecológico del espacio total de cada caso y también de áreas de diferentes usos del suelo por separado (Figura. 3).

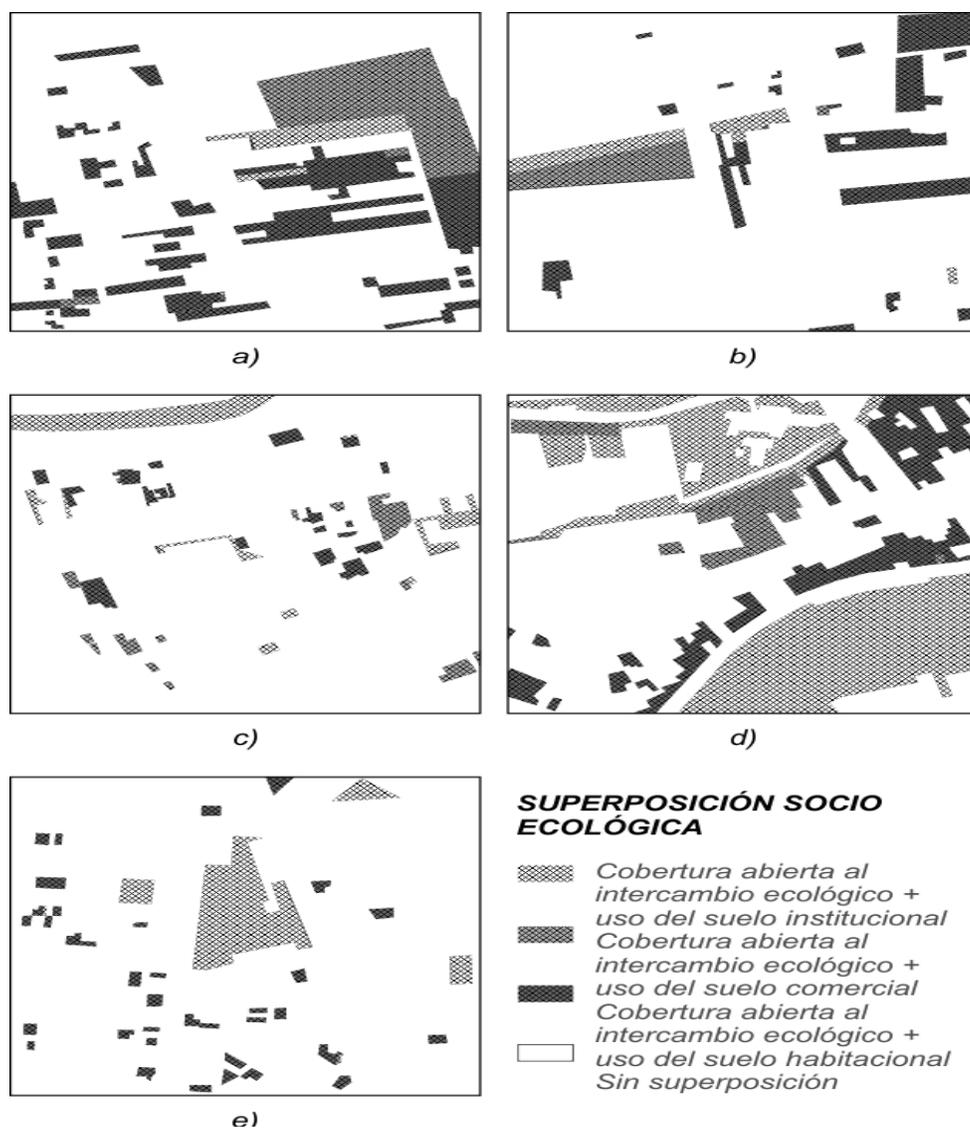
Fig 2: a) Vista satelital y b) niveles de apertura al intercambio de los casos de estudio de los casos de estudio en Querétaro, México.



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Los resultados muestran que muy poco espacio en Querétaro está cubierto por vegetación o agua. La superposición socio ecológica general en el caso a) es 27%; específicamente 2.16% es de uso institucional, 9.72% - uso comercial y 15.12% - uso habitacional; en el caso b) la superposición general es de 14%, 2.24% de ella es de uso institucional, 3.78% - uso comercial y 7.98% - uso habitacional; en el caso c) la superposición general es de 9%, 4.68% de ella es de uso institucional 1.71% - uso comercial y 2.61% - uso habitacional; en el caso d) la superposición general es de 43%, 25.8% de ella es de uso institucional, 4.3% - uso comercial y 12.9% - uso habitacional; y en el caso e) la superposición general es de 10%, 6.75% de ella es de uso institucional, 0.1% - uso comercial y 3.15% - uso habitacional. Solo en el caso d) se aprecia una superposición general del 43 %, en los demás casos de alrededor del 15 %. Y aunque la superposición se aprecia en diferentes tipos del uso del suelo, la variación en sus porcentajes es muy baja. Principalmente las áreas verdes se fomentan en áreas residenciales [casos a) y b)] o en espacios públicos [casos c), d) y e)].

Fig 3: Superposición socio ecológica de cinco sectores urbanos de Querétaro, México.

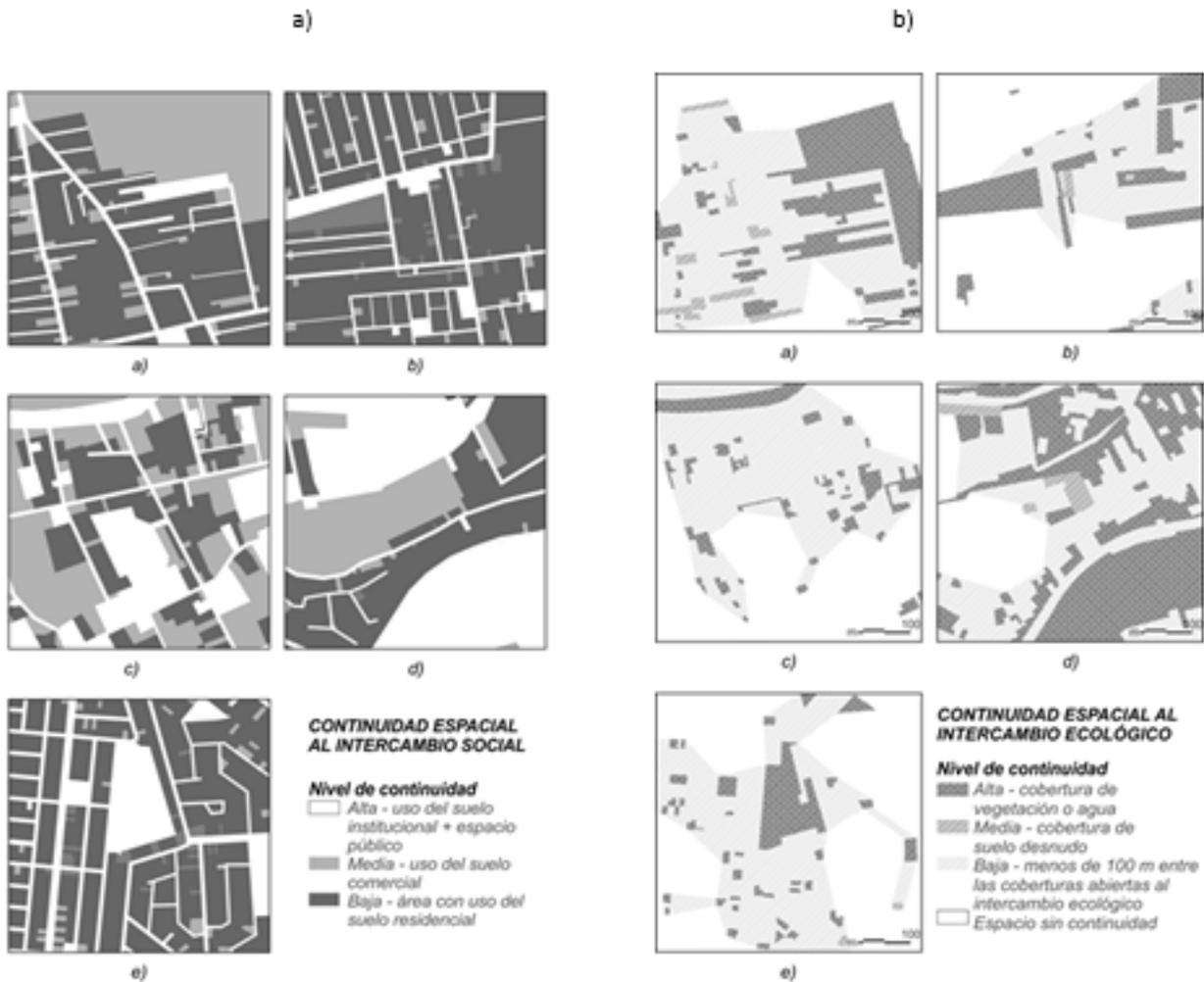


Fuente: Elaboración propia.

Continuidad espacial

Asimismo, se analiza la continuidad espacial de los sectores urbanos seleccionados, la cual se refiere a la ausencia de fracturas socio espaciales y ecológicas. Se divide la metodología en los dos tipos de continuidad, también el análisis se realiza por separado. Primeramente, se muestran los resultados del análisis de la continuidad socio espacial. En este análisis identificamos áreas residenciales mayores a 12.56 ha (Figura. 4a).

Fig 4: a) Continuidad socio espacial y b) continuidad ecológica de cinco sectores urbanos de Querétaro, México.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que, aunque el uso residencial es predominante en Querétaro, en ningún caso de estudio las áreas cerradas son tan grandes que fracturen el espacio social.

Y para representar la continuidad ecológica se generan cartografías con diferentes niveles de apertura al intercambio ecológico. Se mide las distancias entre los parches abiertos al intercambio ecológico (nivel alto y medio) e identifican aquellas que son mayores a 100 m. En la cartografía, esto se obtuvo realizando una ampliación del área de 50 m desde los límites de los parches abiertos al intercambio ecológico. Las áreas, donde la suma del incremento era mayor a 100 m, se marcan en blanco para representar la fractura del sistema ecológico (Figura. 4b).

Los resultados muestran que todos los casos de estudio [a), b), c), d) y e)] presentan fracturas ecológicas. Solo el caso d) es el que tiene una sola fractura, que se podría solucionar localmente. Pero los casos b), c) y e) necesitan una fuerte intervención paisajística.

Heterogeneidad en la densidad de apertura

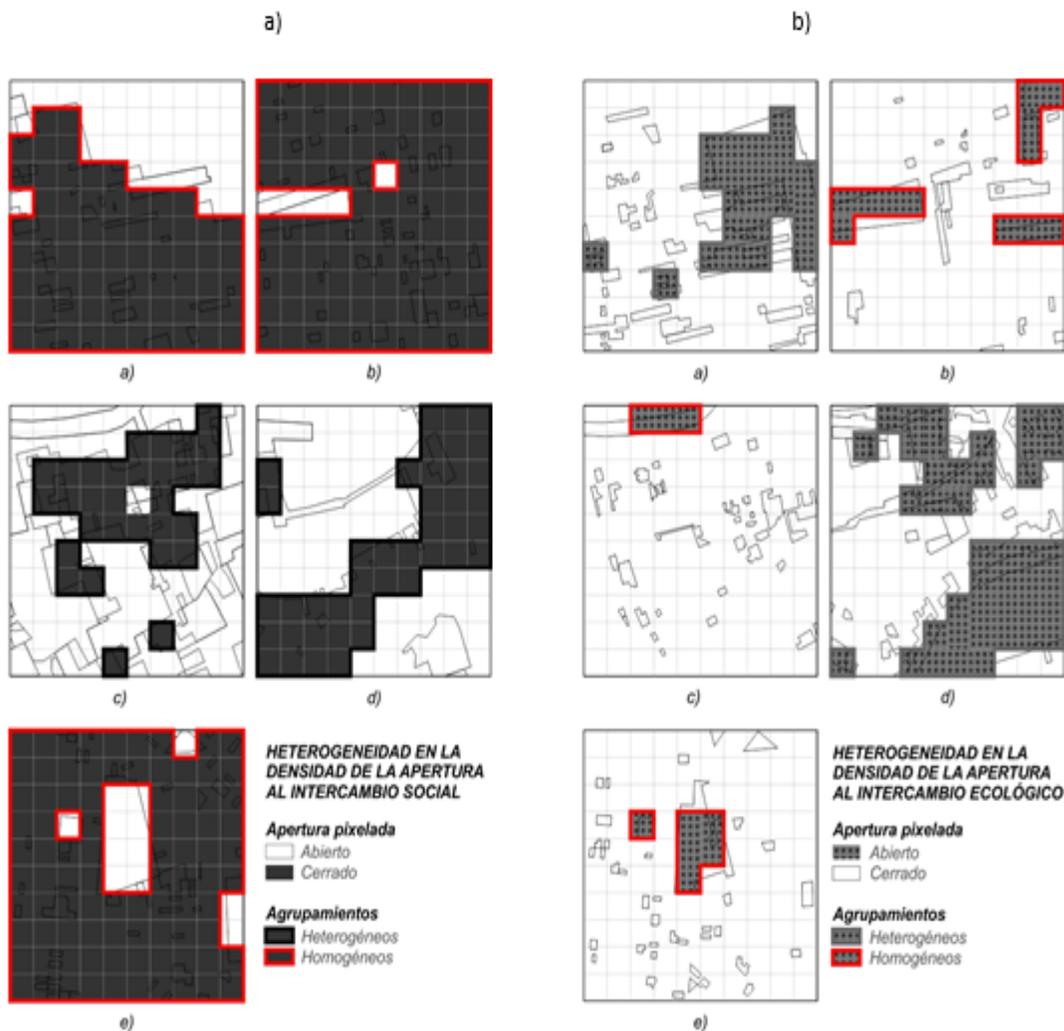
Dos cartografías separadas del contexto social y luego del contexto ecológico son favorables para representar los resultados del análisis de la heterogeneidad en la densidad de apertura. Se divide el mapa base con niveles de apertura al intercambio social y ecológico y se aplican una cuadrícula de 50 m x 50 m y a cada uno. A cada cuadro le asignamos un valor extremo según el tono predominante.

En la cartografía social el blanco representa lo abierto, y el negro – cerrado al intercambio. De esta manera se puede identificar los agrupamientos. Luego, se identifican y marcan en rojo los agrupamientos que son únicos en ese espacio como representación de la homogeneidad en la densidad de apertura al intercambio (Figura. 5a).

Los resultados muestran que tres sectores urbanos de los cinco seleccionados en Querétaro tienen la heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio social muy baja. El porcentaje de área cerrada en el caso a) es 67%; b) 95%; c) 30%; d) 41%; e) 88%. La variabilidad en los tamaños de agrupamientos en el caso a) es 1 x 16.75 ha; b) 1 x 23.75 ha; c) 1 x 6.25 ha, 1 x 0.75 ha, 2 x 0.25 ha; d) 1 x 0.5 ha y 1 x 9.75 ha; e) 1 x 22 ha. El caso b) y e) representan tanto una uniformidad en la apertura al intercambio en cada casi todo el espacio y una variabilidad nula en el tamaño de los agrupamientos. El caso c) es el que tiene la mayor variabilidad en el tamaño de los agrupamientos y el caso d) – tiene porcentaje más cercano al 50%.

Por su parte, se aplica el mismo proceso, pero esta vez para definir las áreas abiertas y las áreas cerradas al intercambio ecológico. Las áreas, que se consideran abiertas, se marcan en un sombreado de líneas en cruz, y lo que queda en blanco representa las áreas cerradas al intercambio ecológico. Identificamos solamente las áreas verdes mayores a 100 m². Luego, se mide las áreas abiertas para identificar las que se consideran como grandes (las que miden más de 4.4 ha). Los fragmentos que no tienen esas áreas verdes grandes se marcan en rojo para representar la homogeneidad en la densidad de apertura al intercambio ecológico (Figura. 5b).

Fig 5: a) Heterogeneidad en la densidad de apertura al intercambio social y b) al intercambio ecológico de cinco sectores urbanos de Querétaro, México



Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de área abierta en el caso a) es 23%; b) 12%; c) 3%; d) 42%; e) 6%. La variabilidad en los tamaños de agrupamientos en el caso a) es 1 x 5.25 ha y 2 x 0.25 ha; b) 3 x 1 ha; c) 1 x 0.75 ha; d) 1 x 3 ha, 1 x 1.25 ha, 2 x 0.25 ha y 1 x 5.75 ha; e) 1 x 0.25 ha y 1 x 1.25 ha. Los resultados muestran que solamente dos casos de estudio contienen áreas verdes grandes. Y, lamentablemente, solo uno de ellos tiene el porcentaje de cobertura del suelo abierta al intercambio ecológico cercano a 50%. Aún más preocupante es que dos casos de estudio presentan menos de 10% de cobertura vegetal. En general, la heterogeneidad es muy baja, y solamente el caso a) resalta con un área verde mayor a 4.4 ha y una diversidad intermedia de tamaños de agrupamientos y el caso d) presenta bastante alta heterogeneidad tanto por el porcentaje de diversidad como por la diversidad en los tamaños de los agrupamientos.

Discusión

Cuando se interceptan las variaciones espaciales y los factores de resiliencia general para definir las categorías de uso y cobertura del suelo, se encuentran unas contradicciones, las cuales resultan en el descubrimiento del nivel de apertura al intercambio. La resiliencia general del paisaje urbano se describe a través de la relación entre áreas abiertas y cerradas al intercambio social y ecológico. Los tres principios desarrollados sirven para evaluarla indicando qué tanto el paisaje urbano fomenta la diversidad, la modularidad y la capacidad de retroalimentación de los sistemas socio ecológicos.

Aplicando la metodología desarrollada, se demuestra la falta de resiliencia en Querétaro:

En el caso a) el área verde no ocupa ni un tercio del espacio analizado, resultando en solamente 27% de superposición socio ecológica general, y la densidad

homogénea en la apertura al intercambio social resulta en baja diversidad social.

En el caso b) el intercambio socio ecológico es aún más bajo – solo tiene un 14 % de superposición general. La mayoría de ésta es de uso residencial, dejando solo el 6 % del espacio total para la vida social en áreas verdes. No es sorprendente que la zona presenta enormes fracturas y homogénea densidad ecológica. Por otro lado, el intercambio social también es homogéneo. Así el caso b) es de baja diversidad social y ecológica.

El caso c) presenta aún menor superposición socio ecológica, teniendo solamente 9% de áreas abiertas al intercambio ecológico. El resultado de grave fracturación ecológica de cierta manera se explica por ser en el centro histórico de la ciudad. Por contraste, la densidad al intercambio social es heterogénea y posibilita tanto la vitalidad, como la cohesión social.

El caso d) es el que presenta menos problemas para ser un paisaje resiliente. La única intervención necesaria sería la creación de áreas verdes en la parte poniente del espacio analizado para evitar la fracturación ecológica. Finalmente, el caso e) aunque no tan severamente como los casos anteriores, pero también presenta falta de superposición socio ecológica, áreas verdes y diversificación de usos de suelos para poder ser un paisaje urbano resiliente.

Lo positivo que se observa de la aplicación del análisis es que en la cartografía se pueden interpretar directamente los puntos donde se requiere una intervención. Por ejemplo, en la cartografía de la continuidad espacial al intercambio ecológico (Fig. 5), las áreas en blanco indican dónde y de qué tamaño son áreas verdes necesarias. O en la cartografía de la heterogeneidad en la densidad (Fig. 6), se puede interpretar áreas dónde una introducción de comercios o instituciones diversificaría el intercambio social.

CONCLUSIONES

Se ha creado una metodología de análisis de la resiliencia general del paisaje urbano sobre tres principios que, a través de diferentes niveles de apertura al intercambio social y ecológica, describen la diversidad, la modularidad y la capacidad de retroalimentación de los paisajes urbanos. La aplicación de la metodología propuesta en cinco casos de estudio de Querétaro permite evaluar su operacionalidad y explorar la multiplicidad de lecturas de la resiliencia en ámbitos urbanos.

En ese mismo sentido, una primera conclusión, amplía la comprensión de paisajes urbanos en función de su resiliencia en dos dimensiones. Se muestran, primeramente, las dinámicas socio ecológicas y, en segundo orden, las condiciones espaciales, ambas lógicas permiten o impiden la resiliencia. A través de la propuesta metodología, la resiliencia general del paisaje urbano se puede comprender visualmente desde la interpretación cartográfica.

Otra conclusión señala la asociación de parámetros de estudio accesibles, como el uso y la cobertura de suelo, a los principios de análisis de la resiliencia general. Con base en el proceso de la aplicación realizado, se asume que el análisis cartográfico, y seguidamente su interpretación se puede aplicar en otros contextos urbanos. El análisis es sencillo de aplicar en la cartografía una vez que están definidos los usos y las coberturas del suelo. Las cartografías se realizan de modo manual, pero el proceso se puede automatizar haciéndolo más eficiente.

Una tercera conclusión nos acerca, por medio de las cartografías resultantes, a guiar un diseño de posibles transformaciones que aumenten la resiliencia general de los paisajes urbanos. Así, la dimensión espacial de las cartografías facilita la demarcación áreas que requiere una intervención e indica su tipo: qué coberturas o usos del suelo son favorables en esas áreas. Sin embargo, no podemos asegurar que la metodología no requiere algún ajuste para otros contextos culturales.

Un punto crítico de la investigación es la escasa fractura social encontrada en la cartografía resultante, aunque Querétaro es conocido por alta cantidad de enclaves (Pffannenstein et al., 2018). En el mismo sentido, se advierte que la escala de estudio en relación con algunos principios de la resiliencia general puede no apreciarse en fragmentos más pequeños. Para continuar la investigación, sugerimos hacer unas pruebas en fragmentos más grandes y en diferentes contextos culturales comprobando así la eficiencia de la metodología en contextos urbanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allan, P. Bryant, M., Wirsching, C., Garcia, D. & Rodriguez M. T. (2013) The influence of urban morphology on the resilience of cities following an earthquake. *Journal of Urban Design*, 18(2), 242-262. <http://dx.doi.org/10.1080/13574809.2013.772881>
- Beninde, J., Veith, M. & Hochkirch, A. (2015) Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters* (2015), pp. 1-12. <https://doi.org/10.1111/ele.12427>
- Cumming, G. S. (2011) *Spatial resilience in social-ecological system*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0307-0>
- Elmqvist, T., Fragkias, M., Goodness, J., Güneralp, B., Marcotullio, P. J., McDonald, R. I., Parnell, S., Schewenius, M., Sendstad, M., Seto, K. C. & Wilkinson, C. (2013) *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7088-1>
- Fischer, A. P. (2018) Forest landscapes as social-ecological systems and implications for management. *Landscape and Urban Planning* 177: 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.05.001>
- Forman, R. T. T. & Godron, M. (1984) *Landscape ecology*. Wiley.
- Gilarranz, L. J. (2020) Generic emergence of modularity in spatial networks. *Scientific Reports* 10: 8708. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65669-8>
- Kirk, H., Soanes, K., Amati, M., Bekessy, S., Harrison, L., Parris, K., Ramalho, C., van de Ree, R. & Threlfall, C. (2023) Ecological connectivity as a planning tool for the conservation of wildlife in cities. *MethodsX* 10: 101989. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101989>
- Margalef, R. (1997) *Our biosphere*. In: Kinne, O. (ed.) *Excellence in Ecology Book 10*. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany. <https://doi.org/10.1002/iroh.19970820411>
- Mouratidis, K. & Poortinga, W. (2020) Built environment, urban vitality and social cohesion: Do vibrant neighborhoods foster strong communities? *Landscape and Urban Planning* 204: 103951. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103951>
- Peterman, W. W., Ousterhout, B. H., Anderson, T. L., Drake, D. L., Semlitsch, R. D. & Eggert, L. S. (2016) Assessing modularity in genetic networks to manage spatially structured metapopulations. *Ecosphere* 7(2). <https://doi.org/e01231.10.1002/ecs2.1231>

- Petrović, V. & Popović-Božović, J. (2016) Towards real-time blob detection in large images with reduced memory cost. *Conference: 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering* IcETRAN 2016, Zlatibor, Serbia, June 13 – 16: pp. EK12.2.1-6. http://tnt.etf.bg.ac.rs/~petrovicv/publications/conferences/2016_IcETRAN%20-%20EK12.2%20Petrovic%20Popovic-Bozovic.pdf
- Pfannenstein, B., Anacleto Herrera, E. E. & Sevilla Villalobos, S. (7-12 de mayo de 2018) La ciudad amurallada: Un análisis comparativo del fenómeno de las urbanizaciones cerradas entre las metrópolis mexicanas de Guadalajara, Monterrey y Querétaro. XV Coloquio Internacional de Geocrítica, Las ciencias sociales y la edificación de una sociedad post-capitalista, Barcelona, España. <https://www.ub.edu/geocrit/Sociedad-postcapitalista/PfannensteinHerrera.pdf>
- Picket, S. T. A., Cadenasso, M. L. & McGrath, B. (2013) *Resilience in ecology and urban design: linking theory and practice for sustainable cities*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5341-9>
- Santos, M. (1986) Espacio y método. *Geocrítica* 65. <https://www.ub.edu/geocrit/geo65.htm>
- Schmidt, C. (2021) *Landscape resilience: basics, case studies, practical recommendations*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63998-6>
- Szangolies, L., Rohwäder, M. S. & Jeltsch, F. (2022) Single large AND several small habitat patches: A community perspective on their importance for biodiversity. *Basic and Applied Ecology* 65: 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2022.09.004>
- Waldheim, C. (2016) *Landscape as urbanism: a general theory*. Mexico: Princeton University Press.
- Walker, B. & Salt, D. (2006) *Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world*. Washington, Covelo, London: Island Press. <https://faculty.washington.edu/stevehar/Resilience%20thinking.pdf>
- Yang, Y. & Diez-Roux, A. V. (2012) Walking distance by trip purpose and population subgroups. *American Journal of Preventive Medicine* 43(1): 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2012.03.015>