Revista e-RUA, Vol 17, Núm. 08. UV. México. ISSN: 2954-4149. Julio - Diciembre 2025

Análisis de la metodología aplicada para determinar la conectividad ecológica de los espacios verdes públicos

Analysis of the methodology applied to determine the ecological connectivity of public green spaces

Claudia Gabriela Ayala Díaz
Tecnológico Nacional de México TecNM
Correo: g2446003@colima.tecnm.mx
Orcid: https://orcid.org/0009-0005-8634-5492

Francisco José Martín Del Campo Saray
Tecnológico Nacional de México TecNM
Correo: francisco.martindelcampo@elgrullo.tecmm.edu.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7211-5366

Dora Angelica Correa Fuentes
Tecnológico Nacional de México TecNM
Correo: dora.correa@colima.tecnm.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1804-5480

Ignacio Barajas Avalos
Tecnológico Nacional de México TecNM
Correo: ignacio.barajas@colima.tecnm.mx
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4834-370X

Jorge Armando Gutiérrez Valencia
Tecnológico Nacional de México TecNM
Correo: jorge.gutierrez@colima.tecnm.mx
Orcid: https://orcid.org/0009-0005-5394-064X

e-RUA

Fecha de recepción: 05/03/2025
Fecha de aceptación: 30/05/2025
https://doi.org/10.25009/e-rua.v17i08.310

Resumen

La creciente preocupación por el cambio climático, impulsado por la pérdida de superficie forestal y la fragmentación de hábitats debido a la agricultura, el pastoreo y la expansión urbana, ha llevado a la comunidad científica a investigar la conectividad ecológica. El objetivo es desarrollar herramientas metodológicas para mitigar las consecuencias del calentamiento global y preservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Este estudio se basó en una revisión exhaustiva de la literatura científica nacional e internacional de los últimos cinco años, en inglés y español. Los criterios de selección se centraron en investigaciones que abordaran la conectividad ecológica en ecosistemas terrestres a diferentes escalas, utilizando métricas y metodologías replicables. Los resultados muestran que la mayoría de los estudios analizan la conectividad estructural a escala regional y en contextos urbano-rurales. Su objetivo principal es proponer redes de conectividad mediante modelos de resistencia y costo-distancia. No obstante, algunas investigaciones van más allá, incorporando el impacto de la huella humana como variable, basándose en el modelo de circuitos y siguiendo un proceso metodológico distinto. Esto último resalta la necesidad de integrar los diversos enfoques metodológicos para proyectar redes ecológicas más resilientes frente a los escenarios futuros del cambio climático.

Palabras Clave:

Conectividad ecológica, Corredores ecológicos, Fragmentación del hábitat, Infraestructura verde, Metodología.

Abstract:

The increasing global concern over the effects of climate change, primarily driven by forest loss and habitat fragmentation due to agriculture, grazing, and urban expansion, has prompted the scientific community to research ecological connectivity. The goal is to develop methodological tools to mitigate the consequences of global warming and preserve biodiversity and ecosystem services. This study is based on an exhaustive review of national and international scientific literature from the past five years, in both English and Spanish. Selection criteria focused on research addressing ecological connectivity in terrestrial ecosystems at various scales, using specific metrics and replicable methodologies. The results indicate that most studies analyze structural connectivity at a regional scale and in urban-rural contexts. Their main objective is to propose connectivity networks

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial 4.0 Internacional

using resistance and cost-distance models. However, some research goes further by incorporating the human footprint impact as a variable, based on circuit theory models and following a distinct methodological process. This highlights the need to integrate diverse methodological approaches to project more resilient ecological networks in the face of future climate change scenarios.

Keywords:
Ecological connectivity, Ecological corridors, Green infrastructure, Habitat fragmentation, Methodology.

Introducción

La ciudad y su estructura

La ciudad es una forma de adaptación al entorno y de apropiación del territorio. Este proceso tiene como propósito principal asegurar la supervivencia de un grupo humano, donde el territorio se define como la superficie terrestre cuya composición satisface las necesidades básicas de dicha colectividad (Le Berre, 1922). Además, esta actúa como refugio frente a las adversidades del entorno natural, como la presencia de depredadores e inclemencias climáticas, así como del entorno humano, por ejemplo, invasiones, guerras u otros movimientos antrópicos (Cuervo González, 2017). Para cumplir con esta cualidad, se organiza a partir de la distribución de actividades y funciones urbanas, configurándose de forma compleja, donde la zonificación y diferenciación de espacios privados y públicos establecen su distribución espacial.

El espacio privado es aquel, en el que el individuo o un grupo de personas desarrolla actividades reguladas, asociadas a la idea de intimidad y respaldadas con un estatus jurídico de propiedad particular. Un ejemplo claro de espacio privado son las viviendas.

Por otra parte, el espacio público representa a la red física de propiedad pública, accesible y gratuita (Istituto Nazionale di Urbanistica & ONU-Hábitat, 2013), que permite la movilidad de los habitantes y medios de transporte, cuyo propósito es contribuir a la calidad de vida urbana, y que incluye calles, equipamiento urbano y espacios abiertos como parques y jardines (ONU-Hábitat, 2019). La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDATU-2021 define al espacio público como: "(…) las áreas, espacios abiertos o predios de los asentamientos humanos destinados al uso, disfrute o aprovechamiento colectivo de acceso generalizado y libre tránsito. Son considerados como bienes inmuebles de uso común en dominio del poder público (…)" (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, 2022, p. 4); y los clasifica por su tipo de administración, escala de servicio brindada y función. Según el mismo ordenamiento, el espacio público puede desempeñar la función de equipamiento público, "(…) cuya dotación determina la calidad de vida de los habitantes al proporcionarles servicios de bienestar social y apoyo a las actividades económicas, sociales, culturales, recreativas e incluyentes (…)" (SEDATU, 2022, p. 5); entre estos se identifican las áreas verdes urbanas como parques, jardines y huertos. Asimismo, puede cumplir la función de área natural, contribuyendo a la dotación de servicios ambientales, beneficiándose a sí mismo y a las poblaciones vecinas, en mayor medida, cuanto menor sea el grado de intervención humana en ellos. Dichas áreas incluyen zonas federales de ríos y playas, así como superficies designadas por la autoridad en materia ambiental de cualquier orden de gobierno (SEDATU, 2022).

De este modo, considerando que los espacios públicos de la ciudad pueden clasificarse según su función, también es posible diferenciarlos en relación con el origen de sus elementos, sean naturales o artificiales, en Infraestructura Gris Urbana e Infraestructura Ecológica Urbana.

La Infraestructura Gris Urbana, también definida como soluciones de ingeniería convencional (Castro Lancharro, 2021), es denominada así por el uso predominante del concreto como materia prima para la construcción; desempeñando varias funciones que facilitan la vida del ser humano, como la movilidad y accesibilidad (calles), comercio (mercados), intercambio cultural (escuelas, bibliotecas, etc.) y servicios (redes de agua potable, drenaje y alcantarillado) (Boyero, Lecuona, & López, 2021).

Por su parte, la Infraestructura Ecológica Urbana se refiere a las acciones urbanas o periurbanas que incluyen organismos vivos y procesos ecológicos, siendo altamente sustentables. Esta se divide en dos tipos (Boyero et al., 2021): Infraestructura Azul, relacionada con cuerpos de agua como lagunas, ríos, arroyos y humedales urbanos; e Infraestructura Verde, que es una red de espacios verdes públicos o áreas verdes urbanas, interconectadas, de valor ambiental, planificada estratégicamente para la conservación de los ecosistemas, protegiendo la biodiversidad y potenciando o manteniendo los servicios que estos proveen (Áreas Metropolitanas de Barcelona, Valle de Aburrá y Ciudad de México, 2023) y cuyo nombre se asocia al color de la vegetación, como los

Revista e-RUA, Vol 17, Núm. 08. UV. México. ISSN: 2954-4149. Julio - Diciembre 2025

árboles y arbustos presentes en parques, jardines y reservas ecológicas urbanas.

En este contexto, la Infraestructura Verde se define como una red de espacios públicos abiertos naturales y/o seminaturales, también denominadas áreas verdes urbanas o espacios verdes públicos, que son diseñados, planificados y gestionados estratégicamente. Su objetivo principal es proteger la biodiversidad y asegurar la prestación de servicios ecosistémicos que fomentan la calidad de vida y el bienestar humano. Además, contribuye a la mitigación del cambio climático y al desarrollo sostenible al imitar o apoyarse en los procesos naturales.

Ambas infraestructuras cumplen funciones distintas a la Infraestructura Gris Urbana y aseguran la provisión de servicios ecosistémicos a las ciudades (Boyero et al., 2021).

La ciudad y la fragmentación de los hábitats

En el periodo entre el año 2000 y 2020 se perdieron casi 100 millones de hectáreas de la cubierta forestal neta mundial, es decir, esta disminuyó del 31.9% al 31.2%, siendo entre otras, la actividad agrícola el principal motivo, mientras que las actividades humanas como la expansión urbana, las tendencias demográficas y económicas, los problemas de gobernanza y las carencias tecnológicas y de inversión, también contribuyeron en ello (Naciones Unidas, 2023).

En 2022, la población mundial alcanzó los 8,000 millones de personas, de las cuales más de la mitad viven en zonas urbanas y se prevé que esta cifra aumente y que para 2050, el 70% de la población vivirá en ciudades (Naciones Unidas, 2023). Esta expansión urbana provoca la desaparición parcial o total de zonas naturales ricas en cubierta forestal, causada principalmente por la construcción de grandes infraestructuras grises, como las vías de comunicación terrestre y cambios de uso del suelo, lo que implica la fragmentación del hábitat, que es el proceso en el cual una extensa y continua área natural es transformada en múltiples segmentos más reducidos, formando una retícula, estableciendo barreras y aislándolos entre sí (Wilcove, McLellan & Dobson, 1986), ocasionando que sus remanentes intraurbanos y periurbanos carezcan de conectividad.

Esto no solo involucra la disminución del hábitat, sino también, perturba la configuración espacial de los ecosistemas, aumentando la cantidad de bordes y separando a los ejemplares que ahí viven, en pequeñas cantidades, lo que interrumpe procesos ecológicos como la dispersión y reproducción, que permiten la preservación de la biodiversidad vegetal y animal (Wilcove et al., 1986), así como, la obtención de servicios ecosistémicos que son los beneficios que adquieren las poblaciones de los ecosistemas. Estos se clasifican en cuatro tipos: provisión, regulación, culturales y de soporte, siendo este último, el encargado del suministro del refugio de la diversidad de animales y plantas, de complejas estructuras y procesos, que sustentan los demás servicios ecosistémicos en determinado lugar (Evaluación de los ecosistemas del milenio, 2005, como se citó en Fernández & De la Barrera, 2018).

Este fenómeno tiene efectos importantes sobre los servicios ecosistémicos. En relación con los servicios de regulación y mantenimiento, como: el desplazamiento de las especies, el ciclo del agua y la prevención de la erosión, estos podrían verse potencialmente afectados; mientras que los servicios de provisión como: la producción de alimentos, madera y otros productos, podrían disminuir en cantidad, calidad y rentabilidad, debido a la disminución de la superficie de las parcelas agrícolas y su colindancia con infraestructura vial que dificulta procesos como la polinización, a causa del peligro que estas barreras representan para la fauna encargada de ello. Por otra parte, los servicios culturales se ven degradados debido a los impactos negativos de las vialidades como, el ruido y la contaminación del aire ocasionados por el tráfico vehicular, que afecta la experiencia recreativa de los usuarios en el medio y es relevante para el bienestar humano.

La fragmentación del hábitat compromete la supervivencia de la flora y fauna, debido a que las poblaciones pequeñas y aisladas son sensibles ante factores de estrés natural como enfermedades, sequias, lluvias torrenciales, incendios, entre otros, lo que disminuye su resiliencia y las pone en peligro de extinción, habiendo cerca de un millón de especies en riesgo de desaparecer, según un informe sobre biodiversidad de la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) del año 2019 (Naciones Unidas, 2019).

La infraestructura carretera de las zonas urbanas y periurbanas ocasiona impactos sobre la biodiversidad, como: la disminución de la superficie, cantidad y calidad del hábitat, aumento de mortalidad por atropellamiento, inaccesibilidad de recursos por falta de conectividad entre parches, accesibilidad del ser humano a hábitats silvestres y la dispersión de especies exóticas invasoras (Agencia Europea de Medio Ambiente & Oficina Federal Suiza de Medio Ambiente, 2011).

Revista e-RUA, Vol 17, Núm. 08. UV. México. ISSN: 2954-4149. Julio - Diciembre 2025

Es así como, las ciudades dependen de los ecosistemas naturales y seminaturales, y sus servicios, sin embargo, mientras más crecen y aumentan su población, ejercen mayor presión sobre ellos y su biodiversidad, provocando que las áreas naturales intraurbanas aporten menos servicios ecosistémicos que aquellas periurbanas (Magaña Rodríguez, Tudela Rivadeneyra, Meza Pérez, & Suárez Bonilla, 2021), pues son bien conocidas las consecuencias negativas del exceso de superficies pavimentadas en las ciudades, ya que una excesiva artificialización, ocasionada por la infraestructura gris en sustitución del medio ambiente natural, altera los procesos ecológicos y en casos extremos, podría eliminar las condiciones originales que motivaron el asentamiento humano (Boyero, et al., 2021).

Los corredores ecológicos: La conectividad ecológica como medida de mitigación del hábitat fragmentado

Por ello las ciudades se convierten en uno de los principales motivos de la fragmentación del hábitat natural, además de la producción de gases de efecto invernadero que fomentan el calentamiento global; llamando la atención de la comunidad internacional y sus gobiernos, que encabezados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), acuerdan en 2015 la Agenda 2030 de desarrollo sostenible, en la que se estipulan 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales buscan el crecimiento sustentable, prosperidad energética con cuidado al medio ambiente, así como la seguridad, la paz y la igualdad de género, siendo de especial importancia para este tema, los objetivos número once (11): Ciudades y comunidades sostenibles, trece (13): Acción por el clima y quince (15): Vida de ecosistemas terrestres, que incluyen medidas que se apoyan en los ecosistemas y sus servicios para resolver problemas relacionados con el cambio climático, en lugar de depender únicamente de las herramientas convencionales y que son mejor conocidas como soluciones basadas en la naturaleza (SBN) (Comité Español de la UICN, s.f.).

Un tipo de solución basada en la naturaleza es la infraestructura verde, que se compone generalmente de los remanentes de los ecosistemas originales y cuya vinculación o continuidad entre ellos, así como el manejo sostenible de su cobertura forestal, permite mantener su composición y estructura, conservando la conectividad ecológica, que es una pieza clave para la conservación de los hábitats fragmentados (Taylor, 1993; Tischendorf & Fahrig, 2000; Belisle, 2005; Quesada, 2009; como citado en Leija & Mendoza, 2021) y se define como la calidad del medio natural y seminatural que, además del movimiento y la dispersión de los organismos, permite el sostenimiento de los procesos ecológicos y de los flujos que los caracterizan (agua, materia, genes, etc.) (Ayuntamiento de Barcelona, 2013), cuya eficacia dependerá también de la cantidad de los elementos fisiográficos del paisaje, que permitan el movimiento de las especies (Quesada, 2009; Smith, 2011; como citado en Leija & Mendoza, 2021); formando corredores ecológicos que se unen con áreas naturales protegidas urbanas o periurbanas (parques nacionales, reservas biológicas).

Abundando en su definición, los corredores ecológicos son explicados como el medio para la continuidad ininterrumpida de los procesos ecológicos, que conectan dos regiones naturales que han quedado aisladas y que ancestralmente estaban vinculadas o eran una misma (Gutiérrez Yurrita, 2007). Esta unión puede realizarse a través de la conectividad ecológica estructural y/o funcional. La conectividad estructural está relacionada con la continuidad y cercanía entre los fragmentos de cobertura vegetal, mientras que la funcional tiene que ver con la facilidad para la realización de los procesos ecológicos que se llevan a cabo a través del paisaje (Taylor, Farhrig & With, 2006).

Las bases para la toma de decisiones: Metodología e indicadores de conectividad ecológica

Los beneficios que los habitantes de las ciudades obtienen de los servicios ecosistémicos que los espacios verdes públicos proveen, pueden incrementar si se conoce su grado de vulnerabilidad, de tal manera que, se elaboren políticas que permitan hacerles frente (The World Bank, s.f.), a través de la planificación ecológica, cuyo enfoque pretende que la planificación reconozca, priorice, conserve y aproveche los elementos naturales y/o ecológicos del territorio, tanto por su valor particular, como por los beneficios que las personas podrían obtener de ellos (Steiner, 2014; como citado en Fernández & De la Barrera, 2018).

Para ello, es importante contar con herramientas metodológicas e indicadores preestablecidos, que conduzcan a una evaluación sistemática y ordenada de los espacios verdes públicos, evitando la desviación en los procesos y permitiendo la obtención de información exacta, relacionada con la conectividad ecológica, la cual es inversamente proporcional al grado de fragmentación del hábitat, determinando, si el conjunto de áreas verdes urbanas funciona como un corredor ecológico.

La falta de estos instrumentos genera incertidumbre, por lo que la revisión de la metodología empleada por

diversos investigadores enfocados en el estudio de casos de conectividad ecológica en ecosistemas terrestres resulta fundamental. Este análisis identifica modelos, procesos y herramientas replicables en distintos contextos espaciales y temporales, estableciendo bases sólidas para el diseño de programas y la ejecución de acciones eficaces. De esta manera, se orientan los esfuerzos hacia la conservación de los ecosistemas y la mitigación del cambio climático.

Metodología

La metodología aplicada para la obtención de resultados del presente documento, se basó en la búsqueda de publicaciones de artículos científicos relacionados con estudios de caso reales en los que se analizó la conectividad ecológica de ecosistemas terrestres, en los idiomas inglés y español, emitidos entre los años 2019 y 2025, a través del uso de bases de datos como: Redalyc, Scielo, Latindex, Google Scholar, Research Rabbit, ResearchGate; en las que se emplearon las siguientes palabras clave: "conectividad ecológica", "fragmentación del hábitat", "corredores ecológicos", "infraestructura verde", "conectividad ecológica estructural", "índices de fragmentación", "conectividad ecológica funcional", "Índice de conectividad ecológica" y sus respectivas traducciones al inglés.

Se realizó una selección preliminar de los documentos, mediante el análisis de los títulos, resúmenes y palabras clave para descartar estudios no pertinentes y posteriormente revisar el texto completo de aquellos que habían sido catalogados como aptos, obteniendo un total de 30 artículos. Estos fueron clasificados por el contexto (urbano, rural o urbano y rural) y escala del área de estudio (local, regional, nacional o internacional), así como el tipo de conectividad ecológica analizada (estructural, funcional o mixta), mediante la elaboración de una matriz estructurada en Microsoft Excel, que a su vez, permitió el registró de la información como: metodología, pasos del proceso de investigación, modelos replicados, software o herramientas de software utilizadas e índices o métricas para la evaluación; permitiendo encontrar similitudes.

Resultados

La clasificación de los 30 artículos científicos mediante el cruce de variables como el contexto y escala del área de estudio, así como la conectividad ecológica analizada, dio los siguientes resultados

Siendo la conectividad estructural de los ecosistemas terrestres la más estudiada a una escala regional y en un

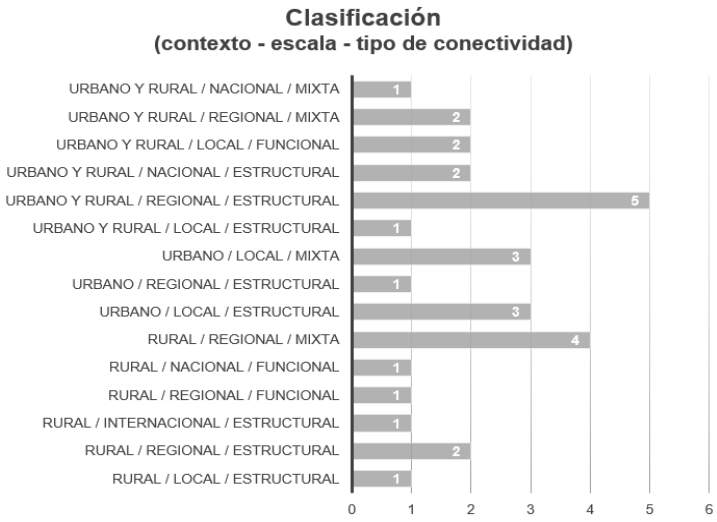

Figura 1. Resultados de clasificación de artículos científicos.
Nota: La clasificación de los artículos científicos se realizó en base al contexto, escala y tipo de conectividad ecológica analizada. (Fuente autoría propia, 2025)

contexto urbano-rural, con cinco artículos publicados sobre estudios de casos, tres de ellos en Latinoamérica (Colombia, Costa Rica y Cuba), cuyas áreas de estudio se localizaron a una altitud entre los 380 a 2,100 m s.n.m. y una superficie entre 329.44 a 7,155.27 km^2; y dos en Asía (China), con una altitud que osciló entre los -180 a los 7,900 m s.n.m., así como una extensión de 14,921.13 a 1,660,000.00 km^2.

Estos artículos fueron tomados como muestra final para el análisis a detalle de su metodología, tomando en cuenta el objetivo, modelos, proceso o pasos, métodos o teorías replicadas, software y/o herramientas utilizadas, bases de datos, e índices o métricas para la evaluación y diseño de rutas de conectividad. De la muestra se identificó que el objetivo principal de cuatro de los cinco artículos seleccionados es, la propuesta de rutas de conectividad ecológica estructural mediante la conexión de parches o áreas núcleo prioritarias, empleando el modelo de resistencia y de costo – distancia, tal y como se manifiesta a continuación (ver tabla no. 1):

El modelo de resistencia, en conectividad ecológica se utiliza para representar la dificultad, el costo de energía o el riesgo de mortalidad asociado con el movimiento de organismos entre parches de hábitat en un paisaje, a través de una cuadrícula. Su objetivo es mapear las zonas menos hostiles para el movimiento de especies combinando diferentes variables espaciales como: cobertura del suelo, topografía (pendiente), hidrografía (distancia a fuentes de agua) y presencia de infraestructura humana (asentamientos humanos y red vial), asignando valores a estas en función de cómo facilitan o impiden la dispersión de los individuos (Urban y Keitt 2001; Adriaensen, 2003; Hargrove, 2004; McRae, 2012; como citado

No.	Título del artículo	Objetivo	Modelo de conectividad ecológica
1	Conectividad estructural entre áreas prioritarias de conservación del Corredor Biológico Premontano Chirripó-Savegre, Costa Rica	Desarrollar una propuesta de ruta de conectividad estructural del Corredor Biológico Premontano Chirripó Savegre	Modelo de resistencia Modelo de costo - distancia
2	Propuesta de rutas de conectividad para la conservación de la biodiversidad en la Sierra Maestra, Cuba	Desarrollar una propuesta de rutas de conectividad estructural entre las áreas protegidas en la Sierra Maestra, basada en modelos de costo-distancia y mapas de fricción.	Modelo de resistencia Modelo de costo - distancia
3	Propuesta de zonificación de áreas para conectividad ecológica en la Serranía de las Quinchas (Colombia)	Propuesta de zonificación de áreas para la conectividad estructural en la Serranía de las Quinchas que promueva la conservación y se constituya en un instrumento para la planificación, toma de decisiones de las entidades gubernamentales, mediante la elaboración de mapas de fricción, conectividad y zonificación de áreas para la preservación, protección, conservación y uso sostenible.	Modelo de resistencia Modelo de costo - distancia
4	Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern	Propuesta de optimización del patrón de seguridad ecológica (ESP), que equilibra la estabilidad de los parches y la conectividad de la red, proporcionando directrices para planificadores de conservación.	Modelo de resistencia Modelo de circuito Análisis de conflictos de uso del suelo Análisis de importancia de la conectividad Análisis de robustez
5	Identify Ecological Corridors and Build Potential Ecological Networks in Response to Recent Land Cover Changes in Xinjiang, China	Identificación corredores ecológicos y propuesta de redes ecológicas potenciales basados en la distancia de costo mínimo, en respuesta a los recientes cambios en la cobertura del suelo en Xinjiang, China	Modelo de resistencia Modelo de costo - distancia

Tabla1. Relación de objetivos y modelos de análisis de conectividad empleados, (Fuente autoría propia, 2025).

en Isaacs Cubides, Trujillo Ortíz & Jaimes, 2017).

Mientras que, el modelo costo-distancia en conectividad ecológica, se emplea para modelar redes de conectividad, identificando aquellas de máximo potencial entre áreas prioritarias en un mapa que muestra la resistencia al movimiento (Puebla, Cueto, & Álvarez Amargos, 2020). Este modelo utiliza un sistema de información geográfica para encontrar las rutas más fáciles para que las especies se muevan entre parches de hábitat.

Es así, como se determina que los modelos de análisis de la conectividad ecológica utilizados en los artículos científicos seleccionados, definen el proceso metodológico, que, en general se compone de los siguientes pasos:

1. Definición del área de estudio.
2. Identificación de las variables de dificultad al desplazamiento o resistencia: cobertura del suelo, topografía (pendiente), hidrografía (distancia a fuentes de agua), presencia de infraestructura humana (asentamientos humanos y red vial).
3. Generación de modelo de fricción o resistencia.
4. Generación de modelo costo – distancia.
5. Propuesta de ruta(s) de conectividad ecológica.

Por otra parte, se identificó la coincidencia en la replicación de la metodología para el diseño de una red ecológica, utilizada por Arias et al. (2008), en su trabajo de investigación denominado "Las redes de conectividad como base para planificación de la conservación de la biodiversidad: propuesta para Costa Rica", que a su vez se sustenta de los trabajos de Hoctor et al. (1999) y Céspedes (2006), y que consistió en:

1. Identificar las áreas protegidas a conectar y núcleos de hábitat prioritarios para la conservación que no están protegidos dentro del sistema nacional de áreas protegidas.
2. Establecer niveles de dificultad al desplazamiento de

las especies silvestres en toda el área intermedia entre las áreas protegidas identificadas como objetivo.

3. Modelar la red de conectividad integrada por los núcleos prioritarios para la conservación, a través de las rutas de menor dificultad al desplazamiento (pp. 39-40).

Fundamentando el planteamiento de la estructura general de la metodología antes mencionada, empleada en los estudios analizados.

Para la definición del área de estudio todos los investigadores recurrieron a la consulta de bases de datos oficiales como institutos nacionales de información geográfica, de los que pudieron obtener mapas, capas geoespaciales e imágenes satelitales de alta resolución en determinado tiempo, relacionados con la cobertura del suelo, topografía, hidrografía, infraestructura vial, asentamientos humanos, entre otros; mismos que posteriormente fueron utilizados en diversos programas informáticos, como base para el mapa de resistencia.

Los softwares y/o herramientas más usadas para el diseño de rutas de conectividad ecológica estructural fueron ArcGIS 10.2 y posteriores versiones, que es una herramienta informática para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), usada para comprender los patrones de distribución espacial de la biodiversidad y las condiciones del medio físico y ambiental cambiantes. Fue utilizada principalmente para el análisis de coberturas del suelo, delimitación de áreas de estudio y generación de mapas de fricción o resistencia, así como de costo – distancia. Apoyándose en sus herramientas Polygon to Raster y Point Density para crear superficies ráster con información geográfica y dificultad al desplazamiento; Cost Distance, Cost Back Link, Cost Path para identificar rutas óptimas de conectividad entre áreas núcleo; Slope y Euclidean Distance (3D Analyst Tools) para generación de mapas de pendiente, distancia a ríos y vías; Weighted Overlay para cálculo de fricción global combinando criterios físicos, bióticos y socioeconómicos, y Weighted Sum para integrar los resultados de los modelos de fricción y conectividad para generar categorías de zonificación.

Del mismo modo, la herramienta SIG, Linkage Mapper, fue utilizada para aplicar en mapas, rangos de resistencia donde a cada celda se le atribuye un valor que refleja el costo energético, la dificultad o el riesgo de mortalidad de las especies para moverse a través de estas, identificando áreas de hábitat centrales y mapeando sus vínculos.

Mientras que Fragstats 4.2, es un programa de análisis de patrones espaciales utilizado para cuantificar la estructura de los paisajes, permitió el análisis de índices y el cálculo de métricas paisajísticas, dentro de las cuales se identificaron los siguientes (Ver tabla no. 2):

Índice	Que mide	Formula matemática del índice	Parametros del índice
Índice de intensidad de variación de los tipos de cobertura superficial (LTI)	Mide la variación de la cantidad de un determinado tipo de cobertura superficial en el estudio período	LTI = {[(A2– A1)/A)*(1/T)]*100%	donde, LTI es el índice de intensidad de variación de la cantidad de un determinado tipo de cobertura superficial en el estudio período. A1 es el estudio inicial para un tipo de cobertura de superficie, mientras que A2 es el estudio final para una determinada superficie. tipo de cubierta. A es el área total del área de estudio y T es el tiempo entre el final y la etapa inicial. del estudio
Índice de porcentaje de parche de paisaje	Mide el porcentaje de un cierto tipo de área de parche de tierra con respecto a la superficie total de tierra	No especificado	No especificado
Índice de densidad de parche	Mide el grado de fragmentación del paisaje	No especificado	No especificado
Índice de dimensión fractal del perímetro	Mide la complejidad de la forma del parche del paisaje	No especificado	No especificado
índice de separación del parche	grado de fragmentación del paisaje	No especificado	No especificado
Índice de modelo de Resistencia Mínima Acumulativa (MCR)	Calculo de trayectoria de menor resistencia	$MCR = f_{min} \sum_{j=n}^{i=1} (D_{ij} \times R_i)$	donde, MCR representa el valor mínimo de resistencia acumulativa y f representa la función positiva desconocida; Dij representa la distancia espacial de las especies desde los parches de origen ecológico hasta las unidades de paisaje i; Ri Representa el coeficiente de resistencia de las unidades de paisaje i al movimiento de algunas especies.
Índice de dimensión del paisaje e índice de agregación	Mide la conectividad entre parches de cada tipo de paisaje	No especificado	No especificado
Índice de cohesión de parches	Mide la conectividad de parches	No especificado	No especificado
Índice de Diversidad de Shannon (SHDI)	Diversidad de clases de cobertura	SHDI = $-\Sigma^{m}_{i=1}$(Pi * lnPi)	P i = proporción del paisaje ocupado por tipo de parche (clase) i. Clase i = copas de árboles
Índice de Uniformidad de Shannon (SHEI)	Uniformidad en la distribución de tipos de cobertura	SHEI = SHDI / ln(m)	Pi = proporción del paisaje ocupado por tipo de parche (clase) i. m = número de tipos de parches (clases) presentes en el paisaje,
Índice de contagio (CONTAG)	Grado de agregación de coberturas en el paisaje.	CONTAG = [1+{[$\Sigma^{m}_{i=1}$ $\Sigma^{m}_{k=1}$ (Pi*gik/$\Sigma^{m}_{k=1}$ gik)}*{ln*gik/$\Sigma^{m}_{k=1}$ gik)}/ 2ln(m)]* 100.	Pi = proporción del paisaje ocupado por tipo de parche (clase) i. gik= número de adyacencias (uniones) entre pixeles de tipos de parches (clases) i y k según el método de doble conteo. m = número de tipos de parches (clases) presentes en el paisaje. Clase i = copas de árboles

Tabla 2. Índices y métricas paisajísticas identificadas, (Fuente autoría propia, 2025).

En relación con el artículo denominado " Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern" (Jiang, Peng, Liu, Dong & Ma, 2024), su metodología es diferente al resto, debido al alcance del estudio, ya que la propuesta de las rutas de conectividad ecológica planteadas, incluyó la evaluación de variables como: la salud del ecosistema, la huella humana, conflictos de uso del suelo, importancia de la conectividad y la robustez de la red; con el objetivo de preservar las áreas vulnerables, potencializando el patrón de seguridad ecológica del paisaje , todo esto a través del siguiente proceso:

1. Identificación del área de estudio mediante la evaluación de la salud del ecosistema
2. Modelo de resistencia basado en la huella humana (tipos de uso de suelo, densidad de población, densidad de carreteras e intensidad de la luz nocturna).
3. Identificación de corredores ecológicos mediante modelo de circuito.
4. Evaluación de la conectividad de la estructura de la red ecológica.
5. Evaluación de la conectividad de la red basada en indicadores de estabilidad del parche y conflictos de uso del suelo, importancia de la conectividad y la robustez de la red.
6. Propuesta de rutas de conectividad que cumplen con el patrón de seguridad ecológica.

En comparación al primer paso de la investigación realizada por los autores de los cuatro artículos analizados anteriormente, para identificar el área de estudio donde solo se toman en cuenta aspectos físicos del paisaje; en este trabajo se incluye la evaluación del estado de salud del ecosistema y la capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos, para selección de los parches o áreas núcleo prioritarias.

Mientras que, a diferencia del modelo de resistencia antes explicado, éste tomó como variables los indicadores relacionados con la huella humana como tipos de uso de suelo, densidad de población, densidad de carreteras e intensidad de la luz nocturna, basado en los estudios de Sanderson et al. (2002), que tratan acerca del impacto de la actividad humana en las áreas silvestres, cuyos datos son importantes para la gestión del suelo y los recursos naturales, así como para los esfuerzos de conservación.

Por otra parte, se utilizó el modelo de circuito en lugar del modelo de costo – distancia, denominado así, debido a que realiza una analogía del paisaje como un circuito eléctrico, donde los parches del hábitat son nodos y las ligas o conexiones entre ellos son el conductor para el flujo de corriente eléctrica; con el objetivo de determinar las rutas más óptimas para facilitar el movimiento de las especies y los procesos ecológicos (McRae, Dickson, Keitt, & Shah, 2008), esto mediante el uso del software Linkage Mapper.

Enseguida, se realizaron varias simulaciones de la red para evaluar la probabilidad de conectividad (PC) basada en la importancia del corredor (dPC), consistente en la eliminación de corredores ecológicos para precisar su impacto en la conectividad fundamentado en los estudios de Xu et al. (2019), cuya teoría es que las redes con menos corredores son más vulnerables a la perdida de hábitat, haciéndolas inestables; contrastada con el índice de conflicto de uso de la tierra para determinar el riesgo de fragmentación de los corredores ecológicos, midiendo de forma inversa la estabilidad de estos.

Este índice se calcula a partir del índice de complejidad espacial, que refleja la perturbación de los parches o corredores vecinos; el índice de vulnerabilidad espacial, que mide la capacidad de resistir perturbaciones externas según el uso del suelo; y el índice de fragmentación espacial, que indica la competencia entre distintos usos del suelo (ver tabla no. 3).

Índice	Que mide	Formula matemática del índice	Parametros del índice
Indice de huella humana (P)	Representa el impacto de la densidad poblacional en el ecosistema natural.	$P = 3.333 \times \log(pop + 1)$, $0 \le pop < 1000$; $P = 10$, $pop \ge 1000$	pop: Densidad poblacional.
Índice de Conflicto de Uso del Suelo (LUCI)	Cuantifica los riesgos de fragmentación y vulnerabilidad del uso del suelo.	LUCI = SCI + SVI + SFI	SCI: Índice de Complejidad Espacial; SVI: Índice de Vulnerabilidad Espacial; SFI: Índice de Fragmentación Espacial.
Robustez de Conectividad (R)	Evalúa la robustez de la conectividad ante la eliminación de nodos.	R = Cmax / n	Cmax: Número máximo de subgráficos; n: Número de nodos.
Conectividad Global (E)	Calcula la eficiencia de conectividad entre nodos en una red.	$E = 1 / (n(n - 1)) \times \Sigma(1 / dij)$	dij: Distancia mínima de costo entre los nodos i y j; n: Número total de nodos.
Conectividad Equivalente (EC)	Mide la conectividad total considerando el área y costo de distancia entre nodos.	$EC = \sqrt{\Sigma(ai \times aj \times pij)}$	ai, aj: Áreas de los nodos i y j respectivamente; pij: Probabilidad máxima de un camino entre los nodos.
Índice de Importancia Integral (CII)	Integra la estabilidad del parche y la conectividad de red.	CII = PSI × NCI	PSI: Importancia de la estabilidad del parche (normalizado); NCI: Importancia de la conectividad de red (normalizado).
Salud del ecosistema (EH)	Mide la salud de los ecosistemas	EH=√PH*ES	PH: es la salud física; y ES: es la importancia integral de los servicios ecosistémicos
Salud física (PH)	No especificado	$PH=\sqrt[3]{V*O*R}$	V: vigor , O: organización y R: resiliencia

Tabla 2. Índices y métricas para evaluación de la conectividad, (Fuente autoría propia, 2025).

Revista e-RUA, Vol 17, Núm. 08. UV. México. ISSN: 2954-4149. Julio - Diciembre 2025

Se considera la estructura de la red ecológica como una red compleja y se analizan tres escenarios de eliminación de nodos o bordes para evaluar la robustez de la red. Si los resultados de los Escenarios 1 y 2 son estables y muestran menor variación que el Escenario 3, se concluye que es posible que las fuentes y los corredores ecológicos conserven su propia estabilidad al mismo tiempo que contribuyen a la mejora de la conectividad de la red; de lo contrario la estrategia de conservación debe realizarse de forma integral (Jiang et al., 2024).

Y finalmente, se evaluó el impacto de la eliminación de fuentes o corredores ecológicos en la robustez de la red, que es la capacidad de conservación de la estabilidad estructural ante una amenaza; a través del índice de robustez de la conectividad, la eficiencia global y la conectividad equivalente. El análisis se realizó con R (versión 4.1.2) y el paquete igraph.

En base a esto se desarrollaron propuestas de rutas de conectividad que cumplen con el patrón de seguridad ecológica.

Discusión

Durante el trabajo de investigación se identificó en mayor medida la falta del análisis de casos de estudio de la conectividad ecológica funcional y de contextos puramente urbanos, ya que la mayoría se desarrolló a escala regional, lo que indica que las muestras comprenden una amplia extensión territorial, cubriendo zonas urbanas y rurales, con mayor probabilidad de que las características geográficas (topografía, hidrografía, cobertura del suelo) y antrópicas (infraestructura humana) sean diversas, lo que repercute en el tipo y procedimiento de procesamiento de la información. Además de las necesidades particulares en materia de políticas ecológicas de cada territorio, que definen el alcance o producto final del trabajo de investigación, determinando los métodos o modelos, software y métricas replicadas.

Este sesgo fue observado durante el proceso de lectura del contenido completo de los treinta artículos seleccionados y reafirmado con la muestra de los cinco artículos clasificados por la escala, contexto y tipo de conectividad estudiada; por lo que, en futuras investigaciones, los autores deberán contemplar en su matriz el concepto de características del producto y objetivo final, como filtro.

Por otra parte, el predominio del uso de modelos de resistencia y costo-distancia en los estudios analizados, resalta la eficacia de estos enfoques para identificar rutas de conectividad óptimas entre áreas núcleo prioritarias. Estos modelos permiten evaluar la dificultad del desplazamiento de las especies considerando variables físicas del área de estudio, evidenciando su replicabilidad en diferentes contextos geográficos.

Sin embargo, la investigación de Jiang et al. (2024) introduce una perspectiva más compleja, al integrar la estabilidad de los parches y la conectividad de la red en el diseño del Patrón de Seguridad Ecológica. La inclusión de variables como la salud del ecosistema, la huella humana y el análisis de conflictos de uso del suelo proporciona un panorama más integral de los factores que influyen en la conectividad ecológica. El uso del modelo de circuito en lugar del modelo de costo-distancia representa un avance metodológico significativo, al permitir una simulación más realista de los procesos ecológicos que se llevan a cabo en paisajes fragmentados.

La comparación entre estudios revela que, si bien los enfoques tradicionales son efectivos para identificar corredores ecológicos, la incorporación de análisis de robustez de la red y de la importancia de la conectividad, como propone Jiang et al. (2024), ofrece una comprensión más profunda de la resiliencia del paisaje frente a perturbaciones. Esto es crucial en un contexto de cambio climático y creciente presión antrópica, donde la capacidad de adaptación de las redes ecológicas se convierte en un objetivo prioritario de conservación del medio natural o seminatural.

Conclusión

Los estudiosos no deben limitarse a la evaluación de la conectividad ecológica tomando en cuenta solo aspectos físicos del área de estudio, sino que, tienen que considerar las variables relacionadas con la actividad humana, que ha sido el principal motivo de fragmentación del hábitat. Al realizarlo de este modo, provoca que las propuestas o aportaciones hechas por los investigadores sean soluciones a corto plazo, lo que dificulta la sostenibilidad y resiliencia, frente a un panorama desalentador ante el cambio climático.

Si bien, la mayoría de los casos de estudio analizados evalúan corredores ecológicos preestablecidos y contribuyen a estrategias para su preservación, no se identificó alguno en el que se consideren reservas urbanas e instrumentos de planificación, así como datos estadísticos, para proyección del crecimiento de las ciudades a futuro y la huella humana que puede ocasionar para plantear panoramas a mediano y largo plazo; formulando estrategias de protección, conservación

y restauración de las áreas naturales, asegurando una vinculación efectiva con el contexto rural a través de la infraestructura verde, salvaguardando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Por último, los resultados evidencian la necesidad de enfoques metodológicos integrados que consideren tanto la estructura física del paisaje como las dinámicas ecológicas y socioeconómicas. La combinación de modelos de resistencia, análisis de robustez y evaluaciones de impacto de la huella humana proporciona herramientas valiosas para la planificación de la conservación, destacando la importancia de diseñar redes ecológicas resilientes y adaptativas a diferentes escenarios de cambio ambiental.

Referencias bibliográficas

Agencia Europea de Medio Ambiente, & Oficina Federal Suiza de Medio Ambiente. (2011). *Landscape fragmentation in Europe: Joint EEA-FOEN report*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

Áreas Metropolitanas de Barcelona, Valle de Aburrá y Ciudad de México. (2023). *Caja de herramientas de infraestructura verde*. Asociación Mundial de las Grandes Metrópolis. https://cms.internacionales.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Caja_herramientas_de_infraestructura_verde.pdf

Arias, E., Chacón, O., Herrera, B., Induni, G., Acevedo, H., Coto, M., & Barborak, J. R. (2008). Las redes de conectividad como base para la planificación de la conservación de la biodiversidad: Propuesta para Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, 54, 27–42. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6488473157

Ayuntamiento de Barcelona. (2013). *Plan del verde y de la biodiversidad de Barcelona 2020*. Hábitat Urbà, Medi Ambient i Serveis Urbans. https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/PlanVerde_2020.pdf

Boyero, L., Lecuona, J., & López, M. (2021). Sinergias y compromisos entre la infraestructura gris y la infraestructura ecológica urbana. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 10(1), 3-6. https://www.researchgate.net/publication/356069070_Sinergias_y_compromisos_entre_la_infraestructura_gris_y_la_infraestructura_ecologica_urbana

Castro Lancharro, B. (2021). *Infraestructura verde urbana I: Retos, oportunidades y manual de buenas prácticas*. https://doi.org/10.18235/0003748

Comité Español de la UICN. (s.f.). *Soluciones basadas en la naturaleza*. https://www.uicn.es/soluciones-basadas-en-la-naturaleza/

Cuervo González, L. M. (2017). *Ciudad y territorio en América Latina: Bases para una teoría multicéntrica, heterodoxa y pluralista*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/entities/publication/abf17722-764a-4b19-b516-924b10b2b75c

Fernández, I. C., & De la Barrera, F. (2018). Biodiversidad urbana, servicios ecosistémicos y planificación ecológica: Un enfoque desde la ecología del paisaje. En M. Ocampo-Peñuela & F. De la Barrera (Eds.), *Biodiversidad urbana en Chile: Estado del arte y los desafíos futuros* (págs. 113-146). Universidad Central de Chile.

Gutiérrez Yurrita, P. J. (2007). Los corredores ecológicos como herramienta para paliar los efectos negativos del cambio climático sobre la biodiversidad. *Derecho Ambiental y Ecología*, 4(21), 55-63.

Istituto Nazionale di Urbanistica, & ONU-Hábitat. (2013). *Carta del espacio público*. Adoptada en la primera Bienal del Espacio Público, Roma, Italia. https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/06/guia_global_ep.pdf

Isaacs Cubides, P. J., Trujillo Ortiz, L. N., & Jaimes, V. (2017). Zonificación de alternativas de conectividad ecológica, restauración y conservación en las microcuencas Curubital, Mugroso, Chisacá y Regadera, cuenca del río Tunjuelo (Distrito Capital de Bogotá), Colombia. *Biota Colombiana*, 18(1Sup), 70–88. https://doi.org/10.21068/c2017.v18s01a04

Jiang, H., Peng, J., Liu, M., Dong, J., & Ma, C. (2024). Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern. *Landscape Ecology*, 39, 54. https://doi.org/10.1007/s10980-024-01852-w

Le Berre. (1922). Territorios. En Bailly, Ferras, & Pumain (Eds.), *Enciclopedia de geografía*. Economía.

Leija, E. G., & Mendoza, M. E. (2021). Estudios de conectividad del paisaje en América Latina: Retos de investigación. *Madera y Bosques*, 27(1), e2712032. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712032

Magaña Rodríguez, D., Tudela Rivadeneyra, E., Meza Pérez, M., & Suárez Bonilla, A. (2021). *Infraestructura verde en ciudades mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

McRae, B. H., Dickson, B. G., Keitt, T. H., & Shah, V. B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 89(10), 2712-2724. https://doi.org/10.1890/07-1861.1

Naciones Unidas. (2019, 6 de mayo). *El peligroso descenso de la naturaleza es "sin precedentes"; "Las tasas de extinción de especies se aceleran"*. Naciones Unidas. https://www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2019/05/nature-decline-unprecedented-report/

Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf

ONU-Hábitat. (2019). *Guía global para el espacio público: De principios globales a políticas y prácticas locales* (1a ed.). Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat).

Puebla, A. R., Cueto, Y. R., & Álvarez Amargos, P. M. (2020). Propuesta de rutas de conectividad para la conservación de la biodiversidad en la Sierra Maestra, Cuba. *Revista de Ciencias Ambientales,* 54(2), 51-67. https://doi.org/10.15359/rca.54-2.3

Sanderson, E. W., Jaiteh, M., Levy, M. A., Redford, K. H., Wannebo, A. V., & Woolmer, G. (2002). The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 52(10), 891–904. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0891:THFATL]2.0.CO;2

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2022, 22 de febrero). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDATU-2021, espacios públicos en los asentamientos humanos. Criterios e indicadores para su implementación, diseño, rehabilitación y conservación*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5643417&fecha=22/02/2022

Taylor, P. D., Fahrig, L., & With, K. A. (2006). Conectividad del paisaje: un regreso a lo básico. En K. R. Crooks & M. Sanjayan (Eds.), *Connectivity conservation* (pp. 29-43). Cambridge University Press.

The World Bank. (s.f.). *Informe sobre el desarrollo mundial 2011: Conflicto, seguridad y desarrollo – Panorama general.* http://documents.worldbank.org/curated/en/806531468161369474

Wilcove, D. S., McLellan, C. H., & Dobson, A. P. (1986). Habitat fragmentation in the temperate zone. En M. E. Soulé (Ed.), *Conservation biology: The science of scarcity and diversity* (pp. 237–256). Sinauer Associates.

Xu, Y., Si, Y., Takekawa, J., Liu, Q., Prins, H. H. T., Yin, S., & De Boer, W. F. (2019). A network approach to prioritize conservation efforts for migratory birds. *Conservation Biology*, 34(2), 416-426. https://doi.org/10.1111/cobi.13383