

Trabajo Final - Curso: Enfoques, métodos y herramientas para el análisis de la conectividad ecológica

Grupo: 2

Estudiante: Ketty Milagros Chávez Arzapalo

1. Introducción:

El Parque Nacional da Serra da Capivara enfrenta una **fragmentación del hábitat** que puede aumentar el riesgo de **extinción local de especies** debido a la reducción en el tamaño de las poblaciones y la **pérdida de diversidad genética** (Fahrig, 2003). Esta fragmentación limita la **conectividad ecológica**, lo que afecta la **dispersión de especies** y el intercambio genético entre los parches de hábitat. Dicha conectividad es esencial para mantener la **biodiversidad**, ya que permite el flujo de individuos y genes entre los parches, contribuyendo a la **viabilidad de las especies** a largo plazo.

Según el concepto de **metapoblaciones** propuesto por **Hanski y Gilpin (1997)**, las poblaciones de especies dependen de la conectividad entre parches de hábitat. Cuando estas poblaciones están **aisladas**, se corre el riesgo de **pérdida de diversidad genética** y un aumento de la **vulnerabilidad** ante **amenazas ambientales**. La **falta de conectividad** puede hacer que las especies no puedan adaptarse adecuadamente a cambios en su entorno, incrementando el riesgo de extinción.

Además, el **cambio climático** está afectando la **distribución de las especies** y su capacidad para **migrar** hacia nuevas áreas más adecuadas para su supervivencia. Esto hace que la conectividad ecológica sea aún más crucial, ya que, sin ella, las especies no podrán desplazarse hacia hábitats que les brinden las condiciones necesarias para sobrevivir (Pettorelli et al., 2014). Por lo tanto, la **mejora de la conectividad ecológica** en el Parque Nacional da Serra da Capivara es una necesidad urgente para mitigar los efectos del cambio climático y la fragmentación del hábitat.

A partir de la situación descrita, una pregunta clave para esta investigación es **¿Cómo influye la fragmentación del hábitat en la conectividad ecológica del Parque Nacional da Serra da Capivara?**

2. Metodología:

Para el presente informe se seleccionó la información proporcionada por el curso, denominada “Final 2”, correspondiente al Parque Nacional da Serra da Capivara, ubicado en el estado de Piauí, al noreste de Brasil. Este parque posee una superficie aproximada de 129,000 hectáreas y su vegetación está conformada por bosque seco estacional y matorrales semiáridos.

Con el objetivo de caracterizar el hábitat disponible y su conectividad, se utilizaron los mapas globales de cobertura arbórea desarrollados por Potapov et al. (2021). Se identificaron los parches de bosque considerando un **buffer** de 20 km. Para ello, se delimitaron los polígonos del parque, se generó un buffer de 20 km alrededor y se extrajeron los parches boscosos con una cobertura arbórea igual o superior al 30% y una resolución espacial de 30 metros.

En este informe se calcularon los índices de fragmentación (número de fragmentos, tamaño medio y porcentaje de borde) y el índice integral de conectividad (IIC), incluyendo sus componentes: **dIIC**, **dIICintra**, **dIICflux**, **dIICconnector** y **dIICcrest**. Este análisis responde a la necesidad urgente de mitigar los efectos del cambio climático y la fragmentación del hábitat, por lo que resulta esencial conocer el estado actual de la fragmentación y conectividad del paisaje.

Los cálculos fueron realizados utilizando el paquete **Makurhini**, ejecutado en el software **RStudio**. Además, se asumió una distancia de dispersión de las especies de 10 km para el análisis de conectividad.

3. Resultados:

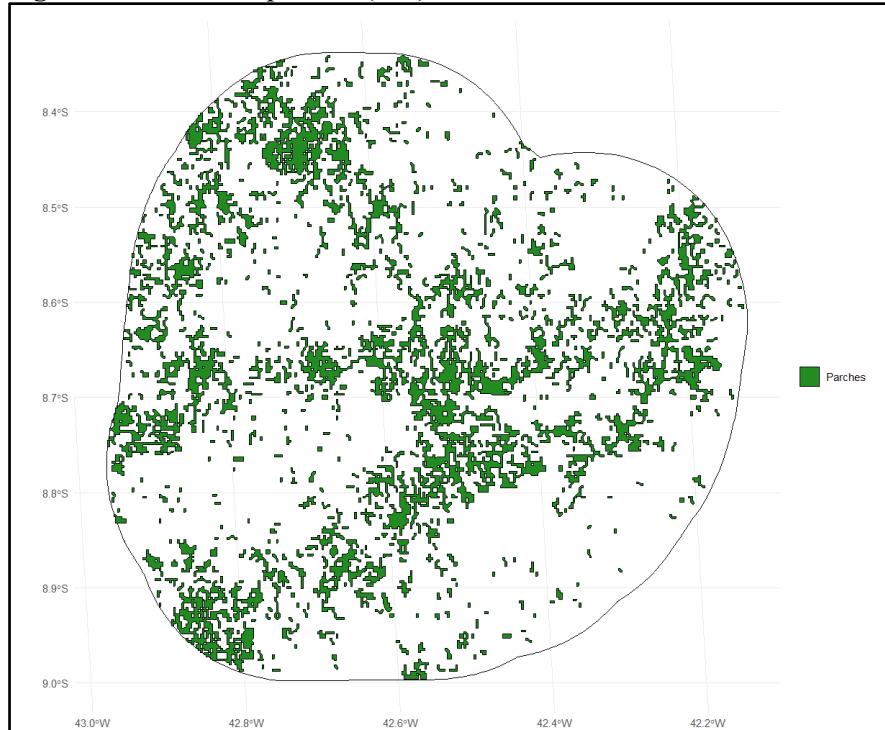
3.1. Respecto a la fragmentación se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Métricas de fragmentación del Parque Nacional da Serra da Capivara

Metric	Value
Patch area (ha)	86670.1275
Number of patches	683.0000
Size (mean)	126.8962
Patches < minimum patch area	682.0000
Patches < minimum patch area (%)	85.5428
Total edge	4692.4460
Edge density	0.0541
Patch density	0.1292
Total Core Area (ha)	1073.9128
Cority	0.0337
Shape Index (mean)	0.1588
FRAC (mean)	0.5811
MESH (ha)	524.8658

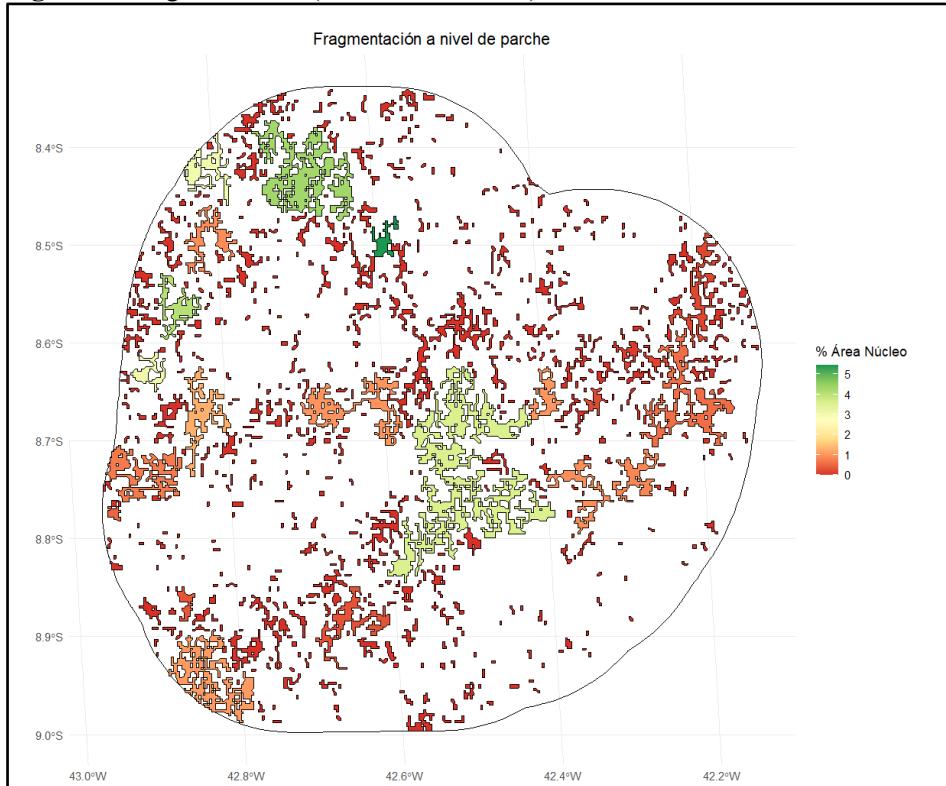
Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Número de parches (683)



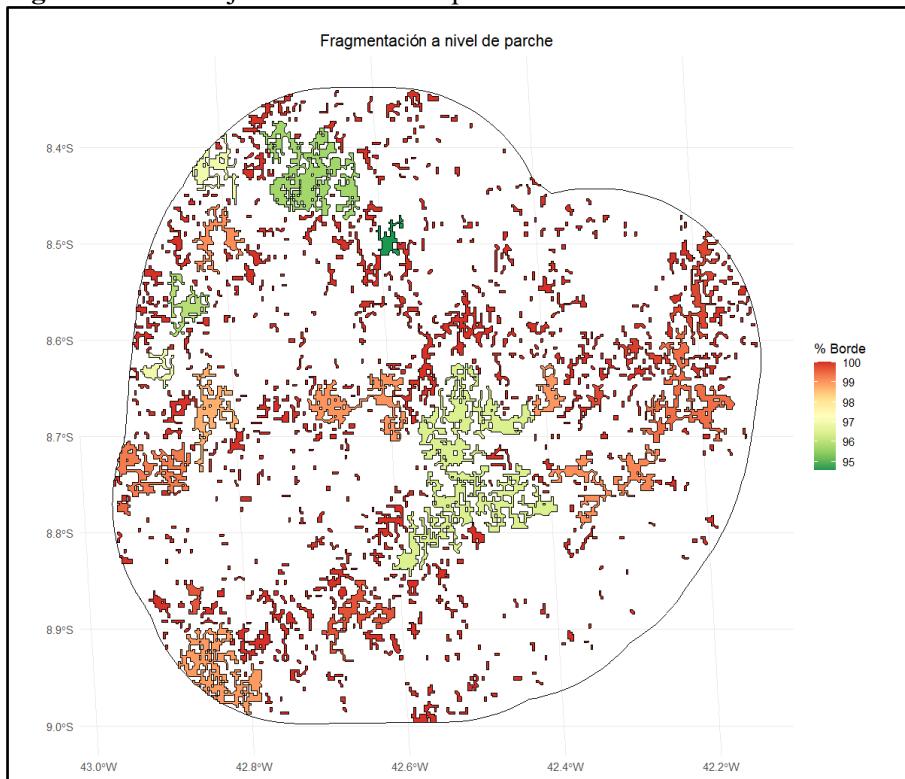
Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Fragmentación (% del área núcleo)



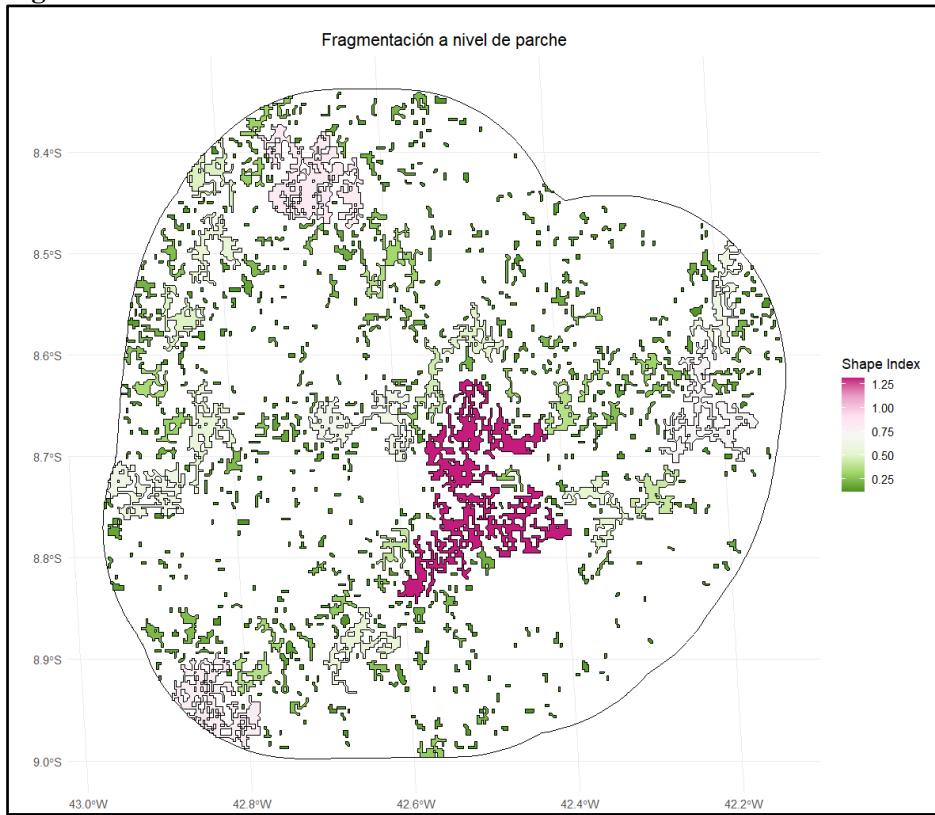
Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Porcentaje del borde de los parches



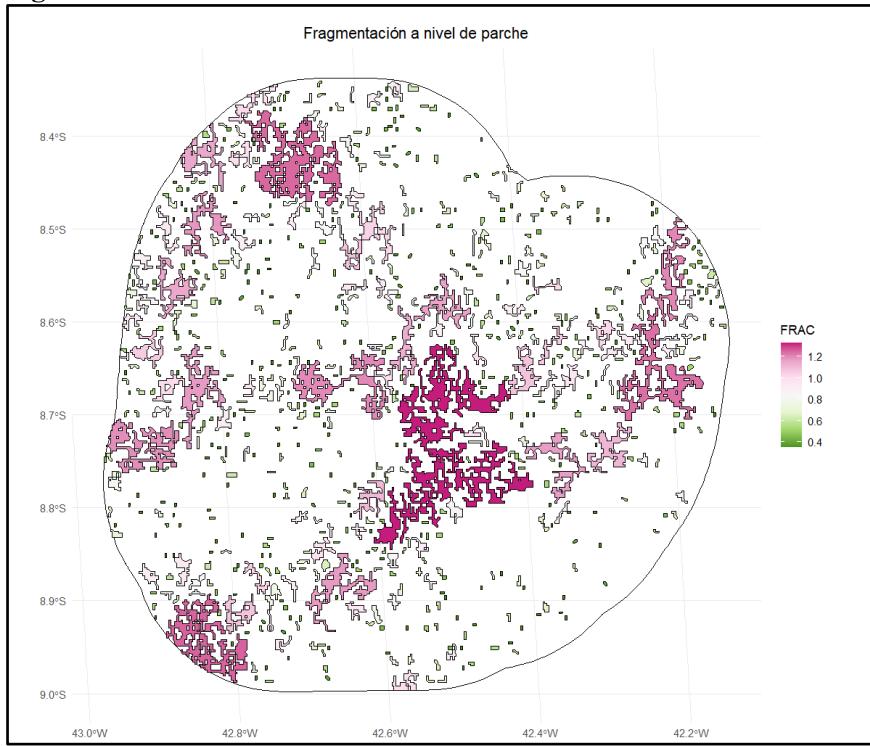
Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Índice de forma



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Índice fractal medio



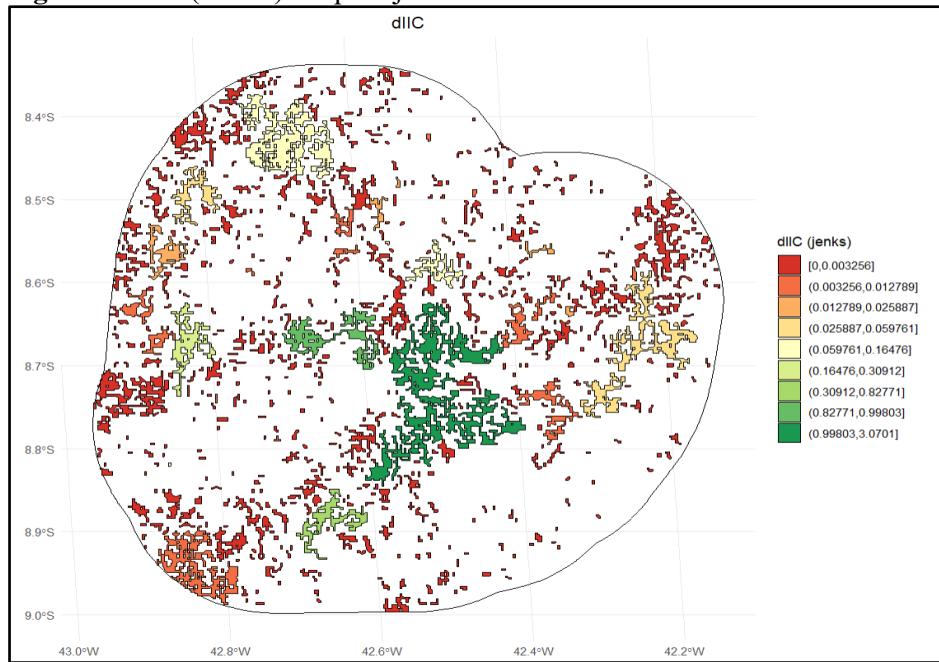
Fuente: Elaboración propia

3.2. Respeto a la conectividad se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Índice conectividad del Parque Nacional da Serra da Capivara

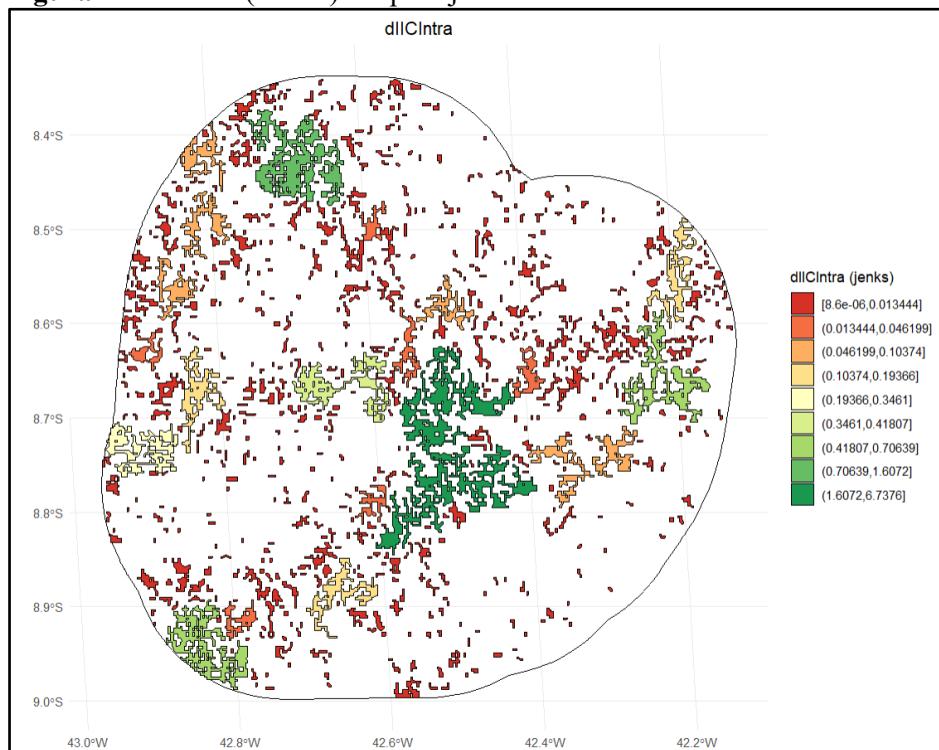
	Index	Value
1	IICnum	1.78×10^9
2	EC(IIC)	4.22×10^4
3	IIC	6.36×10^{-3}

Figura 6. dIIC (fractal) del paisaje



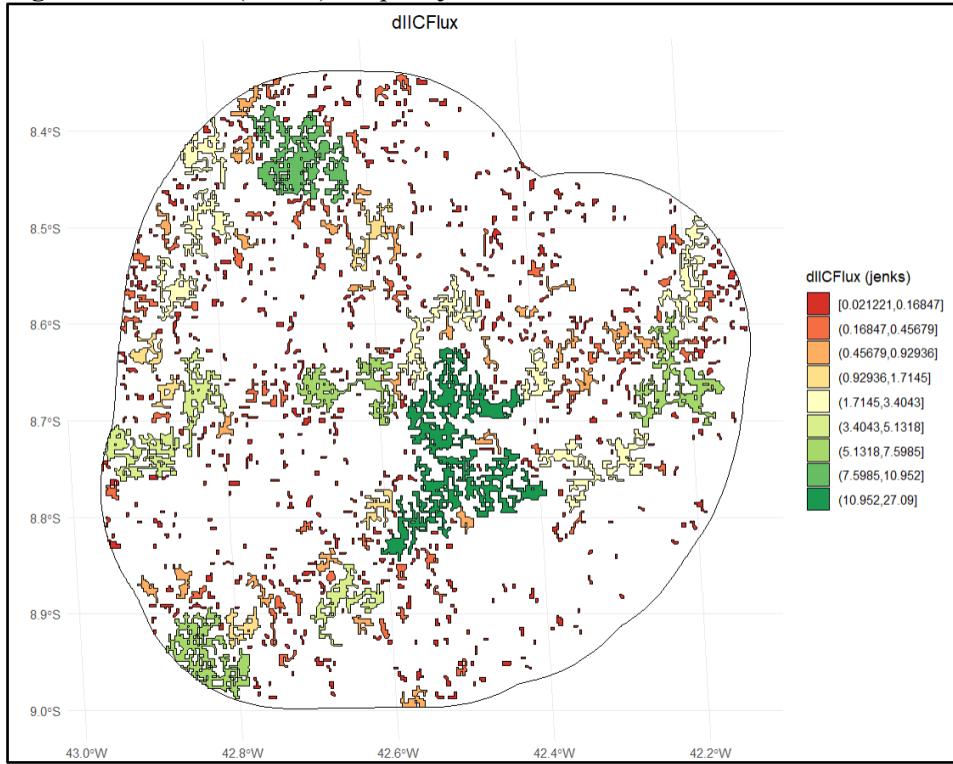
Fuente: Elaboración propia

Figura 7. dIICIntra (fractal) del paisaje



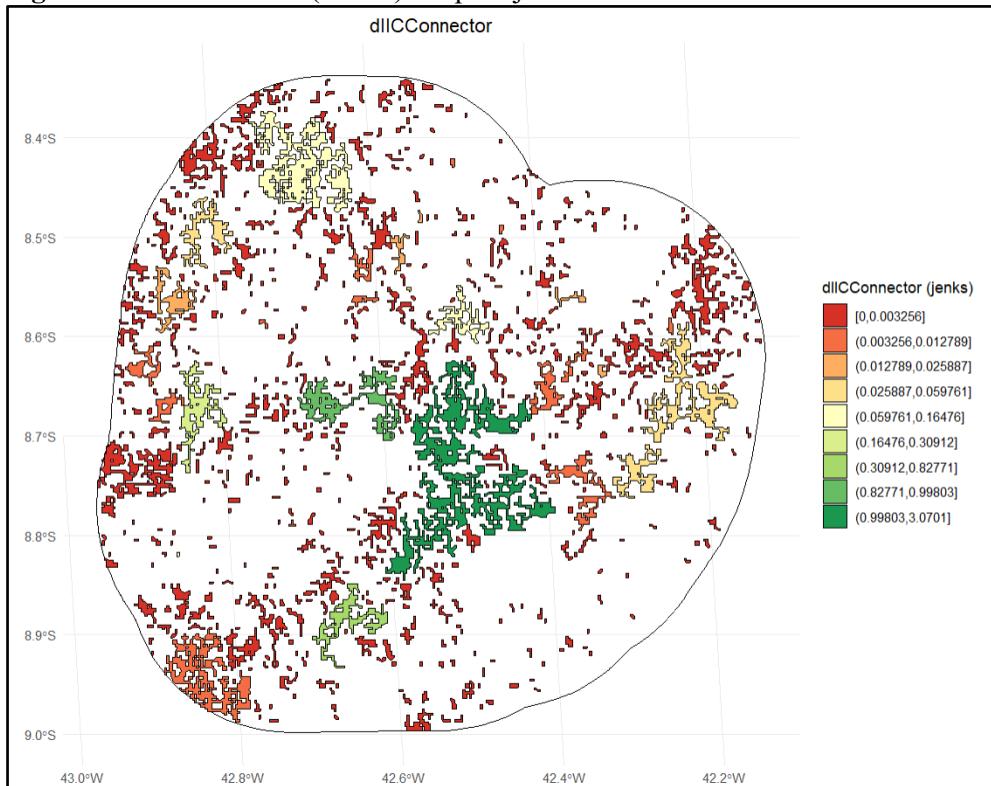
Fuente: Elaboración propia

Figura 8. dIICflux (fractal) del paisaje



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. dIICConnector (fractal) del paisaje



Fuente: Elaboración propia

4. Discusiones:

4.1. Discusión respecto los resultados de la fragmentación en el Parque Nacional da Serra da Capivara

4.1.1. Interpretación ecológica

En seguida se presenta la interpretación ecológica de los resultados de la Tabla 1 y Figuras

Métrica	Valor	Interpretación ecológica
Patch area (ha)	86,670.13	Se muestra la superficie total cubierta por los parches de hábitat en hectáreas. Representa la cantidad total de hábitat disponible . Aunque parece significativa, debe compararse con la extensión total del parque para evaluar su representatividad.
Number of patches	683	Hay 683 fragmentos de hábitat, lo que sugiere un paisaje altamente fragmentado .
Size (mean)	126.90 ha	El tamaño promedio de los parches es pequeño, lo que es típico en paisajes fragmentados. Parches pequeños soportan menos biodiversidad y son más vulnerables a efectos de borde.
Patches < minimum patch area	682	Casi todos los parches están por debajo del umbral mínimo definido (por ejemplo, tamaño necesario para sostener poblaciones viables).
Patches < minimum patch area (%)	85.54%	El 85.5% de los parches son demasiado pequeños para ser funcionales, lo que representa un problema para la sostenibilidad ecológica del paisaje.
Total edge	4692.45	Longitud total del borde de los parches. Un borde alto indica alta fragmentación y mayor exposición a efectos de borde (como luz, viento, especies invasoras).
Edge density	0.0541	Longitud de borde por unidad de área. Confirma que los parches tienen formas irregulares y expuestas , lo cual reduce la calidad del hábitat interior.
Patch density	0.1292	Relación de parches por hectárea. Una densidad alta indica paisaje altamente fragmentado .
Total Core Area (ha)	1073.91	Área interior o núcleo sin efectos de borde. Solo una pequeña fracción del área total (86,670 ha), lo que implica poca área funcional de hábitat real .
Cority	0.0337	Índice que combina conectividad y área núcleo. Valor bajo indica baja funcionalidad ecológica del paisaje.
Shape Index (mean)	0.1588	Mide complejidad de la forma de los parches. Valores bajos indican formas simples (cercañas a círculos), pero no necesariamente ecológicamente funcionales si son pequeños.

FRAC (mean)	0.5811	Índice fractal medio, cuanto más cerca de 1 (ver Figura 5), más complejas e irregulares son las formas. Un valor medio indica formas intermedias en complejidad.
MESH (ha)	524.87	Área efectiva promedio de parches sin fragmentación. Es decir, en promedio, los fragmentos funcionales tienen unos 525 ha , lo cual también es bajo para especies con requerimientos de grandes áreas.

Todos los resultados de las métricas del Parque Nacional da Serra da Capivara revelan un **alto grado de fragmentación ecológica**, con profundas implicaciones para la biodiversidad y la funcionalidad del ecosistema:

- Con **683 parches identificados** (ver Figura 1) y un **promedio de 126.9 ha por parche**, el paisaje presenta una gran cantidad de fragmentos pequeños y dispersos.
- **Más del 85% de los parches están por debajo del umbral mínimo de viabilidad ecológica**, lo que significa que difícilmente pueden sostener poblaciones saludables de fauna o flora de manera independiente.
- La **baja proporción de área núcleo** (apenas 1,073.9 ha, o el 3.37% del total, ver Figura 2) y el **elevado efecto de borde** (0.0541, ver Figura 3) indican que la mayoría de los hábitats están expuestos a condiciones ambientales externas que afectan su estabilidad.
- El valor bajo de **MESH (524.87 ha)** y de **cority (0.0337)** sugiere una **muy baja conectividad** entre fragmentos, lo que impide la movilidad de especies y aumenta el aislamiento poblacional.

4.1.2. Relación con la literatura científica

Los resultados obtenidos para el Parque Nacional da Serra da Capivara coinciden con múltiples estudios que han documentado las consecuencias negativas de la **fragmentación del hábitat** en paisajes tropicales secos y semiáridos.

Según **Fahrig (2003, 2017)**, la fragmentación no solo reduce el área total de hábitat disponible, sino que también afecta la **conectividad**, incrementa los **efectos de borde** y reduce la **calidad del hábitat**, lo que en conjunto incrementa el riesgo de extinción local y regional. En el caso del parque, la gran cantidad de parches pequeños y aislados, con bajo valor de MESH y cority, refleja una configuración de paisaje altamente vulnerable, como la descrita por **Ewers & Didham (2006)** en ecosistemas fragmentados.

La baja proporción de área núcleo observada también es consistente con los efectos descritos por **Laurance et al. (2011)**, quienes mostraron que fragmentos expuestos a condiciones de borde (temperaturas más altas, menor humedad, mayor exposición a especies invasoras) sufren cambios en su estructura ecológica y pierden biodiversidad a mayor ritmo que los hábitats continuos. En este sentido, **Haddad et al. (2015)** demostraron que los efectos negativos de la fragmentación pueden persistir durante décadas, incluso si el hábitat total se mantiene constante, debido a la **alteración del patrón espacial** y el aislamiento entre parches.

Además, el bajo valor de conectividad estructural observado en el índice IIC y sus componentes (especialmente dIICConnector y dIICFlux) refleja una red ecológica débilmente conectada, lo que impide el **flujo génico** y el **movimiento efectivo de especies**, como han documentado **Saura & Pascual-Hortal (2007)**. Esta situación es especialmente crítica en regiones con baja resiliencia climática, como los bosques secos tropicales del noreste brasileño, que ya enfrentan presiones por la desertificación y el cambio climático (**Miles et al., 2006**).

Finalmente, estudios en áreas protegidas latinoamericanas (**DeFries et al., 2005; Jenkins et al., 2015**) advierten que los **límites formales de protección no garantizan la integridad ecológica interna** si no se considera la conectividad a nivel de paisaje. En este caso, los

resultados evidencian que, pese a su estatus como parque nacional, el área de estudio sufre procesos severos de fragmentación que deben ser abordados mediante estrategias de conservación de corredores y restauración ecológica.

4.1.3. Comparación con estudios previos

Estudios previos en áreas semiáridas y tropicales de Brasil han reportado patrones similares de fragmentación del paisaje, caracterizados por una alta densidad de parches pequeños y un bajo porcentaje de área núcleo (**Silva et al., 2017**). No obstante, son escasos los trabajos que han cuantificado esta fragmentación con un nivel de detalle comparable al del presente estudio, especialmente en la región del estado de Piauí.

En la ecorregión de la **Caatinga**, a la cual pertenece el Parque Nacional da Serra da Capivara, la pérdida y fragmentación del hábitat han sido impulsadas principalmente por la **expansión agropecuaria**, actividades extractivas y el **uso recurrente del fuego** (**Leal et al., 2005**). En este contexto, los resultados obtenidos no solo coinciden con los patrones previamente documentados para ecosistemas secos del noreste brasileño, sino que también **refuerzan la urgencia de implementar estrategias integradas de conservación y restauración ecológica** en esta región, que además de su relevancia biológica, posee un extraordinario valor arqueológico y cultural.

4.1.4. Limitaciones del análisis

A pesar de la solidez metodológica y la utilidad de los indicadores utilizados, el análisis presenta algunas **limitaciones relevantes** que deben considerarse al interpretar los resultados:

- **Resolución espacial:** Las métricas calculadas dependen en gran medida de la resolución del mapa de cobertura del suelo. Una resolución demasiado gruesa puede subestimar la presencia de parches pequeños o sobreestimar su conectividad, generando sesgos en la evaluación de la fragmentación.
- **Conectividad estructural, no funcional:** El análisis se centró exclusivamente en la **conectividad estructural**, basada en características geométricas del paisaje (distancia, tamaño, configuración), sin incorporar datos sobre el comportamiento, movilidad o capacidad de dispersión de especies. Esta omisión limita la interpretación ecológica, ya que la **conectividad funcional** puede diferir significativamente, especialmente en paisajes heterogéneos o bajo presión antropogénica.
- **Ausencia de datos de biodiversidad:** No se incluyeron datos sobre la presencia, distribución o abundancia de especies, lo que impide establecer inferencias directas sobre cómo la fragmentación está afectando a comunidades biológicas específicas o al estado de conservación de especies clave.
- **Definición arbitraria del umbral mínimo de parche:** Si bien se estableció un valor mínimo para definir qué constituye un parche, este umbral es en cierta medida arbitrario y puede no ser ecológicamente relevante para todos los grupos taxonómicos. La percepción del hábitat varía entre aves, mamíferos, insectos u otros organismos, por lo que la interpretación debe adaptarse al grupo de estudio específico.

4.1.5. Posibles mejoras

Con el fin de superar las limitaciones identificadas y enriquecer futuros estudios sobre la conectividad y fragmentación del paisaje, se proponen las siguientes mejoras metodológicas:

- **Integrar modelos de conectividad funcional:** Incorporar el comportamiento de dispersión de especies focales mediante el uso de modelos basados en resistencia del paisaje o en teoría de circuitos (*Circuit Theory*), como los desarrollados por **McRae et al. (2008)**. Estos enfoques permiten estimar rutas de movimiento más realistas, considerando la matriz del paisaje y sus barreras.
- **Añadir variables ecológicas clave:** Incluir información complementaria como cobertura del dosel, presencia de cuerpos de agua, altitud, calidad del hábitat o tipos de vegetación. Estas variables permiten afinar el análisis y aproximarse más a las condiciones ecológicas reales que afectan a las especies.

- **Utilizar sensores remotos de alta resolución y monitoreo temporal:** Emplear imágenes satelitales o sensores remotos con mayor resolución espacial y temporal para detectar cambios dinámicos en el paisaje, evaluar procesos de pérdida o regeneración del hábitat, y actualizar constantemente las métricas de conectividad.
- **Simular escenarios de restauración ecológica:** Evaluar escenarios hipotéticos de restauración, reforestación o establecimiento de corredores biológicos, para analizar cómo estas acciones podrían mejorar indicadores como el dIIC, MESH u otros índices de conectividad estructural y funcional.
- **Cruzar con datos de biodiversidad:** Integrar registros biológicos (presencia, distribución o abundancia de fauna y flora) con las métricas espaciales, a fin de identificar áreas prioritarias para la conservación de especies endémicas, amenazadas o de interés ecológico.

4.2. Respeto a la conectividad se obtuvieron los siguientes resultados:

4.2.1. Interpretación ecológica

a) IIC de la Tabla 2

El índice integral de conectividad (IIC) utilizado en este estudio se presenta en su forma **normalizada**, con valores que oscilan entre **0** y **1**, donde **1** representa un escenario de conectividad perfecta (todos los parches están completamente conectados) y **0** indica una total desconexión del paisaje.

En el caso del Parque Nacional da Serra da Capivara, el valor obtenido fue **0.00636**, lo que refleja un nivel de conectividad **extremadamente bajo**. Este resultado sugiere que la **gran mayoría de los parches se encuentran aislados o muy distantes entre sí**, lo que **limita severamente la posibilidad de movimiento de especies**, la dispersión natural y el **flujo génico** entre poblaciones. Tal grado de desconexión pone en riesgo la viabilidad ecológica a largo plazo de las comunidades biológicas presentes, especialmente aquellas con baja capacidad de dispersión o con requerimientos de hábitat específicos.

b) dIIC de la Figura 6

La representación espacial del índice dIIC revela una distribución desigual en la importancia de los parches dentro del paisaje.

- **Los parches verdes**, ubicados principalmente en la **zona central del área de estudio**, cumplen un rol **estratégico** para mantener la conectividad ecológica. Su eliminación implicaría una pérdida significativa en la conectividad global del sistema, al interrumpir rutas clave de dispersión y conexión funcional entre fragmentos.
- En contraste, **los parches rojos** presentan una **influencia muy baja** sobre la conectividad general. Esto puede deberse a que están **excesivamente aislados, fragmentados** o cumplen funciones **redundantes**, es decir, su contribución al flujo ecológico podría estar siendo reemplazada por otros parches cercanos.

En conjunto, estos resultados sugieren que la conectividad del paisaje **depende de manera desproporcionada de una zona núcleo central**, lo que implica una **alta vulnerabilidad estructural**. Cualquier alteración en estos parches clave podría desencadenar una fragmentación severa del sistema, afectando tanto la biodiversidad como los procesos ecológicos esenciales.

c) dIICIntra de la Figura 7

Este indicador refleja no solo el tamaño del parche, sino también su **estructura interna** y su potencial para sostener poblaciones estables en ausencia de conectividad externa.

- **Valores altos (representados en verde)** corresponden a **parches grandes y bien estructurados internamente**, con menor influencia de borde y mayor proporción de área núcleo. Estos fragmentos ofrecen condiciones más estables, funcionales y continuas, por lo que son más adecuados como **hábitats viables para poblaciones locales**.
- **Valores bajos (representados en rojo)** indican **parches pequeños o internamente fragmentados**, cuya capacidad para sostener biodiversidad es limitada. Estos parches

pueden sufrir con mayor intensidad los efectos de borde, la desecación, la presión antrópica o la invasión de especies oportunistas.

Desde una perspectiva ecológica, el **dIIICIntra** actúa como un indicador de calidad del hábitat. Parches con alto valor favorecen la **persistencia local** de especies, mientras que aquellos con valores bajos podrían **funcionar como trampas ecológicas**, es decir, áreas que parecen adecuadas, pero no ofrecen las condiciones necesarias para la supervivencia a largo plazo.

d) dIIICFlux de la Figura 8

Este indicador estima qué tan importantes son los fragmentos como **fuentes o receptores de conectividad funcional**, teniendo en cuenta tanto su tamaño como su posición relativa respecto a otros parches.

- **Valores altos (representados en verde)** identifican parches que tienen un **alto potencial de intercambio de organismos**, como el movimiento de animales, dispersión de semillas o flujo genético. Estos parches suelen estar bien conectados espacialmente y cumplir funciones similares a **corredores biológicos o nodos centrales** dentro de la red ecológica.
- **Valores bajos (representados en rojo)** corresponden a parches **aislados o periféricos**, que tienen **poca influencia en la conectividad funcional** del paisaje. Su desconexión limita su contribución ecológica más allá de su propia área interna.

Desde una perspectiva de conservación, los parches con alto valor de **dIIICFlux** cumplen un rol ecológico clave como **corredores funcionales o puntos de tránsito** para diversas especies. Por tanto, su **protección y manejo adecuado puede mejorar significativamente la conectividad funcional y ecológica** del sistema, favoreciendo la dispersión, el flujo genético y la resiliencia frente a disturbios.

e) dIICConnector de la Figura 9

Específicamente, mide en qué medida un parche permite la conexión entre otros fragmentos que, de lo contrario, quedarían **aislados**. Se trata de un indicador crucial para identificar "puentes ecológicos" dentro del sistema.

- **Valores altos (representados en verde)** indican parches que cumplen una función esencial como **nodos de enlace** entre otras áreas del paisaje. Su presencia garantiza la continuidad del flujo funcional entre fragmentos distantes, por lo que su eliminación puede interrumpir conexiones críticas.
- **Valores bajos (representados en rojo)** corresponden a parches cuya presencia **no modifica significativamente** la conectividad entre otras áreas. Aunque pueden tener importancia local, su rol como conectores dentro de la red es limitado.

Desde una perspectiva ecológica y de gestión, los parches con alto **dIICConnector** son fundamentales para **mantener la integridad de la red de conectividad**. Su pérdida podría **fragmentar severamente el paisaje**, generando **cuellos de botella ecológicos** y restringiendo el movimiento de especies. Por esta razón, estos parches deben ser considerados **prioritarios en estrategias de restauración ecológica y conservación territorial**, ya que su protección puede tener un efecto desproporcionado en la funcionalidad del ecosistema.

4.2.2. Relación con la literatura científica

a) IIC (Índice Integral de Conectividad)

El índice integral de conectividad (**IIC**) se presenta en su forma normalizada, oscilando entre 0 (paisaje completamente desconectado) y 1 (conectividad perfecta, todos los parches interconectados) (Pascual-Hortal & Saura, 2006). En el caso del **Parque Nacional da Serra da Capivara**, el valor obtenido (0.00636) refleja una **conectividad estructural extremadamente baja**, lo que indica una fuerte fragmentación del paisaje.

Este nivel de desconexión sugiere que la mayoría de los parches se encuentran **aislados o muy distantes**, limitando la **dispersión de especies, el flujo genético y la viabilidad a largo plazo de las poblaciones** (Fahrig, 2003; Saura & Rubio, 2010). Especialmente en ecosistemas secos

como la Caatinga, estos procesos son críticos para la **resiliencia ecológica** y la conservación de especies con baja capacidad de desplazamiento (Silva et al., 2017).

b) dIIC (Contribución total por parche a la conectividad)

La distribución espacial del **dIIC** muestra la **importancia desigual de los parches** en la conectividad del paisaje. Como ya lo señalaron Saura y Rubio (2010), este componente permite priorizar fragmentos cuya pérdida tendría impactos desproporcionados en la cohesión del sistema.

- Los **parches verdes** en la zona central actúan como **nodos críticos** para la conectividad, cuya pérdida implicaría la interrupción de rutas de dispersión clave (Urban & Keitt, 2001).
- En cambio, los **parches rojos** tienen baja influencia estructural. Su aislamiento o función redundante limita su relevancia ecológica en el contexto de conectividad (Minor & Urban, 2008).

Este patrón sugiere una **alta dependencia funcional de una zona núcleo**, lo cual es característico de **redes ecológicas vulnerables** (Bodin & Norberg, 2007).

c) dIICIntra (Cohesión interna de los parches)

El componente **dIICIntra** mide la **cohesión interna del parche**, es decir, su tamaño efectivo, continuidad espacial y proporción de núcleo sin influencia de borde. Parches con valores altos tienen **mejores condiciones de hábitat**, favoreciendo la persistencia de especies (Laurance et al., 2011; Andrén, 1994).

- Parches grandes y continuos (**valores altos**) son más resistentes a efectos de borde y estrés ambiental (Murcia, 1995), funcionando como **hábitats viables y estables**.
- Por el contrario, parches pequeños o internamente fragmentados pueden convertirse en **trampas ecológicas**, aparentando ser hábitats adecuados, pero careciendo de condiciones para sostener poblaciones (Schlaepfer et al., 2002).

Así, el **dIICIntra** actúa como un **indicador indirecto de calidad del hábitat**, crucial para definir prioridades de conservación en paisajes fragmentados.

d) dIICFlux (Flujo funcional entre parches)

El **dIICFlux** evalúa el **potencial de cada parche para facilitar el movimiento de organismos hacia otros parches**. Esta métrica se alinea con el concepto de **conectividad funcional**, ya que considera tanto el tamaño del parche como su accesibilidad para otras áreas (Saura & Rubio, 2010).

- Los parches con **valores altos** (verdes) funcionan como **fuentes o nodos de paso** para el movimiento de especies, y son estratégicos como **corredores biológicos** (McRae et al., 2008; Hilty et al., 2020).
- Parches con **valores bajos** (rojos) son periféricos o están tan aislados que **no contribuyen significativamente al flujo funcional**.

La conservación de parches con alto dIICFlux puede mejorar la **permeabilidad del paisaje**, aumentando la **resiliencia ecológica ante perturbaciones** y facilitando la adaptación al cambio climático (Taylor et al., 1993).

e) dIICConnector (Función como puente ecológico)

El componente **dIICConnector** mide la **importancia de un parche como vínculo entre otros fragmentos desconectados**, permitiendo identificar "**puentes ecológicos**" que mantienen la integridad de la red (Pascual-Hortal & Saura, 2006).

- **Valores altos** (verdes) indican parches cuya presencia es **crítica para conectar áreas** que, sin ellos, estarían aisladas. Su pérdida genera **cuellos de botella** en la red ecológica (Bodin & Norberg, 2007).
- **Valores bajos** (rojos) corresponden a parches que no desempeñan un papel importante como conectores.

La identificación de estos puentes ecológicos es fundamental para establecer **estrategias de restauración** como corredores o nodos de reconexión (Hilty et al., 2020; Saura & Torné,

2009). Su conservación puede tener un **efecto desproporcionado** sobre la conectividad funcional del ecosistema.

4.2.3. Comparación con estudios previos

a) IIC – Conectividad estructural total (Valor observado: 0.00636)

El valor extremadamente bajo del índice de conectividad estructural (**IIC**) obtenido en el Parque Nacional da Serra da Capivara es consistente con casos documentados en otros ecosistemas fragmentados. Por ejemplo, Antongiovanni (2022) utilizó el índice de probabilidad de conectividad (PC), similar al IIC, para evaluar la conectividad interna en la Caatinga, y encontró que las cuencas con poca vegetación nativa presentan una conectividad funcional escasa y baja resiliencia paisajística.

b) dIIC – Importancia espacial desigual de los parches

La desigual contribución de los parches a la conectividad, con unos pocos elementos estratégicos versus la mayoría aislada, coincide con hallazgos en otros estudios. En la Caatinga, la pérdida de cobertura forestal y su estructura fragmentada han sido documentadas como factores que generan redes ecológicas altamente dependientes de nodos clave (Ribeiro et al., 2015; Santos & Tabarelli, 2002). Esta dinámica resuena con tu resultado de una fuerte dependencia en una “zona núcleo central”.

c) dIICIntra – Calidad interna del hábitat

El rol de parches grandes y bien estructurados como hábitats más estables es respaldado por la literatura. La conectividad interna es crucial para reducir efectos de borde y asegurar la viabilidad poblacional (Laurance et al., 2011; Murcia, 1995), y fragmentos con baja calidad interna pueden comportarse como trampas ecológicas —fenómeno observado ampliamente en paisajes tropicales fragmentados.

d) dIICFlux – Flujo funcional

Los fragmentos identificados como corredores funcionales coinciden con estudios que resaltan el papel de estructuras de conexión (como “stepping stones”) en mantener el flujo ecológico. En la Caatinga, Estradas y Bodin (2008) subrayan cómo ciertos parches actúan como nodos de paso esenciales, incluso cuando la matriz es altamente modificada.

e) dIICConnector – Parches como puentes ecológicos

Tu identificación de parches críticos como puentes ecológicos está respaldada en el uso de dIICConnector en estudios aplicados. Por ejemplo, Saura y Rubio (2010) definieron claramente esta función estructural al analizar redes de conectividad y la vulnerabilidad a cuellos de botella. Asimismo, Hilty et al. (2020) enfatizan la necesidad de preservar estos conectores para restablecer paisajes funcionales, incluso en contextos con escasa cobertura forestal.

4.2.4. Limitaciones del análisis

- **Basado en conectividad estructural:** No considera el comportamiento específico de las especies (capacidad de dispersión, uso del hábitat, etc.).
- **Sin considerar barreras reales:** El análisis es espacialmente explícito, pero no incluye carreteras, ríos, cercas, etc., que pueden actuar como barreras al movimiento.
- **Resolución espacial fija:** La calidad de los resultados depende del tamaño del píxel o unidad espacial usada.
- **Ausencia de dinámica temporal:** No se evalúa cómo ha cambiado la conectividad en el tiempo.

4.2.5. Posibles mejoras

- **Incorporar conectividad funcional:** Integrar datos de especies focales con capacidades de movimiento diferentes (e.g. mamíferos vs. aves).
- **Simulación de dispersión:** Usar modelos como Circuitscape o modelos basados en agentes.
- **Integrar mapas de uso del suelo:** Para mejorar la interpretación del valor de conectividad.
- **Análisis temporal:** Comparar conectividad entre años para evaluar el impacto del cambio de uso del suelo.

5. Conclusiones:

5.1 El análisis de métricas del paisaje del Parque Nacional da Serra da Capivara revela un **alto grado de fragmentación ecológica**, con la mayoría de los parches demasiado pequeños, aislados y con formas irregulares que intensifican los efectos de borde. A pesar de que la superficie total de hábitat parece significativa (86,670 ha), **la funcionalidad ecológica real es limitada**, con una área núcleo extremadamente reducida y baja conectividad (según valores de MESH y Cority).

Esto implica que el parque, aunque nominalmente protegido, **no garantiza condiciones adecuadas para la conservación de largo plazo de muchas especies**, especialmente aquellas sensibles a la fragmentación o con altos requerimientos de espacio. Por tanto, se requieren **intervenciones urgentes de restauración ecológica, reconexión de fragmentos clave y manejo de bordes** para asegurar la viabilidad del ecosistema y su biodiversidad asociada.

Asimismo, estos resultados son consistentes con las publicaciones citadas en el ítem 4.1.2 y 4.1.3.

5.2. El análisis integral del índice IIC y sus componentes derivados (dIIC, dIICIntra, dIICFlux y dIICConnector) en el Parque Nacional da Serra da Capivara revela una preocupante fragilidad ecológica del paisaje. La conectividad estructural y funcional es extremadamente baja ($IIC = 0.00636$), con una clara dependencia de unos pocos parches estratégicos ubicados en la zona central del área. Estos parches no solo sostienen la conectividad general del paisaje (dIIC), sino que también destacan por su calidad de hábitat (dIICIntra), su capacidad para facilitar el movimiento de organismos (dIICFlux), y su rol clave como enlaces entre fragmentos desconectados (dIICConnector).

La mayoría de los fragmentos, sin embargo, son pequeños, aislados, y poco funcionales, lo que indica una estructura espacial altamente fragmentada y vulnerable a perturbaciones. La pérdida de los parches más importantes podría generar efectos en cascada que comprometerían la biodiversidad, el flujo génico y la resiliencia del sistema ecológico.

Estos resultados subrayan la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación focalizadas, como la protección de nodos clave, la restauración de conectores ecológicos y el aumento del área núcleo efectiva de los parches prioritarios. La planificación basada en conectividad se consolida, así como una herramienta esencial para garantizar la sostenibilidad ecológica de este ecosistema altamente amenazado.

Asimismo, estos resultados son consistentes con las publicaciones citadas en el ítem 4.2.2 y 4.2.3.

6. Material anexo:

```
library(Makurhini)
library(sf)
```

```
parches_habitats <-
read_sf("E:/Ketty/KM/Conectividad/Curso_de_conectividad_2025/Tareas/Trabajo
final/Trabajo_final/Final2/Bosque_Caatinga.shp")
nrow(parches_habitats)
paisaje <- read_sf("E:/Ketty/KM/Conectividad/Curso_de_conectividad_2025/Tareas/Trabajo
final/Trabajo_final/Final2/Paisaje_Estudio.shp")
```

```
install.packages("ggplot2", dependencies = TRUE)
install.packages("RColorBrewer", dependencies = TRUE)
```

```
library(ggplot2)
library(RColorBrewer)
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = parches_habitats, aes(color = "Patches"), fill = "forestgreen", linewidth = 0.5) +
  scale_color_manual(name = "", values = "black")+
  theme_minimal() +
  theme(axis.title.x = element_blank(),
        axis.title.y = element_blank())
```

```
#Fragmentacion
```

```
area_paisaje <- st_area(paisaje)
area_paisaje <- unit_convert(area_paisaje, "m2", "ha")
```

```
Fragmentacion <- MK_Fragmentation(nodes = parches_habitats,
                                     edge_distance = 500,
                                     min_node_area = 10000,
                                     landscape_area = area_paisaje,
                                     area_unit = "ha",
                                     perimeter_unit = "km",
                                     plot = TRUE)
```

```
Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`
```

```
#%nucleo
```

```
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = CAPercent), color =
"black", size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = 1,
    name = "% Área Núcleo"
  ) +
  theme_minimal()
```

```

labs(
  title = "Fragmentación a nivel de parche",
  fill = "% Área Núcleo"
) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

#% borde

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = EdgePercent), color =
"black", size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "% Borde"
) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "% Borde"
) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

```

#Perimetro

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = Perimeter), color =
"black", size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "Perímetro"
) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "Perímetro"
) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

```

#Perimetro-area radio

```
ggplot() +
```

```

geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = PARA), color = "black",
  size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "PARA"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "PARA"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

#shape-index

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = ShapeIndex), color =
  "black", size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "PiYG",
    direction = -1,
    name = "Shape Index"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "Shape Index"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

#Fractal dimension index

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Fragmentacion$`Patch statistics shapefile`, aes(fill = FRAC), color = "black",
  size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "PiYG",
    direction = -1,
    name = "FRAC"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Fragmentación a nivel de parche",
    fill = "FRAC"
  )

```

```

) +
theme(
  legend.position = "right",
  plot.title = element_text(hjust = 0.5)
)

#Estadísticos a nivel de paisaje

class(Fragmentacion)
#> [1] "list"
Fragmentacion$`Summary landscape metrics (Viewer Panel)`

mesh <- as.data.frame(Fragmentacion[[1]])
mesh <- mesh[13,2]
mesh_porcentage <- (area_paisaje - mesh) * 100 / area_paisaje
mesh_porcentage
#> [1] 99.90074

#loops distintas distancias

#Loop edge distance
library(purrr)
Fragmentacion.2 <- map_dfr(seq(100, 1000, 100), function(x){
  x.1 <- MK_Fragmentation(nodes = parches_habitats,
                            edge_distance = x, plot = FALSE)[[2]]
  CA <- mean(x.1$CAPercent)
  Edge <- mean(x.1$EdgePercent)
  x.2 <- rbind(data.frame('Edge distance' = x, Type = "Core Area", Percentage = CA),
                data.frame('Edge distance' = x, Type = "Edge", Percentage = Edge))
  return(x.2)
}, .progress = TRUE)

library(ggplot2)
ggplot(Fragmentacion.2, aes(x=Edge.distance, y=Percentage, group=Type)) +
  geom_line(aes(color=Type))+
  geom_point(aes(color=Type))+ ylim(0,100)+ 
  scale_x_continuous("Distancia", labels = as.character(Fragmentacion.2$Edge.distance), breaks
= Fragmentacion.2$Edge.distance)+ 
  scale_color_brewer(palette="Dark2")+
  theme_classic()

#Grid 40 km2

Grid_test <- make_grid(x = paisaje, hexagonal = FALSE,
                       cell_area = unit_convert(40, "km2", "m2"),
                       clip = TRUE)
plot(Grid_test)

#loop grid mesh

```

```

#Variable dummy
Grid_test$MESH <- 0

for(i in 1:nrow(Grid_test)){
  cat(paste0(i, " de ", nrow(Grid_test), "\r"))
  grid.i <- Grid_test[i,]
  nodes.i <- suppressWarnings(st_intersection(parches_habitats, grid.i))

  if(nrow(nodes.i) > 0){
    area_paisaje.i <- st_area(grid.i)
    area_paisaje.i <- unit_convert(area_paisaje.i, "m2", "ha")
    Fragmentacion.i <- MK_Fragmentation(nodes = nodes.i,
                                           edge_distance = 500,
                                           min_node_area = 1000,
                                           landscape_area = area_paisaje.i,
                                           area_unit = "ha",
                                           perimeter_unit = "km",
                                           plot = FALSE)
    mesh <- as.data.frame(Fragmentacion.i[[1]])
    mesh <- mesh[13,2]
    mesh_porcentage <- (area_paisaje.i - mesh)*100/area_paisaje.i
    Grid_test$MESH[i] <- mesh_porcentage
  } else {
    Grid_test$MESH[i] <- 100
  }
}

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = Grid_test, aes(fill = MESH), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_distiller(
    palette = "RdYlGn",
    direction = -1,
    name = "% Fragmentación"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "GRID fragmentación (MESH)",
    fill = "% Fragmentación"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

#Centralidad

```

library(ggplot2)
library(sf)

```

```

library(Makurhini)
library(RColorBrewer)

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, aes(color = "Study area"), fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = parches_habitats, aes(color = "Parches"), fill = "forestgreen", linewidth = 0.5) +
  scale_color_manual(name = "", values = "black")+
  theme_minimal() +
  theme(axis.title.x = element_blank(),
        axis.title.y = element_blank())

library(Makurhini)
library(sf)
data("parches_habitats", package = "Makurhini")
nrow(parches_habitats) # Number of patches
#> [1] 683
#Two distance threshold,
centrality_test <- MK_RMCentrality(nodes = habitat_nodes,
                                      distance = list(type = "centroid"),
                                      distance_thresholds = 1000,
                                      probability = 0.5,
                                      write = NULL)

install.packages("ClassInt", dependencies = TRUE)
install.packages("dplyr", dependencies = TRUE)

library(classInt)
library(dplyr)
#>
#> Adjuntando el paquete: 'dplyr'
#> The following objects are masked from 'package:igraph':
#>
#>   as_data_frame, groups, union
#> The following objects are masked from 'package:stats':
#>
#>   filter, lag
#> The following objects are masked from 'package:base':
#>
#>   intersect, setdiff, setequal, union

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(centrality_test$strength, n = 9, style = "quantile")

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

# Graficar en ggplot2 usando las clases Jenks

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = centrality_test, aes(fill = strength_q), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "Fuerza (Q)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Centralidad a nivel de parche (Strength)",
    fill = "Strength\n(Jenks)"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

#BWC

```

breaks <- classInt::classIntervals(centrality_test$BWC, n = 9, style = "jenks")
centrality_test <- centrality_test %>%
  mutate(BWC_jenks = cut(BWC,
    breaks = breaks$brks,
    include.lowest = TRUE,
    dig.lab = 5))
ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = centrality_test, aes(fill = BWC_jenks), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(palette = "RdYlGn", direction = 1, name = "BWC (Jenks)") +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Centralidad a nivel de parche (BWC)",
    fill = "BWC\n(Jenks)"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

#Randon walk

```

ggplot() +
  geom_sf(data = paisaje, fill = NA, color = "black") +
  geom_sf(data = centrality_test, aes(fill = as.factor(memb.rw)), color = "black", size = 0.1) +
  scale_fill_brewer(
    palette = "Set3",
    name = "Membership RW"
  ) +
  theme_minimal() +
  labs(
    title = "Agrupación de parches (Random walks)",
    fill = "Membership RW"
  ) +
  theme(
    legend.position = "right",
    plot.title = element_text(hjust = 0.5)
  )

```

```
#Distancias
```

```
centrality_test <- MK_RMCentrality(nodes = parches_habitats,
                                     distance = list(type = "centroid"),
                                     distance_thresholds = c(1000, 500),
                                     probability = 0.5,
                                     write = NULL)

plot(centrality_test$d1000["BWC"], breaks = "quantile")
plot(centrality_test$d500["BWC"], breaks = "quantile")
```

```
#5 índice integral de conectividad y Probabilidad de conectividad
```

```
#IIC
```

```
IIC <- MK_dPCIIC(nodes = parches_habitats,
                  attribute = NULL,
                  area_unit = "ha",
                  distance = list(type = "centroid"),
                  LA = NULL,
                  onlyoverall = TRUE,
                  metric = "IIC",
                  distance_thresholds = 10000,
                  intern = TRUE) #10 km

#Index      Value
#1 IICnum 1.778267e+09
#2 EC(IIC) 4.216951e+04
```

```
#Distancia euclidian
```

```
area_paisaje <- st_area(paisaje)
area_paisaje <- unit_convert(area_paisaje, "m2", "ha")

IIC <- MK_dPCIIC(nodes = parches_habitats,
                  attribute = NULL,
                  area_unit = "ha",
                  distance = list(type = "centroid"),
                  LA = area_paisaje,
                  onlyoverall = TRUE,
                  metric = "IIC",
                  distance_thresholds = 10000,
                  intern = TRUE) #10 km
```

```
#IIC
```

```
#> Index      Value
#1 IICnum 1.778267e+09
#2 EC(IIC) 4.216951e+04
```

```
#3 IIC 6.359540e-03
```

```
#Distancia euclidiana: fracciones
```

```
area_paisaje <- st_area(paisaje)
area_paisaje <- unit_convert(area_paisaje, "m2", "ha")
```

```
IIC <- MK_dPCIIC(nodes = parches_habitats,
  attribute = NULL,
  area_unit = "ha",
  distance = list(type = "edge", keep = 0.1),
  LA = area_paisaje,
  onlyoverall = FALSE,
  metric = "IIC",
  distance_thresholds = 10000,
  intern = TRUE) #10 km
```

```
IIC
```

```
#Simple feature collection with 683 features and 8 fields
```

```
#Geometry type: POLYGON
```

```
#Dimension: XY
```

```
#Bounding box: xmin: -4274640 ymin: -1110576 xmax: -4192392 ymax: -1029925
```

```
#Projected CRS: World_Mollweide
```

```
#First 10 features:
```

```
# OBJECTID Shape_Leng Shape_Area    area    dIIC dIICintra dIICflux dIICconnector
#1      2 14167.718 2116605.4 2116605.4 0.3618585 0.0019225 0.3599360 0.000000e+00
#2      6 1597.045 141697.4 141697.4 0.0238901 0.0000086 0.0238815 0.000000e+00
#3      7 4102.866 814760.2 814760.2 0.1247277 0.0002849 0.1244429 0.000000e+00
#4      8 11756.529 2242361.8 2242361.8 0.3488515 0.0021578 0.3466938 0.000000e+00
#5      9 1597.045 141697.4 141697.4 0.0243873 0.0000086 0.0243550 2.369472e-05
#6     10 9986.199 1753505.7 1753505.7 0.2985962 0.0013195 0.2972767 0.000000e+00
#7     12 1597.045 141697.4 141697.4 0.0219404 0.0000086 0.0218079 1.238857e-04
#8     15 5388.069 602214.1 602214.1 0.1023619 0.0001556 0.1022005 5.744175e-06
#9     16 1597.045 141697.4 141697.4 0.0241290 0.0000086 0.0241204 0.000000e+00
#10    17 2505.821 247970.5 247970.5 0.0418077 0.0000264 0.0417813 0.000000e+00
                                geometry
#1 POLYGON ((-4252547 -1030724...
#2 POLYGON ((-4250152 -1031522...
#3 POLYGON ((-4234447 -1031256...
#4 POLYGON ((-4236577 -1029925...
#5 POLYGON ((-4224865 -1037378...
#6 POLYGON ((-4238174 -1031256...
#7 POLYGON ((-4228858 -1034716...
#8 POLYGON ((-4241900 -1032054...
#9 POLYGON ((-4237109 -1030724...
#10 POLYGON ((-4246159 -1029925...
```

```
#Exploremos un plot usando intervalos:
```

```
#dIIC
```

```
library(classInt)
library(dplyr)
#>
```

```

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(IIC$dIIC, n = 9, style = "jenks")

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

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

#dIICconector

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(IIC$dIICconnector, n = 9, style = "jenks")

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

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

```

```

#dIICIntra

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(IIC$dIICintra, n = 9, style = "jenks")

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

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

#dIICflux

# Calcular los intervalos de Jenks para strength
breaks <- classInt::classIntervals(IIC$dIICflux, n = 9, style = "jenks")

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

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

```

7. Referencias bibliográficas

- Andrén, H. (1994). Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*, 71(3), 355–366.
- Bodin, Ö., & Norberg, J. (2007). A network approach for analyzing spatially structured populations in fragmented landscapes. *Landscape Ecology*, 22(1), 31–44.
- Antongiovanni, M., Queiroz, C., & Pardini, R. (2022). *Landscape connectivity in Brazil's Caatinga dry forests is insufficient for long-term conservation*. *Journal of Applied Ecology*, 59(1), 124–135. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14131>
- Bartaburu, X. (2025, julio 16). Antas reaparecem na Caatinga, onde eram tidas como extintas. Notícias ambientais. <https://brasil.mongabay.com/2025/07/antas-reaparecem-na-caatinga-onde-eram-tidas-como-extintas/>
- DeFries, R., Hansen, A., Newton, A. C., & Hansen, M. C. (2005). Increasing isolation of protected areas in tropical forests over the past twenty years. *Ecological Applications*, 15(1), 19–26.
- Estrada, E., & Bodin, Ö. (2008). *Using network centrality measures to manage landscape connectivity*. *Ecological Applications*, 18(7), 1810–1825. <https://doi.org/10.1890/07-1419.1>
- Ewers, R. M., & Didham, R. K. (2006). Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biological Reviews*, 81(1), 117–142.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419
- Fahrig, L. (2017). Ecological responses to habitat fragmentation per se. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 1–23.
- Fischer, J., & Lindenmayer, D. B. (2007). "Landscape modification and habitat fragmentation: A synthesis." *Global Ecology and Biogeography*, 16(3), 271-280. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x
- Haddad, N. M., et al. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052.
- Hanski, I., & Gilpin, M. E. (1997). "Metapopulation biology: Ecology, genetics, and evolution." Academic Press. Enlace al libro
- Hilty, J., Worboys, G. L., Keeley, A. T. H., Woodley, S., Lausche, B., Locke, H., ... & Tabor, G. M. (2020). *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*. IUCN.
- Hilty, J. A., Keeley, A. T. H., Lidicker Jr., W. Z., & Merenlender, A. M. (2020). *Corridor Ecology: Linking Landscapes for Biodiversity Conservation and Climate Adaptation* (2nd ed.). Island Press.
- Jenkins, C. N., Van Houtan, K. S., Pimm, S. L., & Sexton, J. O. (2015). US protected lands mismatch biodiversity priorities. *PNAS*, 112(16), 5081–5086.
- Kindlmann, P., & Burel, F. (2008). Connectivity measures: A review. *Landscape Ecology*, 23(8), 879–890. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9245-4>
- Laurance, W. F., Camargo, J. L. C., Fearnside, P. M., Lovejoy, T. E., Williamson, G. B., Mesquita, R. C. G., ... & Laurance, S. G. W. (2011). The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation*, 144(1), 56–67.
- Leal, I. R., Silva, J. M. C., Tabarelli, M., & Lacher Jr, T. E. (2005). Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of northeastern Brazil. *Conservation Biology*, 19(3), 701-706. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>

- McDonald, R. I., et al. (2018). "The role of connectivity in conservation planning and restoration." *Biological Conservation*, 217, 15-26. DOI: 10.1016/j.biocon.2017.10.019
- 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>
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., ... & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491–505.
- Minor, E. S., & Urban, D. L. (2008). A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conservation Biology*, 22(2), 297–307.
- Murcia, C. (1995). Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 10(2), 58–62. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)88977-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)88977-6)
- Pettorelli, N., et al. (2014). "The influence of climate on the dynamics of populations of endangered species: the case of the Serengeti cheetah." *Journal of Animal Ecology*, 83(3), 646-654. DOI: 10.1111/1365-2656.12161
- 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>
- Santos, A. M. M., & Tabarelli, M. (2002). *Distance from roads and cities as a predictor of habitat loss and fragmentation in the caatinga vegetation of Brazil*. **Biological Conservation**, 97(3), 343–349. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(00\)00124-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](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(00)00124-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. <i>Landscape and Urban Planning</i>, 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., & Torné, J. (2009). Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 24(1), 135–139.
- Silva, J. M. C., Leal, I. R., & Tabarelli, M. (2017). *Caatinga: The largest tropical dry forest region in South America*. Springer.
- Schlaepfer Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 571–573., M. A., Runge, M. C., & Sherman, P. W. (2002). Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(10), 474–480.
- Ribeiro, M. C., Metzger, J. P., Martensen, A. C., Ponzoni, F. J., & Hirota, M. M. (2009). *The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation*. **Biological Conservation**, 142(6), 1141–1153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.02.021>
- Urban, D., & Keitt, T. (2001). Landscape connectivity: A graph-theoretic perspective. *Ecology*, 82(5), 1205–1218. DOI: 10.1890/0012-9658(2001)082[1205:LCAGP]2.0.CO;2