

Trabajo Final

Elaborado por: Caiza Ricardo

Fecha: 29/08/2025

Dinámica temporal del ECA (2008–2022) y priorización de conservación y restauración de bosques en Quito, 2022

1. Introducción

La fragmentación y pérdida de hábitat constituyen una de las principales amenazas para la biodiversidad a nivel global, particularmente en regiones megadiversas como los Andes Tropicales, donde los procesos de urbanización, expansión agrícola y construcción de infraestructura generan paisajes cada vez más fragmentados (Fahrig, 2003; Arroyo-Rodríguez et al., 2020). En el cantón Quito, el crecimiento urbano y la presión sobre el suelo rural han provocado una reducción y aislamiento progresivo de los remanentes de bosque nativo, comprometiendo la viabilidad de poblaciones de flora y fauna, así como los servicios ecosistémicos asociados (MAE, 2015; Tapia-Armijos et al., 2015).

La conectividad ecológica, entendida como el grado en que la configuración del paisaje facilita o dificulta el movimiento de organismos entre parches de hábitat, se ha consolidado como un componente esencial para la planificación territorial y la conservación (Taylor et al., 1993; Saura & Pascual-Hortal, 2007). Evaluar la conectividad de los parches de bosque en Quito permite no solo dimensionar la magnitud de los cambios en el paisaje a lo largo del tiempo, sino también identificar áreas críticas para la conservación y restauración ecológica.

En este contexto, la pregunta de investigación planteada es: ¿Cómo ha variado la conectividad de los parches de bosque en el cantón Quito entre 2008 y 2022, y cuáles son los parches y enlaces prioritarios para la conservación y restauración en la actualidad?

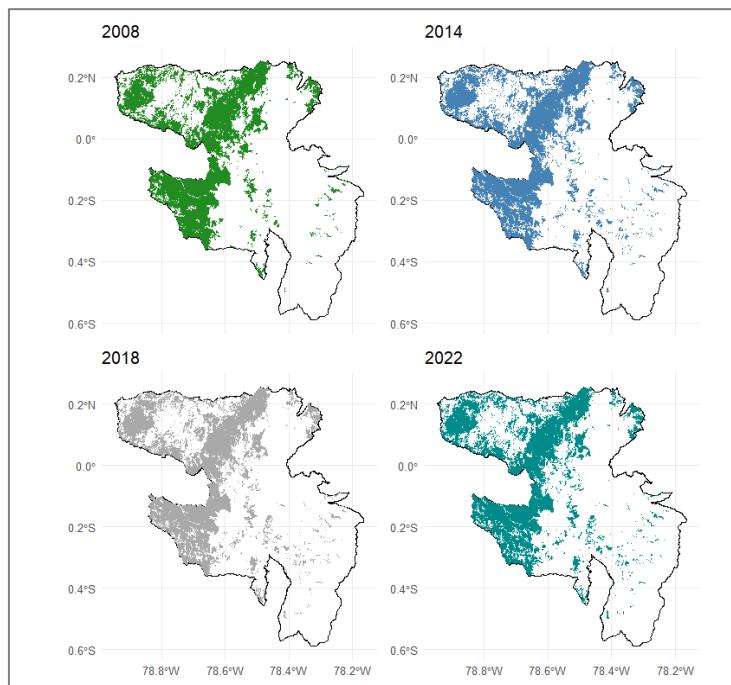
2. Metodología

2.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde al cantón Quito, ubicado en la Sierra norte del Ecuador, caracterizado por un mosaico heterogéneo de ecosistemas andinos que incluyen bosques montanos, matorrales y áreas intervenidas. La zona presenta una marcada presión antrópica asociada al crecimiento urbano, la expansión de la frontera agrícola y la infraestructura vial (Sarmiento et al., 2018).

Figura 1

Mapas de Cobertura de Bosques en el Cantón Quito referente a los períodos 2008, 2014, 2018 y 2022.



2.2 Datos utilizados

Se descargaron archivos vectoriales (shapefiles) de Uso y Cobertura del Suelo correspondientes a los años 2008, 2014, 2018 y 2022, disponibles en el Mapa Interactivo del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2023). Estos insumos fueron procesados en QGIS, donde se filtró la categoría de Bosques, delimitando los parches de hábitat.

Asimismo, se emplearon datos de la clasificación de ecosistemas del Ecuador, así como los límites administrativos cantonales y parroquiales de Quito, obtenidos del Geoportal del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (Geoportal, 2025).

De manera complementaria, se incorporaron datos globales de huella ecológica humana a 100 m de resolución (Mazzariello & Gassert, 2023), en formato ráster, que resultaron útiles para calcular rutas de menor costo en R y realizar la priorización de enlaces.

La totalidad de parámetros utilizados en las funciones se mantuvo en valores estándar para cada caso, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Godínez-Gómez et al. (2025).

2.3 Análisis de datos

Para los cuatro períodos (2008, 2014, 2018 y 2022), se delimitaron los parches de hábitat y se evaluó la conectividad global del paisaje mediante el Índice de Conectividad

Equivalente (ECA) y sus variaciones diferenciales (dECA, rECA), utilizando la función MK_dECA() (Saura et al., 2011; Herrera et al., 2017).

En el escenario más reciente (2022), se aplicaron métricas focales y diferenciales de conectividad: dPC_f, PC_f y sus fracciones, así como CCI_f mediante la función MK_Focal_nodes(). Estos índices permitieron identificar parches prioritarios para conservación y restauración (Saura & Rubio, 2010).

Adicionalmente, se aplicó la función MK_dPCIIC_links() bajo la metodología de remoción secuencial de enlaces para estimar la importancia diferencial de los enlaces y priorizar aquellos con mayor aporte a la conectividad ecológica.

Todos los análisis consideraron umbrales de dispersión de 2 km, 5 km y 10 km, representativos de diferentes grupos de flora y fauna nativa y endémica, lo que permitió explorar la sensibilidad de los resultados a distintas capacidades de movimiento (Galpern et al., 2011). Esta aproximación contribuye a un diagnóstico tanto general como específico de la conectividad ecológica en Quito, ofreciendo insumos relevantes para la gestión territorial y la conservación de la biodiversidad.

3. Resultados

3.1 Análisis temporal de la conectividad ecológica mediante el índice ECA

En el caso particular del umbral de dispersión de 2 km, la conectividad muestra una caída fuerte entre 2008 y 2014, seguida de una ligera recuperación en 2014 y 2018. Sin embargo, hacia 2022 vuelve a presentarse una pérdida de conectividad (dECA -2.93%). Los valores de rECA > 1 en 2008 y 2022 sugieren que las pérdidas de hábitat afectaron zonas clave, incrementando el impacto sobre la conectividad (Tabla 1).

Tabla 1

Resultados del índice ECA y métricas derivadas (dA, dECA, rECA) para un umbral de dispersión de 2 km en los parches de bosque del cantón Quito, entre 2008 y 2022.

Time	Max. Landscape attribute (ha)	Habitat area (ha)	ECA (ha)	dA	dECA	rECA	dA/dECA	Type of change
2008	421524.2	121281.9	94150.28	-71.228	-77.664	1.090	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2014	421524.2	121987	96567.3	0.581	2.567	4.416	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2018	421524.2	122065.4	95988.7	0.064	-0.599	-9.315	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2022	421524.2	120341.4	93170.44	-1.412	-2.936	2.079	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss

En la Tabla 2, la tendencia es similar: disminución inicial (2008), leve recuperación en 2014, estabilidad en 2018, y nueva pérdida en 2022. El rECA elevado en 2014 (1.45) evidencia que pequeños cambios en el hábitat se tradujeron en aumentos importantes en conectividad, mientras que en 2018 ocurre lo contrario.

Tabla 2

Resultados del índice ECA y métricas derivadas (dA, dECA, rECA) para un umbral de dispersión de 5 km en los parches de bosque del cantón Quito, entre 2008 y 2022.

Time	Max. Landscape attribute (ha)	Habitat area (ha)	ECA (ha)	dA	dECA	rECA	dA/dECA comparisons	Type of change
2008	421524.2	121281.9	102207.6	-71.228	-75.753	1.064	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2014	421524.2	121987	103070	0.581	0.844	1.451	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2018	421524.2	122065.4	102554.4	0.064	-0.500	-7.776	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2022	421524.2	120341.4	100291.5	-1.412	-2.207	1.562	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss

Para el umbral de dispersión de 10 km, la conectividad se mantiene relativamente estable entre 2008 y 2018, con ligeras oscilaciones. En 2022, al igual que en los otros umbrales, se observa una pérdida de conectividad (-1.83% de ECA). Aquí, los cambios son menos abruptos, lo que sugiere que especies con mayores capacidades de dispersión se ven menos afectadas por la fragmentación reciente (Tabla 3).

Tabla 3

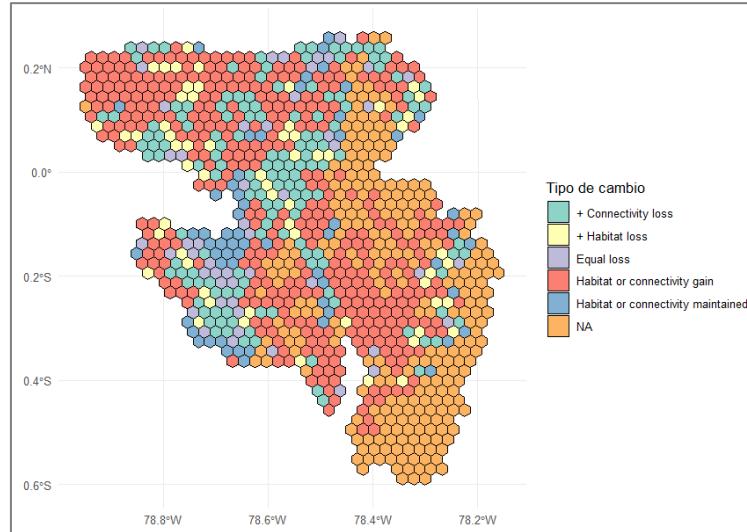
Resultados del índice ECA y métricas derivadas (dA, dECA, rECA) para un umbral de dispersión de 10 km en los parches de bosque del cantón Quito, entre 2008 y 2022.

Time	Max. Landscape attribute (ha)	Habitat area (ha)	ECA (ha)	dA	dECA	rECA	dA/dECA comparisons	Type of change
2008	421524.2	121281.9	107131.1	-71.228	-74.585	1.047	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss
2014	421524.2	121987	106984.8	0.581	-0.137	-0.235	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2018	421524.2	122065.4	106624.6	0.064	-0.337	-5.234	dECA or dA gain	Habitat or connectivity gain
2022	421524.2	120341.4	104667.5	-1.412	-1.836	1.300	dECA < dA < 0	+ Connectivity loss

En la Figura 2 se presenta la variación espacial del cambio porcentual en la conectividad, estimada mediante la función MK_dECA_grid() para el período 2008–2014 y considerando un umbral de dispersión de 5 km. Se aprecia un predominio de hexágonos clasificados como “ganancia de hábitat o conectividad”, especialmente agrupados en las zonas noroccidental y central del cantón.

Figura 2

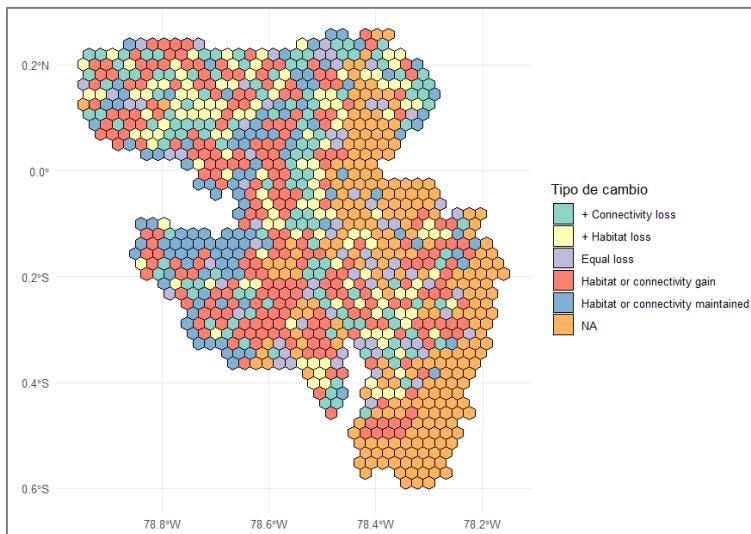
GRID de cambio porcentual en conectividad entre tiempos (dECA) entre los períodos 2008 y 2014 (umbral 5km).



En el intervalo 2014-2018, la tendencia espacial muestra un incremento en las áreas clasificadas como pérdida de conectividad y hábitat, distribuidas de forma más evidente dentro del área de estudio (Figura 3). Esto coincide con procesos de expansión urbana y agrícola que, aunque disminuyen la conectividad, no llegan a anular la presencia de zonas con ganancia de hábitat, las cuales se mantienen como predominantes, pero menos extensas en comparación con el período anterior.

Figura 3

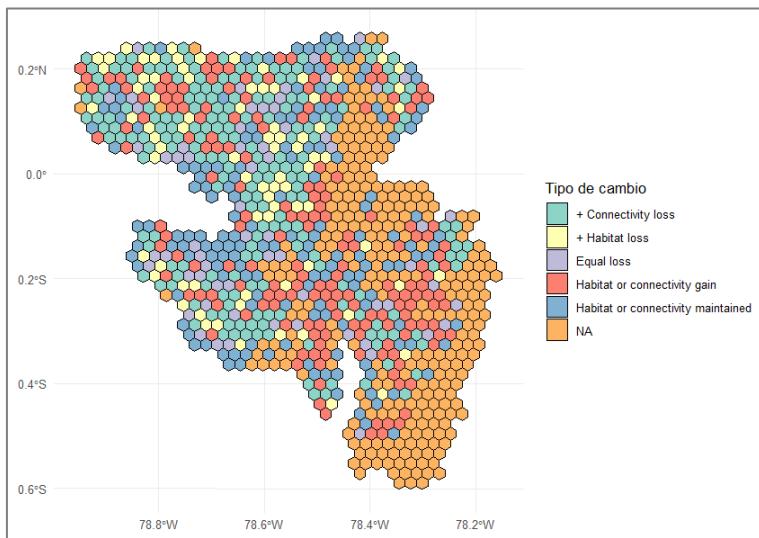
GRID de cambio porcentual en conectividad entre tiempos (dECA) entre los períodos 2014 y 2018 (umbral 5km).



Finalmente, para el período 2018–2022 se observa una pérdida de conectividad de mayor magnitud respecto a los intervalos previos (Figura 4). Si bien no se evidencia una desconexión total entre parches de bosque, la reducción en los valores de conectividad refleja un aumento en la permeabilidad del territorio, asociado a la intensificación de actividades antrópicas de diversa índole.

Figura 4

GRID de cambio porcentual en conectividad entre tiempos (dECA) entre los períodos 2018 y 2022 (umbral 5km).

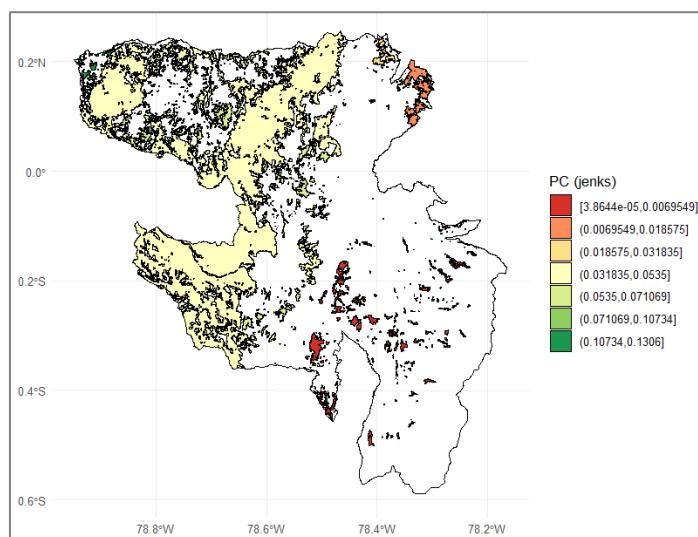


3.2 Análisis de nodos focales para conservación y restauración para el año 2022

La Figura 5 muestra el patrón espacial de probabilidad de conectividad (PC) para los parches del Cantón Quito. Los valores más altos se localizan en la región occidental, donde los fragmentos presentan mayores superficies y un grado superior de interconexión. Destaca especialmente un corredor de parches que se extiende desde el suroccidente hasta el norte del territorio, así como un conjunto localizado en el noroccidente. En contraste, los valores más bajos (tonalidades rojas) corresponden a la zona urbana de Quito, donde la conectividad entre parches remanentes se ve severamente reducida.

Figura 5

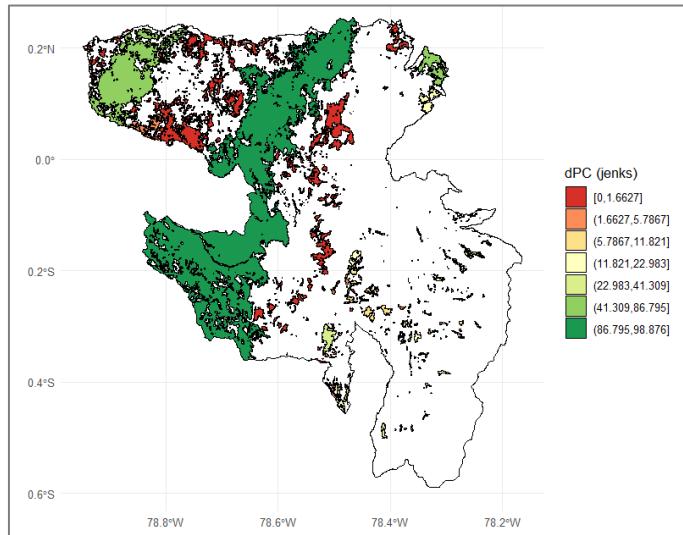
Mapa referente al Índice de Probabilidad de Conectividad (PC) en paisajes focales del Cantón Quito.



La importancia del corredor suroccidental-norte se refuerza en la Figura 6, junto con la presencia del grupo de parches noroccidentales y un conjunto menor en el nororiente del cantón. Esta configuración resalta el papel de los fragmentos occidentales, ubicados en una región relativamente conservada y con menor presión antrópica, estando orientada biogeográficamente hacia el Chocó Ecuatorial.

Figura 6

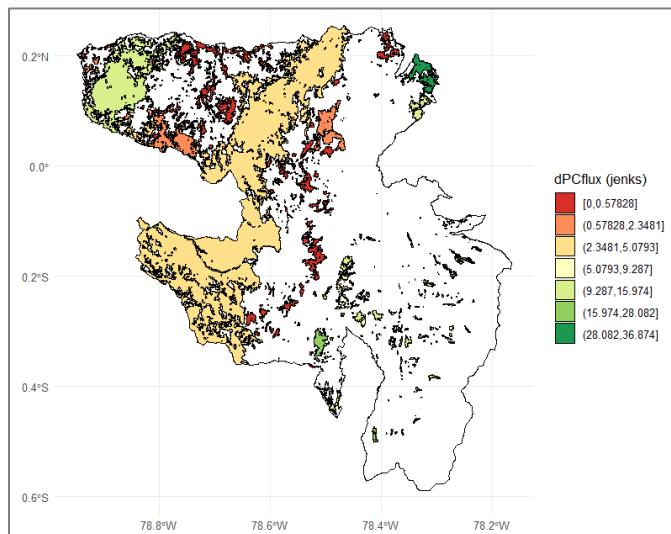
Mapa referente a Delta Probabilidad de Conectividad (dPC) de importancia de parches en el Cantón Quito.



En la Figura 7 se presentan los parches con mayor contribución al flujo de dispersión (dPCflux). Sobresalen los grupos del noroccidente, del nororiente y del suroriente, este último localizado en el valle del sur de Quito. Por el contrario, el corredor suroccidental-norte, a pesar de su extensión, muestra un flujo de dispersión relativamente limitado.

Figura 7

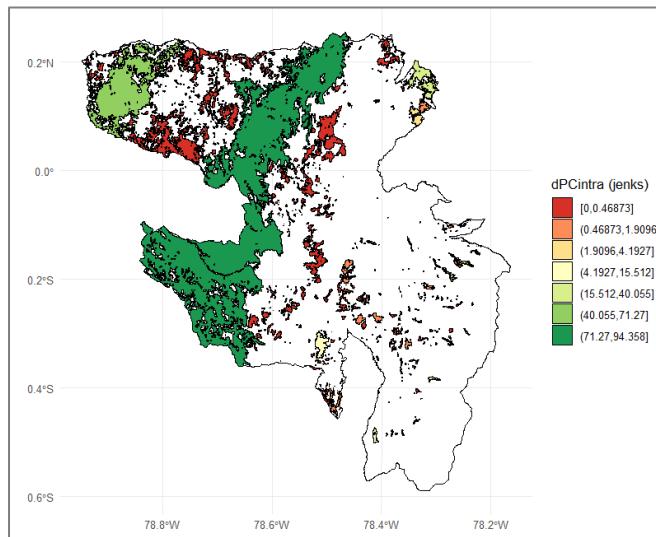
Mapa referente a la fracción Flux del Índice de Probabilidad de Conectividad (dPCflux).



La fracción Intra (dPCintra), representada en la Figura 8, evidencia que los parches del corredor suroccidental-norte mantienen una alta conectividad interna debido a su tamaño y menor efecto de borde. Asimismo, los fragmentos noroccidentales presentan condiciones favorables, al encontrarse menos fragmentados y con una configuración espacial más compacta.

Figura 8

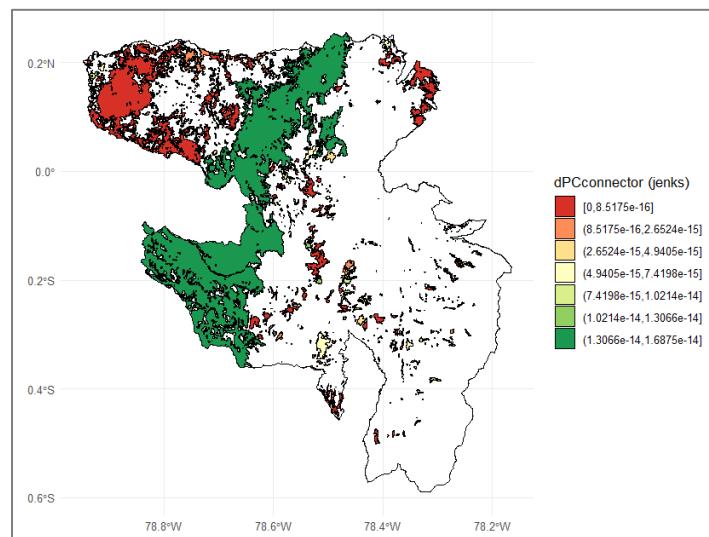
Mapa referente a la fracción Intra del Índice de Probabilidad de Conectividad (dPCintra).



En cuanto a la fracción Connector (dPCconnector), la Figura 9 muestra que el corredor suroccidental-norte adquiere un papel central en la conectividad del territorio, funcionando como eje articulador entre parches. Los fragmentos noroccidentales, aunque relevantes, pierden protagonismo frente a este corredor de gran extensión y posición estratégica.

Figura 9

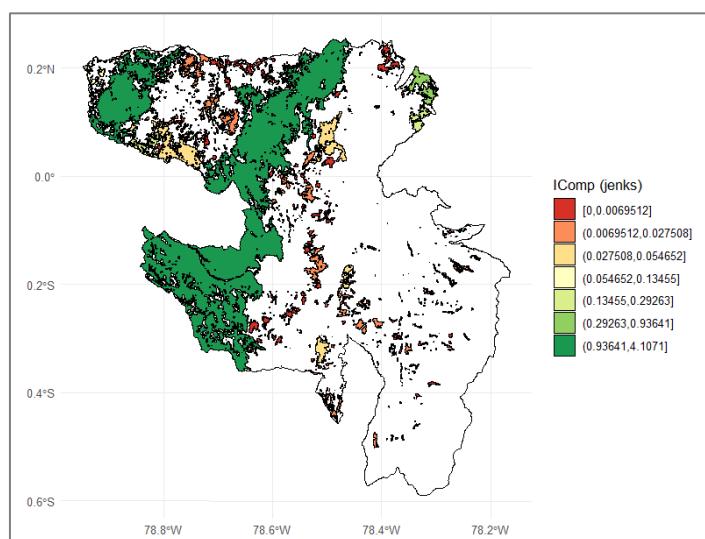
Mapa referente a la fracción Connector del Índice de Probabilidad de Conectividad (dPCconnector).



El Índice de Conectividad Compuesta (CCl_f), representado en la Figura 10, confirma que los nodos más relevantes a escala cantonal corresponden al corredor suroccidental-norte y al grupo noroccidental. Su tamaño, estado de conservación y localización estratégica explican su alta contribución individual a la conectividad general. Por el contrario, los parches pequeños y dispersos en la zona urbana presentan valores bajos, reflejando tanto la fragmentación boscosa como la conversión del territorio hacia usos agrícolas, forestales y residenciales.

Figura 10

Mapa referente al Índice de Conectividad Compuesta (CCl_f) en nodos del Cantón Quito.

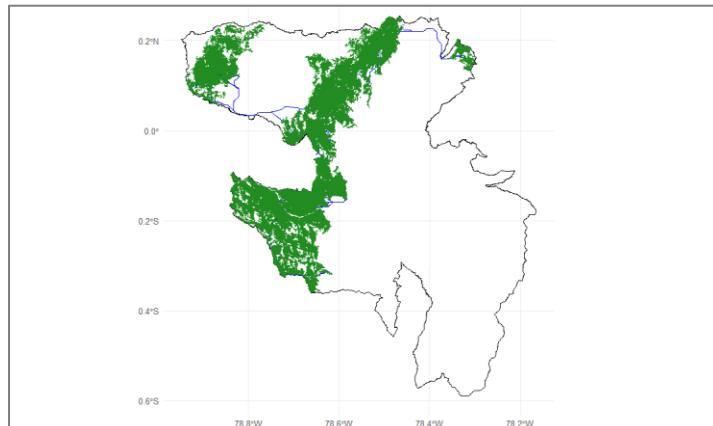


3.3 Análisis de priorización de enlaces entre parches

La Figura 11 muestra los corredores potenciales identificados mediante la función `MK_dPCIIC_links()`, calculados a partir de las rutas de menor costo entre los 20 parches con mayor CCl_f . Destacan las conexiones entre el corredor suroccidental-norte y el grupo noroccidental, así como un enlace adicional hacia un pequeño conjunto de parches en el límite nororiental.

Figura 11

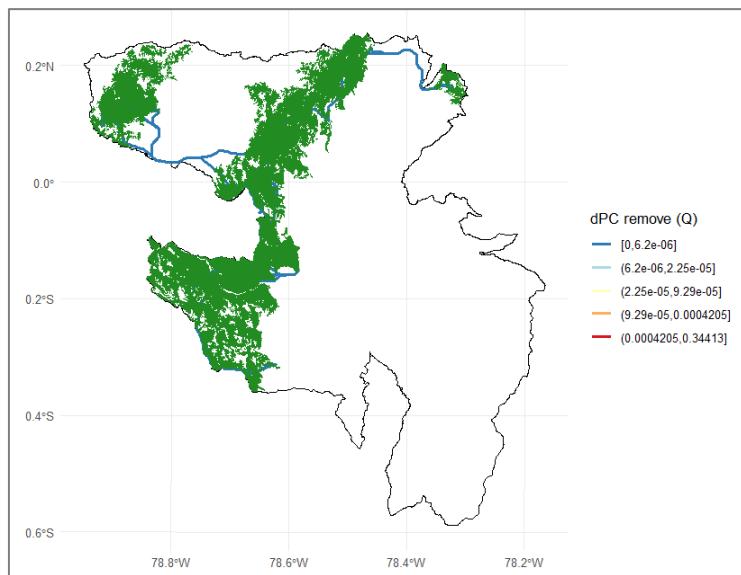
Mapa de corredores potenciales entre 20 parches con mayor índice de Conectividad Compuesta (CCl_f).



Al analizar la priorización de estos corredores (Figura 12), se observa que, pese a su aporte cuantitativo reducido en términos de conectividad cantonal, representan rutas clave por su ubicación en áreas con condiciones ecológicas favorables y menor presión antrópica histórica.

Figura 12

Mapa de priorización de corredores entre 20 parches con mayor índice de Conectividad Compuesta (CCl_f).



Estas rutas podrían ser estratégicas para programas de restauración y conservación, al facilitar procesos de dispersión, flujo genético y adaptación al cambio climático en el mediano y largo plazo.

4. Discusión

4.1 Análisis temporal de la conectividad ecológica mediante el índice ECA

El análisis temporal de la conectividad ecológica en el cantón Quito, medido a través del Índice de Conectividad Equivalente (ECA), revela una tendencia general de disminución en la cohesión del paisaje entre 2008 y 2022. Esta pérdida de conectividad refleja, en gran medida, la presión antrópica creciente asociada a la expansión urbana, la fragmentación vial y el avance de la frontera agrícola (Sarmiento et al., 2018). La reducción del ECA es consistente con estudios en otras regiones andinas donde la expansión de ciudades intermedias y grandes genera discontinuidades significativas en la matriz de hábitat (Etter et al., 2017).

El ECA, al integrar tamaño y disposición espacial de los parches, permite entender no sólo la pérdida en extensión de bosques, sino también cómo su aislamiento compromete la conectividad funcional para especies con diferentes capacidades de dispersión (Saura et al., 2011). En este caso, los escenarios de 2, 5 y 10 km muestran una pérdida proporcionalmente mayor en los umbrales de corto alcance, lo que indica que especies con baja movilidad como flora con dispersión limitada y fauna pequeña son las más afectadas. Estos resultados concuerdan con análisis previos en paisajes urbanos tropicales, donde la conectividad a escalas locales tiende a colapsar primero, mientras

que algunos flujos regionales se mantienen en corredores mayores (Galpern et al., 2011).

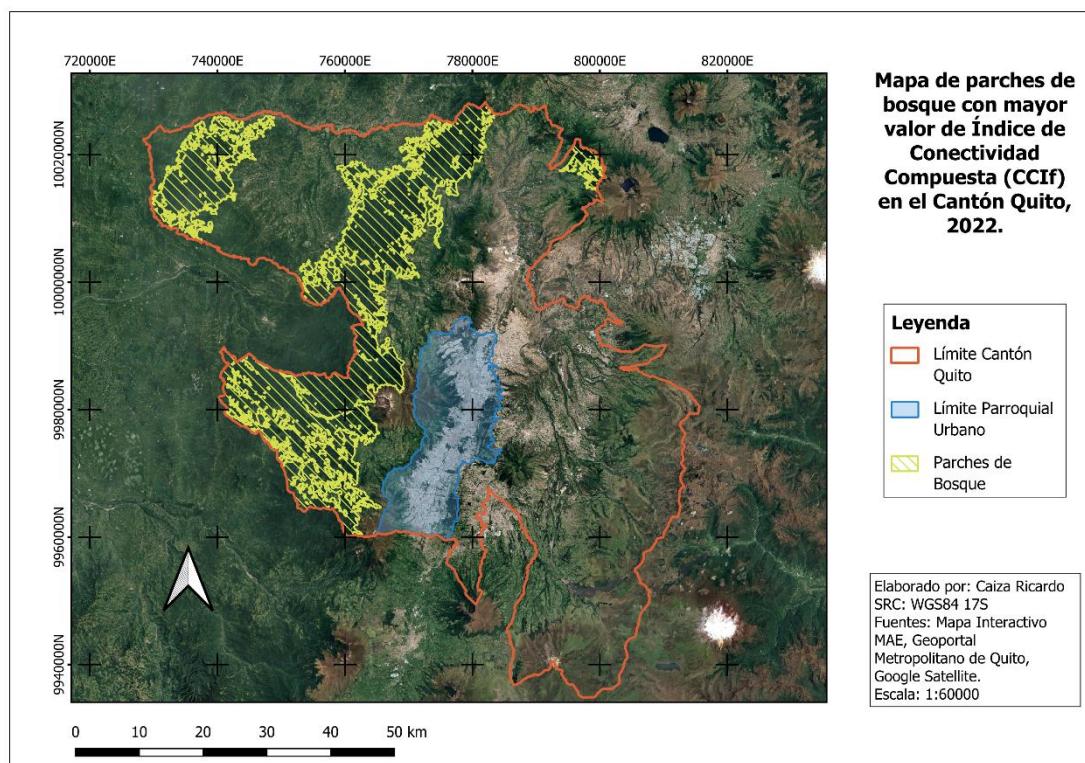
En el contexto socioeconómico de Quito, esta tendencia resulta particularmente crítica, dado que la ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional acelerado y una fuerte expansión de infraestructura en los últimos 15 años (INEC, 2023). Dichos procesos no solo fragmentan hábitats, sino que también aumentan la presión sobre áreas de bosque remanente en las periferias, reduciendo su capacidad de sostener procesos ecológicos clave. El análisis temporal del ECA evidencia, por tanto, la urgencia de políticas de planificación territorial que integren criterios de conectividad ecológica y restauración activa.

4.2 Análisis de nodos focales para conservación y restauración para el año 2022

El análisis de nodos focales mediante las métricas dPC_f , PC_f y CCl_f para el año 2022 permitió identificar parches clave que cumplen un papel desproporcionado en la conectividad del paisaje. Destaca el corredor de parches ubicado en el flanco suroccidental-norte de Quito (Figura 13), que se configura como un eje estructural de conectividad orientado hacia el litoral y vinculado indirectamente con las condiciones bioclimáticas del Chocó ecuatoriano. Esta alineación espacial no es casual, pues estudios previos han documentado que las vertientes occidentales de los Andes mantienen flujos de dispersión relevantes para especies que requieren mosaicos de hábitat continuos, como aves y pequeños mamíferos (Cuesta et al., 2017).

Figura 13

Parches seleccionados con mayor Índice de Conectividad Compuesta (CCl_f) del Cantón Quito.



Los parches al noroccidente del cantón, igualmente dentro del grupo con mayor CCI_f, resaltan por su contribución a la conectividad regional, pues aseguran el flujo intra-paisaje y su enlace con matrices externas a Quito. Estos resultados son consistentes con hallazgos en otros sectores de los Andes, donde nodos bien conectados en mosaicos fragmentados sostienen la resiliencia de metapoblaciones en paisajes dominados por actividades humanas (Arroyo-Rodríguez et al., 2020).

Por otro lado, los parches al nororiente, aunque de menor tamaño, cumplen una función estratégica al facilitar conexiones transfronterizas con ecosistemas vecinos. Esta importancia relativa de nodos pequeños pero estratégicamente ubicados ha sido descrita en paisajes fragmentados como clave para la persistencia de especies con rangos de movimiento intermedio (Saura & Rubio, 2010). Sin embargo, el análisis revela que gran parte de los parches urbanos, incluyendo parques metropolitanos y áreas verdes menores, aportan menos a la conectividad a escala cantonal. No obstante, su relevancia local es indiscutible: funcionan como refugios de biodiversidad urbana y potenciales sitios de restauración ecológica. En este sentido, iniciativas de restauración gradual con especies nativas en parques metropolitanos, actualmente en marcha, constituyen una oportunidad tangible para fortalecer la conectividad intraurbana (MAATE, 2023).

En suma, los nodos focales identificados constituyen insumos esenciales para orientar estrategias diferenciadas de conservación y restauración, donde tanto los grandes corredores periurbanos como las áreas verdes intraurbanas deben ser integrados en una visión multiescalar de conectividad ecológica.

4.3 Análisis de priorización de enlaces entre parches

El análisis de priorización de enlaces mediante la función MK_dPCIIC_links() reveló que la conectividad no depende únicamente de la presencia de grandes parches, sino de los vínculos que estos establecen entre sí. Los resultados evidenciaron que ciertos enlaces, especialmente aquellos que conectan el corredor suroccidental con los parches del noroccidente, tienen un aporte crítico en el mantenimiento de la conectividad estructural y funcional del paisaje. La pérdida de estos enlaces podría generar un efecto de desconexión en cascada, reduciendo drásticamente la capacidad del paisaje para sostener flujos de dispersión.

Estos hallazgos concuerdan con estudios que resaltan la importancia de identificar enlaces de alto valor para priorizar acciones de restauración o mantenimiento, dado que en paisajes fragmentados la conectividad depende más de la calidad de los corredores que de la cantidad de hábitat remanente (Pascual-Hortal & Saura, 2006). Además, la incorporación de datos de huella humana (Mazzariello & Gassert, 2023) permitió integrar un componente de presión antrópica, destacando que muchos de los enlaces de alto valor coinciden con áreas sujetas a crecimiento urbano y expansión agrícola, lo que aumenta su vulnerabilidad.

El contexto socioeconómico de Quito, marcado por la expansión de infraestructura y la demanda creciente de suelo urbano, plantea un desafío adicional: los corredores ecológicos identificados compiten directamente con áreas de interés para urbanización y desarrollo productivo. No obstante, este mismo escenario abre oportunidades para un ordenamiento territorial más integral, donde los corredores de conectividad sean reconocidos como infraestructura verde esencial para la resiliencia de la ciudad frente al cambio climático y la pérdida de biodiversidad (Ahern, 2011).

4.4 Limitaciones y consideraciones

Es necesario reconocer algunas limitaciones del presente estudio. En primer lugar, se analizaron únicamente coberturas clasificadas como bosques, sin discriminar entre bosque nativo y plantaciones forestales, lo cual puede sobreestimar la funcionalidad de ciertos parches, particularmente en el flanco oriental del cantón donde predominan plantaciones de pino y eucalipto. Aunque estos pueden ofrecer conectividad estructural, su aporte funcional para la biodiversidad es limitado (Brockhoff et al., 2008). En segundo lugar, el análisis no incorporó parámetros de calidad de hábitat ni datos de biodiversidad específica, lo que restringe la interpretación ecológica a una perspectiva espacial y funcional.

Futuras investigaciones deberían integrar métricas de calidad de hábitat, diversidad de especies y escenarios de cambio climático, a fin de refinar la priorización de áreas para conservación y restauración. Asimismo, la aplicación de enfoques participativos que incorporen actores locales y planificadores urbanos permitiría alinear la gestión de conectividad con las necesidades sociales y económicas del cantón. En este sentido, la conectividad ecológica debe ser concebida no sólo como un criterio de conservación, sino como una estrategia para garantizar bienestar humano, servicios ecosistémicos y resiliencia urbana a largo plazo.

5. Conclusiones

El análisis temporal del ECA entre 2008 y 2022 muestra una reducción progresiva en la conectividad ecológica de los parches de bosque en el cantón Quito. Aunque la pérdida no fue uniforme, el patrón refleja el impacto de la expansión urbana, la fragmentación vinculada a la infraestructura vial y los cambios de uso del suelo. Esta disminución compromete de manera particular a especies con baja capacidad dispersiva, que dependen de un paisaje más continuo para su supervivencia. En este sentido, los resultados sugieren que la conservación de la biodiversidad en Quito enfrenta el reto de equilibrar el desarrollo urbano con la necesidad de mantener corredores funcionales que sostengan los procesos ecológicos.

La priorización de nodos focales destacó la relevancia de los parches en el corredor suroccidental-norte y el noroccidente del cantón, que actúan como ejes estratégicos de conexión regional, vinculando ecosistemas andinos con áreas influenciadas por el Chocó. Estos nodos cumplen un papel crucial para sostener la resiliencia ecológica en un contexto de fragmentación. A menor escala, los parches urbanos y periurbanos, aunque aislados y pequeños, también representan oportunidades para la restauración y para reforzar la conectividad urbana y periurbana. La identificación de estos sitios permite destinar recursos de conservación donde el impacto puede ser más tangible y duradero.

El análisis de enlaces mostró que las conexiones en el corredor occidental son esenciales para mantener la estructura de conectividad del paisaje. Su pérdida implicaría un deterioro crítico en el flujo entre parches, lo cual refuerza la urgencia de protegerlos. Al mismo tiempo, los enlaces secundarios en el nororiente, aunque menos robustos, revelan un potencial de articulación hacia otros cantones y paisajes biogeográficos. Esto sugiere que una estrategia de conservación eficaz no debe centrarse únicamente en los corredores principales, sino también en fortalecer vínculos secundarios que amplíen la red ecológica. En definitiva, proteger lo esencial y restaurar

lo vulnerable se configura como la ruta más efectiva para sostener la conectividad en Quito frente a la presión de la fragmentación.

6. Bibliografía

- Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341–343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
- Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F. P., Fahrig, L., Martínez-Ramos, M., & Tabarelli, M. (2020). Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation. *Ecology Letters*, 23(9), 1404–1420. <https://doi.org/10.1111/ele.13535>
- Brockhoff, E. G., Jactel, H., Parrotta, J. A., Quine, C. P., & Sayer, J. (2008). Plantation forests and biodiversity: Oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation*, 17(5), 925–951. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9380-x>
- Cuesta, F., Peralvo, M., & van Manen, F. T. (2017). Connectivity and conservation in Andean ecosystems: A synthesis for the Northern Andes. *Journal for Nature Conservation*, 37, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.02.002>
- Etter, A., McAlpine, C., Pullar, D., & Possingham, H. (2005). Modelling the dynamics of deforestation and fragmentation in the Colombian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 79(1), 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.006>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Galpern, P., Manseau, M., & Fall, A. (2011). Patch-based graphs of landscape connectivity: A guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation*, 144(1), 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.002>
- Geoportal. (2025). *Geoportal del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Secretaría de Planificación. <https://geoportal.quito.gob.ec/visor/descargas.php>
- Godínez-Gómez, O., Correa-Ayram, C., Goicolea, T., & Saura, S. (2025). Makurhini: An R package for comprehensive analysis of landscape fragmentation and connectivity. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6398746/v1>
- Herrera, L., Saura, S., & Bodin, Ö. (2017). Unraveling the determinants of the structural connectivity of the Andean páramo. *Landscape Ecology*, 32(2), 255–271. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0446-5>
- INEC. (2023). *Proyecciones poblacionales Ecuador 2000–2030*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>

- MAATE. (2023). *Mapa interactivo de cobertura y uso del suelo*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador. <https://mapainteractivo.ambiente.gob.ec>
- MAE. (2015). *Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques: Informe de resultados del Ecuador*. Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Mazzariello, J., & Gassert, F. (2023). *Global 100m Terrestrial Human Footprint (HFP-100) [Dataset]*. Dryad. <https://doi.org/10.5061/dryad.ttdz08m1f>
- Pascual-Hortal, L., & Saura, S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 21(7), 959–967. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-0013-z>
- Saura, S., & Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83(2–3), 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Saura, S., & Rubio, L. (2010). A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecoigraphy*, 33(3), 523–537. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x>
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., & Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to assess landscape connectivity trends: Application to European forests (1990–2000). *Ecological Indicators*, 11(2), 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.011>
- Sarmiento, F. O., Vallejo, A., & Cordero, C. (2018). Andean forest landscapes and human impacts: Fragmentation and conservation in Ecuador. *Mountain Research and Development*, 38(3), 211–221. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00092.1>
- Sarmiento, F. O., Aguirre, N., & Mena, P. (2018). Andean landscapes and biodiversity conservation: Human–nature interactions in the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 38(3), 217–227. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-17-00091.1>
- Tapia-Armijos, M. F., Homeier, J., Espinosa, C. I., Leuschner, C., & de la Cruz, M. (2015). Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s—losing a hotspot of biodiversity. *PLoS ONE*, 10(9), e0133701. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 68(3), 571–573. <https://doi.org/10.2307/3544927>

7. Material anexo

Script utilizado en R.

```

####Carga de librerías necesarias
library(ggplot2)
library(sf)
library(terra)
library(raster)
library(Makurhini)
library(RColorBrewer)
library(dplyr)
library(patchwork)
library(classInt)
library(purrr)
library(gdistance)
library(raster)
library(writexl)

#Abrimos los shape files necesarios
Quito_2008 <- read_sf("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/cobertura_vegetal_2008_a/cob_quito_2008.shp")
Quito_2014 <- read_sf("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/cobertura_vegetal_2014_a/cob_quito_2014.shp")
Quito_2018 <- read_sf("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/cobertura_vegetal_2018_a/cob_quito_2018.shp")
Quito_2022 <- read_sf("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/cobertura_vegetal_2022_a/cob_quito_2022.shp")

#Abrimos ruta de paisaje (Cantón Quito)
area_estudio <- read_sf("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/Cantón_Quito.shp")

#Filtramos por tipo de cobertura (sólo BOSQUE)
T_2008 <- Quito_2008 %>% filter(TYPE == "BOSQUE")
T_2014 <- Quito_2014 %>% filter(TYPE == "BOSQUE")
T_2018 <- Quito_2018 %>% filter(TYPE == "BOSQUE")
T_2022 <- Quito_2022 %>% filter(TYPE == "BOSQUE")

#Graficamos los 4 mapas de parches de bosque en un sólo gráfico
# ---- mapa 2008 ----
p2008 <- ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = T_2008, fill = "forestgreen", color = NA) +
  ggtitle("2008") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(), # Ocultar etiquetas del eje X
        axis.ticks.x = element_blank()) # Ocultar marcas del eje X

# ---- mapa 2014 ----
p2014 <- ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = T_2014, fill = "steelblue", color = NA) +
  ggtitle("2014") +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_blank(), # Ocultar etiquetas del eje X
        axis.ticks.x = element_blank()) # Ocultar marcas del eje X

```

```

# ---- mapa 2018 ----
p2018 <- ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = T_2018, fill = "darkgray", color = NA) +
  ggttitle("2018") +
  theme_minimal()

# ---- mapa 2022 ----
p2022 <- ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = T_2022, fill = "darkcyan", color = NA) +
  ggttitle("2022") +
  theme_minimal()

# ---- juntar en una cuadrícula 2x2 ----
(p2008 + p2014) / (p2018 + p2022)

#Creamos una lista
lista_parches <- list("2008" = T_2008,
                      "2014" = T_2014,
                      "2018" = T_2018,
                      "2022" = T_2022)
length(lista_parches)

names(lista_parches)

#Atributo máximo área de estudio
Max_atributo <- as.numeric(st_area(area_estudio)) * 0.0001 # Hectáreas
Max_atributo

#Calculamos dECA
dECA_test <- MK_dECA(nodes= lista_parches, attribute = NULL, area_unit =
= "ha",
                      distance = list(type= "edge", keep = 0.1), metric
= "PC",
                      probability = 0.05, distance_thresholds = c(2000,
5000, 10000),
                      LA = Max_atributo, plot= c("2008", "2014",
"2018", "2022"),
                      intern = TRUE)

#Revisamos plots y tablas generadas
dECA_test$`2000`
dECA_test$`5000`
dECA_test$`10000`

#ECA y dECA sobre un grid con MK_dECA_grid()
hexagons_dECA <- MK_dECA_grid(nodes = lista_parches,
                                 nodes_names = c("T1", "T2", "T3", "T4"),
                                 region = area_estudio,
                                 area_unit = "ha",
                                 metric = "PC",
                                 distance_threshold = 5000,
                                 probability = 0.5,

```

```

          distance = list(type = "edge", keep =
0.1),
          grid = list(hexagonal = TRUE,
                      cellsize = unit_convert(5,
"km2", "m2")),
                      intern = TRUE)
names(hexagons_dECA)

#Visualizamos el Grid T1 vs T2
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, aes(color = "Study area"), fill = NA,
color = "black") +
  geom_sf(data = hexagons_dECA$result_T1.T2, aes(fill = Type.Change),
color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(
    palette = "Set3", # Puedes cambiar a "Set2", "Dark2", etc.
    direction = 1,
    name = "Tipo de cambio",
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "GRID dECA 2008 vs 2014"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#Visualizamos el Grid T2 vs T3
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, aes(color = "Study area"), fill = NA,
color = "black") +
  geom_sf(data = hexagons_dECA$result_T2.T3, aes(fill = Type.Change),
color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(
    palette = "Set3", # Puedes cambiar a "Set2", "Dark2", etc.
    direction = 1,
    name = "Tipo de cambio"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "GRID dECA 2014 vs 2018"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#Visualizamos el Grid T3 vs T4
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, aes(color = "Study area"), fill = NA,
color = "black") +
  geom_sf(data = hexagons_dECA$result_T3.T4, aes(fill = Type.Change),
color = "black", size = 0.1) +

```

```

scale_fill_brewer(
  palette = "Set3", # Puedes cambiar a "Set2", "Dark2", etc.
  direction = 1,
  name = "Tipo de cambio"
) +
theme_minimal() +
labs(
  title = "GRID dECA 2018 vs 2022"
) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

#Añadir columna Id a T_2022
T_2022$id <- 1:nrow(T_2022)

#Guardar shp
st_write(T_2022, "E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo Final/Conectividad
Quito/cobertura_vegetal_2022_a/Temporada_2022.shp",
  driver = "ESRI Shapefile", delete_layer = TRUE)

T_2022 <- T_2022 %>%
  mutate(Id = row_number())

#Prioridad de conservación y restauración período 2022
test <- MK_Focal_nodes(nodes = T_2022,
                        id = "Id",
                        attribute = NULL,
                        raster_attribute = NULL,
                        fun_attribute = NULL,
                        distance = list(type = "edge", keep = 0.1),
                        metric = "PC",
                        probability = 0.5,
                        distance_thresholds = 5000,
                        search_buffer = 10000,
                        fragmentation = TRUE,
                        edge_distance = 500,
                        min_node_area = 100,
                        intern = TRUE)

#Guardar data frame
write_xlsx(test, "E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo Final/Conectividad
Quito/test.xlsx")

###Índice PC en paisajes focales
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(test$PC, n = 7, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%
  mutate(dPC_q = cut(PC,
                     breaks = breaks$brks,

```

```

            include.lowest = TRUE,
            dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "PC
(jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "PC en paisajes focales",
    fill = "PC"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

####Índice dPC focal
breaks <- classInt::classIntervals(test$dPC, n = 7, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPC,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPC
(jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPC",
    fill = "dPC"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

####Fracción intra
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(test$dPCintra, n = 7, style =
"jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPCintra,
                     breaks = breaks$brks,

```

```

            include.lowest = TRUE,
            dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name =
"dPCintra (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCintra",
    fill = "dPCintra"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

###Fracción flux:
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(test$dPCflux, n = 7, style =
"jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPCflux,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "dPCflux
(jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCflux",
    fill = "dPCflux"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

###Fracción connector:
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(test$dPCconnector, n = 7, style =
"jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%

```

```

    mutate(dPC_q = cut(dPCconnector,
                        breaks = breaks$brks,
                        include.lowest = TRUE,
                        dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name =
"dPCconnector (jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "dPCconnector",
    fill = "dPCconnector"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

####Índice de Conectividad Compuesto CCIF
# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(test$IComp, n = 7, style = "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
PC <- test %>%
  mutate(dPC_q = cut(IComp,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = PC, aes(fill = dPC_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "IComp
(jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Índice de Conectividad Compuesto",
    fill = "IComp"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

####Priorización de enlaces por eliminación de enlaces (Link removal)
# Abrimos archivo raster
resistance_matrix <- raster("E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/HumanFootPrint2.tif")

```

```

#Ordenamos por CCIIf y seleccionamos los 20 con mayor valor
T_2022 <- T_2022 %>%
  st_join(test, by = "Id")

#Seleccionamos 20 parches con mayor CCIIf
parches_ejemplo <- T_2022 %>%
  arrange(desc(IComp)) %>%
  slice(1:20)

#Reasignamos un Id consecutivo de 1 a 20 (igual que en tu guía)
parches_ejemplo$Id <- 1:nrow(parches_ejemplo)

# Guardar como shapefile
st_write(parches_ejemplo, "E:/Clase Conectividad FAO/Trabajo
Final/Conectividad Quito/Parches_ejemplo.shp",
  driver = "ESRI Shapefile")

# Asegúrate que el área de estudio y el ráster tengan el mismo CRS
area_estudio_utm <- st_transform(area_estudio,
  st_crs(resistance_matrix))

# Convertimos el polígono a Spatial
area_sp <- as(area_estudio_utm, "Spatial")

# Recortamos el ráster
resistance_matrix <- mask(crop(resistance_matrix, area_sp), area_sp)

#Visualizamos raster de resistencia y los 20 nodos
raster_map <- as(resistance_matrix, "SpatialPixelsDataFrame")
raster_map <- as.data.frame(raster_map)
colnames(raster_map) <- c("value", "x", "y")
ggplot() +
  geom_tile(data = raster_map, aes(x = x, y = y, fill = value), alpha
= 0.8) +
  geom_sf(data = area_estudio, aes(color = "Study area"), fill = NA,
color = "black") +
  geom_sf(data = parches_ejemplo, aes(color = "Habitat nodes"), fill =
"forestgreen", linewidth = 0.5) +
  scale_fill_gradientn(colors = c("#000004FF", "#1B0C42FF",
"#4B0C6BFF", "#781C6DFF",
 "#A52C60FF", "#CF4446FF",
 "#ED6925FF", "#FB9A06FF",
 "#F7D03CFF", "#FCFFA4FF"))+
  scale_color_manual(name = "", values = "black")+
  theme_minimal() +
  theme(axis.title.x = element_blank(),
    axis.title.y = element_blank())

#A los valores NA les asignamos un alto valor para evitar que pasen
por ahí
resistance_matrix[is.na(resistance_matrix)] <- 100000

#Estimamos la matriz de transición
tr <- transition(resistance_matrix, function(x) 1/mean(x), 8)

```

```

#Hacemos una corrección para los movimientos en diagonal
tr <- geoCorrection(tr, type = "c")

#Estimamos el centroide de nuestros parches
centroides <- st_centroid(parches_ejemplo, of_largest_polygon = TRUE)
centroides <- st_coordinates(centroides)

#Loop para estimar corredores entre parches
rutas_list <- list()
counter <- 1
for (i in 1:(nrow(centroides) - 1)) {
  #cat(paste0(i, " de ", nrow(centroides), "\r"))
  counter <- 1
  rutas <- map_dfr((i + 1):nrow(centroides), function(j){
    if(counter <= nrow(centroides)){
      ruta <- shortestPath(tr, centroides[i,], centroides[j,], output
= "SpatialLines")
      ruta <- st_as_sf(ruta); st_crs(ruta) <- st_crs(parches_ejemplo)
      ruta$from <- i ; ruta$to <- j
      return(ruta)
    }
  })
  rutas_list[[i]] <- rutas
}

rutas_mc <- do.call(rbind, rutas_list)

#Visualizamos las rutas
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = rutas_mc, aes(color = "corredores"), color = "blue",
  linewidth = 0.5) +
  geom_sf(data = parches_ejemplo, aes(color = "Habitat nodes"),
  fill = "forestgreen", color = NA, linewidth = 0.5) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Corredores potenciales"
  ) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

#Distancia efectiva promedio como umbral de distancia
Effec_mean <- mean(resistance_matrix[], na.rm = TRUE) * 10000 # 10km

#Aplicamos la función MK_dPCIIC_links()
delta <- MK_dPCIIC_links(nodes = parches_ejemplo,
                        attribute = NULL,
                        area_unit = "ha",
                        distance = list(type = "least-cost",
                                      resistance =
resistance_matrix),
                        removal = TRUE,

```

```

        metric = "PC",
        probability = 0.5,
        distance_thresholds = round(Effec_mean),
        parallel = NULL,
        parallel_mode = 0,
        intern = TRUE)

#Existen otras formas, pero crearé un nuevo ID
delta$ID_nuevo <- paste0(delta$Destination, "_", delta$Source)

#Guardo las rutas en un objeto nuevo para tener de respaldo mi vector
original
rutas_mc2 <- rutas_mc
rutas_mc2$ID_nuevo <- paste0(rutas_mc2$from, "_", rutas_mc$to)

#Aplicar merge
rutas_mc2 <- merge(rutas_mc2, delta, by = "ID_nuevo")

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(rutas_mc2$dPC_removal, n = 5, style
= "jenks")

# Crear una nueva variable categórica con los intervalos
rutas_mc2 <- rutas_mc2 %>%
  mutate(dPC_q = cut(dPC_removal,
                     breaks = breaks$brks,
                     include.lowest = TRUE,
                     dig.lab = 5))

# Graficar usando ggplot2 y colores de ColorBrewer
ggplot() +
  geom_sf(data = area_estudio_utm, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = rutas_mc2, aes(color = dPC_q), size = 0.5, linewidth
= 1) +
  scale_color_brewer(palette = "RdYlBu", direction = -1, name = "dPC
remove (Q)") +
  geom_sf(data = parches_ejemplo, aes(color = "Habitat nodes"),
         fill = "forestgreen", color = NA, linewidth = 0.5) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Priorización de enlaces (remove)",
    fill = "dPC"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

```