

Introducción

La fragmentación del hábitat, impulsada principalmente por la expansión de actividades humanas, es reconocida como una de las mayores amenazas para la biodiversidad a nivel global. Este proceso no solo reduce la cantidad de hábitat disponible, sino que también aísla a las poblaciones, interrumpiendo procesos ecológicos vitales como la dispersión y el flujo genético. Como resultado, las poblaciones aisladas enfrentan un mayor riesgo de extinción. En este contexto, la conectividad ecológica, que mide cómo el paisaje facilita o impide el movimiento de los organismos, se ha convertido en un pilar fundamental para el diseño de estrategias de conservación efectivas.

El Parque Nacional da Serra da Capivara, ubicado en el bioma de la Caatinga en el noreste de Brasil, representa un enclave de biodiversidad de importancia mundial. Designado como Patrimonio Mundial de la UNESCO, alberga una notable riqueza de fauna, incluyendo casi 300 especies de vertebrados. Entre ellas se encuentran especies clave para la conservación como el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*) y el tatú-bola (*Tolypeutes tricinctus*), este último catalogado como En Peligro. A pesar de su estatus de protección, el hábitat dentro de sus límites no es homogéneo y puede estar sujeto a fragmentación interna, afectando la viabilidad a largo plazo de estas poblaciones.

Si bien la importancia del parque está bien documentada, es crucial ir más allá de la descripción estática del hábitat y evaluar su conectividad funcional interna. Es necesario entender cómo las diferentes especies, con sus distintas capacidades de movimiento y sensibilidades, perciben y utilizan el mosaico de paisajes dentro del área protegida. Un análisis cuantitativo permite identificar no solo los fragmentos de hábitat más importantes, sino también las barreras internas y las oportunidades para la restauración ecológica.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la conectividad ecológica del paisaje dentro del Parque Nacional da Serra da Capivara para la fauna terrestre. Para ello, se empleará un enfoque multiespecífico, analizando la estructura del hábitat, la importancia de cada fragmento para la conectividad y las áreas prioritarias para la restauración. Este análisis se basa en un modelo de distancia de costo que utiliza la Huella Humana como matriz de resistencia, proporcionando una visión realista de las rutas de movimiento de la fauna y generando resultados directamente aplicables a la planificación de la conservación en la región.

Metodología

Área de estudio:

El estudio se centra en el Parque Nacional da Serra da Capivara, un área protegida de aproximadamente 129,000 hectáreas localizada en el estado de Piauí, en el noreste de Brasil. Este parque, de incalculable valor arqueológico y paleontológico, está reconocido como Patrimonio Mundial de la UNESCO. Ecológicamente, se enclava en el bioma de la Caatinga, un tipo de bosque seco estacional y matorral semiárido que alberga una notable biodiversidad adaptada a condiciones áridas. El parque es un refugio vital para casi 300 especies de vertebrados, incluyendo mamíferos de gran importancia para la conservación como el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*) y el tatú-bola (*Tolypeutes tricinctus*), este último en peligro de extinción. El análisis se enfoca exclusivamente en el área contenida dentro de los límites oficiales del parque para evaluar su conectividad interna.

Datos Utilizados:

Para construir el modelo de conectividad, se integraron las siguientes fuentes de datos geoespaciales:

- I. Límite del Área de Estudio: Se utilizó el polígono vectorial oficial del Parque Nacional da Serra da Capivara. Esta capa, obtenida de la Base de Datos Mundial sobre Áreas Protegidas (WDPA), define el universo exacto de nuestro análisis.
- II. Parches de Hábitat: Para definir dónde vive la fauna, se usaron los mapas globales de cobertura arbórea de Potapov et al. (2021). Estos datos, con una resolución de 30 metros, nos permiten identificar con gran detalle los fragmentos de bosque que sirven como "hogar" para las especies.
- III. Matriz de Resistencia: Para entender cómo se mueven los animales entre los parches de hábitat, se empleó el mapa de Huella Humana (Human Footprint) del año 2020. Imagina este mapa como un terreno con diferentes dificultades: las áreas con baja huella humana son como un campo plano y fácil de cruzar, mientras que las áreas con alta huella humana son como montañas empinadas o pantanos que los animales evitan. Este mapa nos permite simular las rutas realistas que la fauna tomaría.
- IV. Áreas de Restauración: Se incorporó un archivo vectorial con polígonos que representan áreas hipotéticas donde se podría restaurar el bosque en el futuro. Estos son "proyectos candidatos" para mejorar la conectividad.

Índices de Conectividad y Fragmentación

Se seleccionaron tres grupos de índices para contar una historia completa sobre el paisaje, desde su estado actual hasta cómo mejorarlo.

- **Métricas de Fragmentación:** Se calcularon índices como el Porcentaje de Área Núcleo y el Índice de Forma.

¿Qué miden? Miden la *calidad* de un parche. El área núcleo es la parte interior de un bosque, protegida del sol, el viento y los depredadores del exterior (el "efecto borde"). El índice de forma mide si el parche es compacto (bueno) o alargado y con muchas ramificaciones (malo, porque tiene mucho borde).

Justificación: Se eligieron para tener un diagnóstico estructural. Antes de saber si los parches están conectados, necesitamos saber si son buenos "hogares" en primer lugar. Un paisaje puede tener muchos parches, pero si todos son de baja calidad (poco núcleo y formas complejas), la fauna no prosperará.

- **Probabilidad de Conectividad (PC) y sus fracciones (dPC, dPCintra, dPCconnector).**

¿Qué miden? Este es el índice principal. Imagina que dejas caer a dos animales al azar en el bosque. El índice PC te da la probabilidad de que puedan encontrarse. Las fracciones nos dicen *por qué* un parche es importante: dPCintra nos dice si es importante por ser muy grande (un "continente" o reservorio), mientras que dPCconnector nos dice si es importante por su ubicación estratégica (un "puente" o *stepping stone*).

Justificación: Se seleccionó porque es el estándar de oro en ecología de la conectividad. No solo nos dice si el paisaje está conectado, sino que nos permite diagnosticar el rol ecológico de cada parche. Esto es crucial para la gestión: ¿debemos proteger los "continentes" para conservar poblaciones grandes o los "puentes" para asegurar que no queden aisladas? Este índice responde a esa pregunta.

- **Prioridad de Restauración (dPCres).**

¿Qué mide? Este índice calcula el "premio" que obtendríamos al restaurar un área candidata. Mide exactamente en qué porcentaje aumentaría la conectividad total del paisaje si ese nuevo parche de bosque existiera.

Justificación: Se eligió para que el estudio no sea solo un diagnóstico, sino una herramienta de planificación. Permite pasar de la ciencia a la acción, creando un mapa que le dice a los gestores del parque: "Si tienen recursos para reforestar un área, aquí es donde obtendrán el mayor beneficio ecológico por su inversión".

Parámetros y Configuraciones del Análisis

La configuración del modelo se definió con los siguientes parámetros clave para asegurar un análisis realista y consistente:

- **Definición de Hábitat:** Un área se consideró "parche de hábitat" si tenía una cobertura arbórea de al menos el 30%. Este umbral nos permite distinguir el bosque de otras coberturas como el matorral abierto.
- **Modelo de Conectividad:** Se utilizó un modelo de distancia de costo mínimo (*least-cost*). Esto significa que las conexiones entre parches no se midieron en línea recta, sino simulando las rutas inteligentes que tomaría un animal para evitar las zonas de alta Huella Humana.
- **Umbral de Dispersión:** Se estableció un umbral de costo máximo acumulado de 10,000. Este es el parámetro más importante. No significa 10,000 metros. Significa la "cantidad de energía" o "esfuerzo" máximo que un animal está dispuesto a gastar. Por ejemplo, caminar 1 km sobre una zona prístina (resistencia 0.1) podría costar "100 unidades de esfuerzo", mientras que caminar 1 km sobre una zona degradada (resistencia 0.8) costaría "800 unidades". El umbral de 10,000 define hasta dónde pueden llegar antes de "cansarse", y se aplicó de forma idéntica en el análisis de conectividad y en el de restauración para que los resultados fueran directamente comparables.

Resultados

Mapa de localización

Como primer resultado de mi código obtuve un mapa donde se mostraban los parches de vegetación del Parque Nacional da Serra da Capivara, esto con la finalidad de mostrar la zona de estudio y los parches de vegetación que tiene.

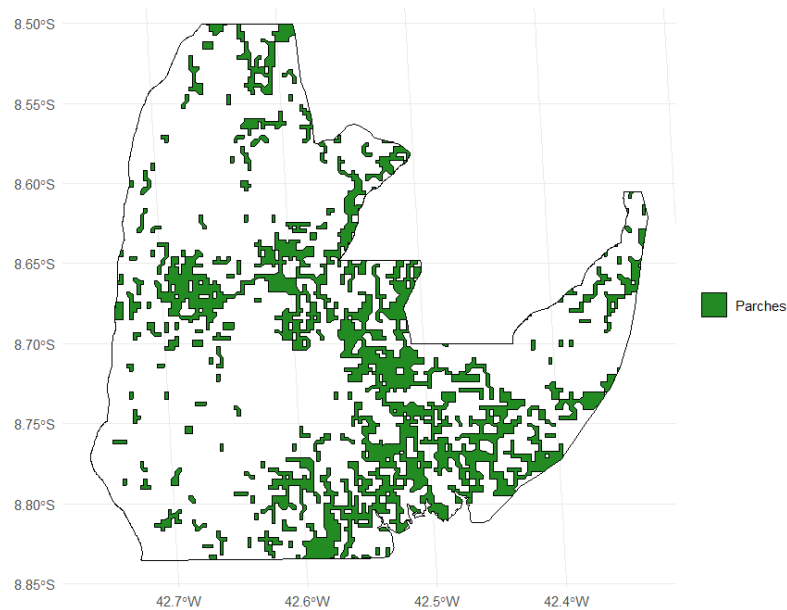


Ilustración 1 Distribución de los parches de hábitat boscoso en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de Efecto de borde

Lo que este mapa te muestra es cuán profundamente las condiciones externas (la matriz no boscosa) penetran e influyen en los fragmentos de bosque.

- Las áreas rojas (Borde) son las porciones del bosque que están directamente expuestas al efecto borde. Ecológicamente, estas son zonas de alta tensión ambiental: reciben más luz solar, son más secas, tienen temperaturas más variables y están más expuestas al viento. Además, son más vulnerables a la invasión de especies no nativas y a depredadores generalistas que se mueven desde el exterior.
- Las áreas verdes (Núcleo) son las únicas porciones de hábitat lo suficientemente profundas y aisladas como para estar protegidas de estas influencias externas. Son los únicos refugios con condiciones microclimáticas estables, que la fauna especialista necesita para sobrevivir.

La conclusión visual es contundente: el efecto borde no es una simple línea en el contorno de los parches, sino que domina prácticamente todo el hábitat disponible. El paisaje se ha fragmentado a tal punto que ha perdido su "interior". Es un bosque "hueco", compuesto casi en

su totalidad por bordes ecológicamente comprometidos. Esto significa que, para la fauna sensible, la mayor parte del área que se ve como bosque en una imagen satelital es, en realidad, un hábitat de baja calidad, riesgoso e inadecuado.

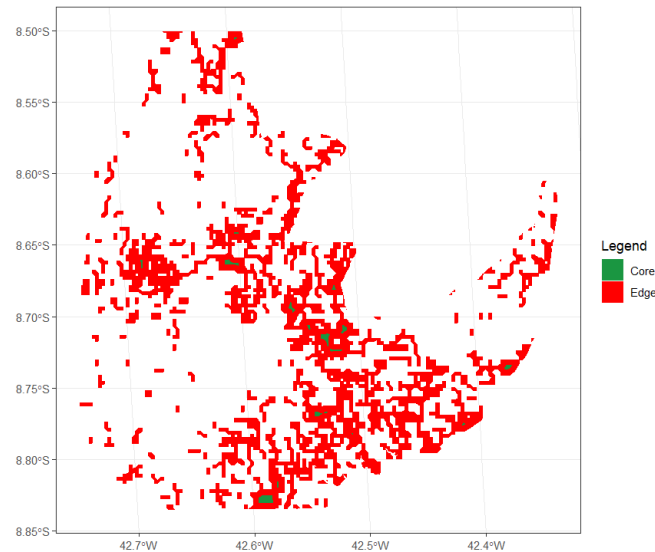


Ilustración 2 Distribución del hábitat de borde y de área núcleo en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche % de Áreas núcleo

Este mapa clasifica cada parche de hábitat según su calidad, medida como el porcentaje de su superficie que constituye área núcleo. La visualización revela un claro patrón espacial en la degradación del hábitat dentro del parque, donde los colores cálidos indican baja calidad y los colores fríos, alta calidad.

La abrumadora mayoría de los fragmentos, particularmente en las zonas norte y oeste, son de color rojo, lo que indica que tienen 0% de área núcleo y son, en su totalidad, hábitat de borde. Ecológicamente, estos son los parches de peor calidad, altamente vulnerables a perturbaciones externas y poco adecuados para la fauna especialista. En la porción central y sur, se observa una notable concentración de parches amarillos, los cuales representan una calidad ligeramente superior al haber conservado una pequeña porción de área núcleo, aunque siguen estando muy comprometidos por el efecto borde.

Finalmente, los parches más valiosos se distinguen en el extremo sureste, resaltados en color verde. Estos son los refugios de alta calidad del paisaje, con el mayor porcentaje de área núcleo, convirtiéndolos en los fragmentos estructuralmente más importantes para la conservación de la fauna sensible. En conclusión, el mapa demuestra un fuerte patrón espacial donde la calidad del hábitat es significativamente mayor en el sureste, mientras que el resto del parque está dominado por fragmentos muy degradados, lo que permite identificar geográficamente los "puntos calientes" de biodiversidad que deben ser prioritarios para la protección.

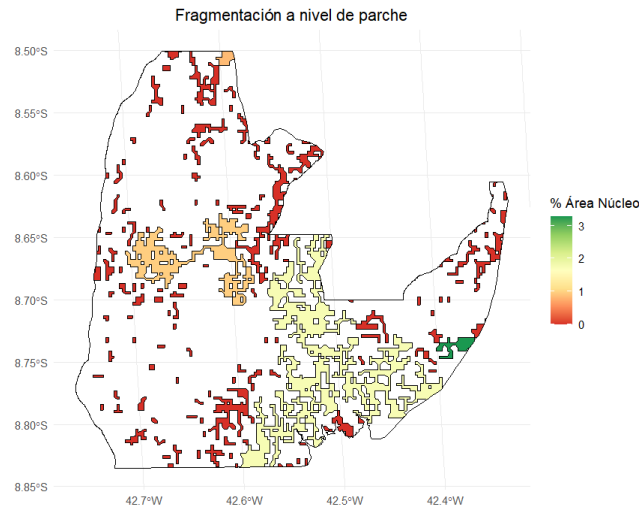


Ilustración 3 Porcentaje de área núcleo por parche de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche % de Borde.

Este mapa clasifica cada parche de hábitat según el porcentaje de su superficie que es considerado "borde". La escala de colores va del verde (menor porcentaje de borde) al rojo (máximo porcentaje de borde).

La interpretación es directa y alarmante: la práctica totalidad del paisaje está dominada por los colores rojo y anaranjado. Esto indica que la inmensa mayoría de los fragmentos de hábitat están compuestos por entre un 99% y un 100% de borde. Ecológicamente, esto significa que son parches de muy baja calidad, completamente expuestos a las presiones del "efecto borde", como cambios en el microclima y mayor riesgo de depredación.

Incluso los parches de "mejor" calidad, representados en verde en el extremo sureste, todavía están compuestos en un 97% por hábitat de borde. Este hallazgo es crítico, ya que demuestra la severidad de la fragmentación: en este paisaje, la diferencia no es entre parches "buenos" y "malos", sino entre parches "completamente degradados" (100% borde) y "severamente degradados" (97% borde). En conclusión, el mapa ilustra un ecosistema forestal que ha perdido casi por completo su interior protegido, convirtiéndose en un mosaico de bordes ecológicamente vulnerables.

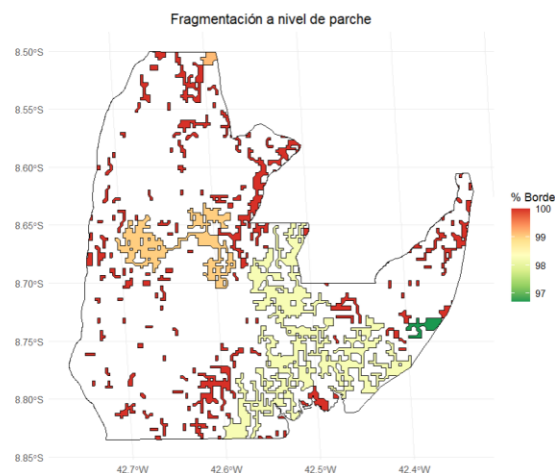


Ilustración 4 Porcentaje de borde por parche de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche % de Perímetro.

Este mapa clasifica cada fragmento de hábitat según la longitud de su perímetro. El color verde indica un perímetro corto, mientras que el rojo señala un perímetro largo.

La interpretación de este mapa es interesante cuando se contrasta con los mapas anteriores de calidad de hábitat:

1. **Parches Verdes (Perímetro Corto):** Estos fragmentos, predominantes en las zonas norte y oeste, son pequeños y aislados. Un perímetro corto es característico de un parche de poca área. Ecológicamente, representan una fase avanzada de fragmentación, donde el bosque ha quedado reducido a "islas" o "confeti" en el paisaje.
2. **Parches Rojos (Perímetro Largo):** Un perímetro largo puede indicar dos cosas: un parche de gran área o un parche con una forma muy compleja e irregular. En este caso, los parches rojos se agrupan en una gran mancha en la zona sureste. Esto sugiere que, aunque internamente fragmentado (como vimos en los mapas de área núcleo), este conglomerado forma el bloque de hábitat más grande y continuo que queda en el parque.

En conclusión, el mapa revela un claro gradiente de fragmentación. El norte y el oeste están dominados por una "micro-fragmentación" de pequeños remanentes aislados. En cambio, el sureste contiene el "corazón" del hábitat del parque: el bloque forestal principal. A pesar de que los mapas anteriores nos mostraron que este gran bloque sufre de un severo efecto de borde, su tamaño y contigüidad lo convierten en el área más importante para sostener a la fauna, especialmente a las especies que requieren mayores extensiones de territorio.

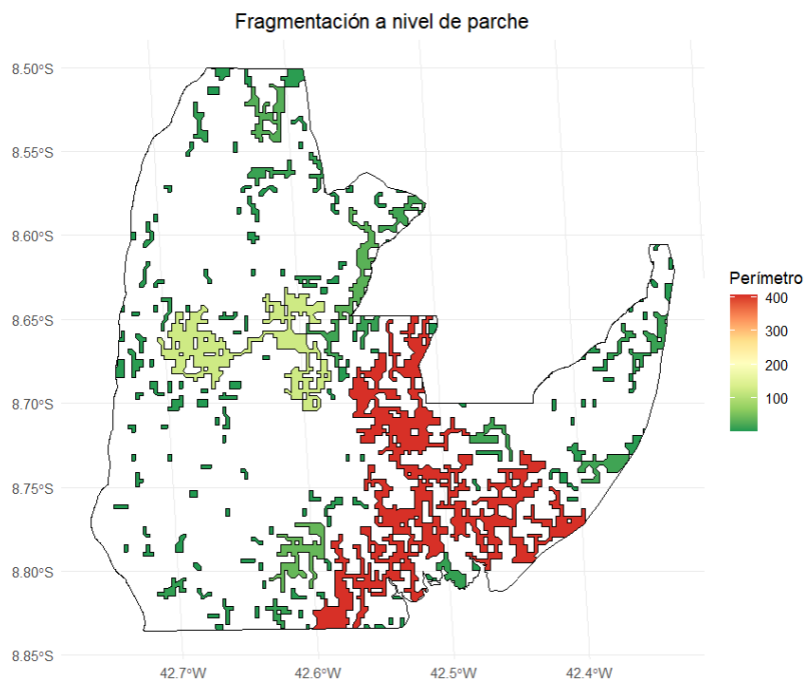


Ilustración 5 Longitud del perímetro por parche de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche de PARA.

Este mapa clasifica cada fragmento de hábitat según su PARA (Relación Perímetro-Área). Este índice es una medida de la complejidad de la forma de un parche:

- PARA bajo (verde): Indica una forma simple y compacta (como un círculo o un cuadrado). Estos parches tienen poco borde en relación con su área, lo que es ecológicamente favorable.
- PARA alto (rojo): Indica una forma compleja, irregular y alargada. Estos parches tienen una gran cantidad de borde en relación con su área, lo que maximiza el efecto borde y es ecológicamente desfavorable.

El mapa revela una paradoja interesante. Los fragmentos más grandes y aparentemente más conectados, ubicados en la zona central y sureste, son los que presentan los valores de PARA más altos (colores anaranjados y rojos). Por otro lado, los parches más pequeños y aislados, dispersos por el resto del parque, muestran valores de PARA más bajos (verdes y amarillos).

Este mapa nos dice que el bloque de hábitat principal del parque es estructuralmente muy complejo y deficiente. Su forma irregular y perforada hace que una enorme proporción de su área sea funcionalmente "borde", lo que disminuye su calidad como refugio para la fauna. Aunque los parches más pequeños son geométricamente más simples (más compactos), su reducido tamaño y aislamiento limitan su valor.

En resumen, el mapa del PARA demuestra que la fragmentación no solo ha dividido el paisaje, sino que ha degradado la estructura del fragmento más grande que queda, haciéndolo mucho más vulnerable al efecto borde de lo que su tamaño total podría sugerir.

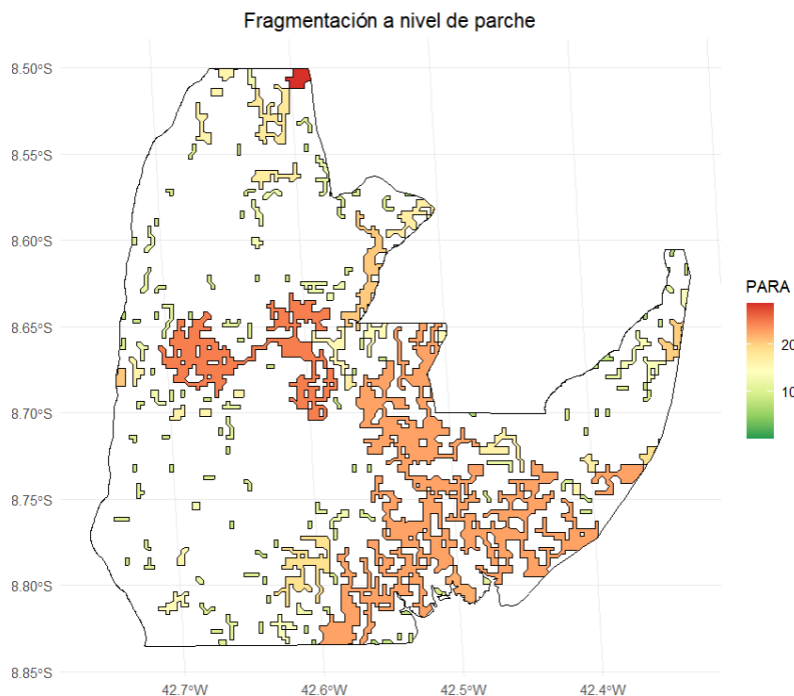


Ilustración 6 Relación Perímetro-Área (PARA) de los parches de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche de Shape Index.

Este mapa clasifica cada fragmento de hábitat según su Índice de Forma (Shape Index). Este índice mide qué tan compleja e irregular es la forma de un parche en comparación con una forma geométrica simple (como un círculo o un cuadrado) de la misma área.

- Shape Index bajo (verde): Indica una forma simple, compacta y regular. Estos parches tienen una menor proporción de borde, lo que es ecológicamente favorable.
- Shape Index alto (magenta): Indica una forma muy compleja, irregular y con muchas ramificaciones. Estos parches tienen una gran cantidad de borde, maximizando el efecto borde y resultando ecológicamente desfavorables.

Interpretación del Patrón Espacial:

El mapa muestra un patrón espacial muy claro y consistente con los análisis anteriores. El gran bloque de hábitat ubicado en la zona central y sureste del parque es el que presenta los valores más altos de Índice de Forma (color magenta). Por el contrario, los fragmentos más pequeños y dispersos, sobre todo en las zonas norte y oeste, muestran las formas más simples (color verde).

Este mapa confirma que el corazón del hábitat del parque, a pesar de ser el área más grande, es también el más estructuralmente degradado en términos de su forma. Su alta complejidad geométrica aumenta enormemente la longitud del borde, lo que a su vez reduce la cantidad de área núcleo y la calidad general del hábitat.

En esencia, la fragmentación no solo ha dividido el bosque en pedazos, sino que ha dejado al fragmento más grande con una forma tan irregular que se comporta como un laberinto de bordes, limitando su capacidad para funcionar como un verdadero refugio para la fauna que depende de un interior forestal estable y protegido.

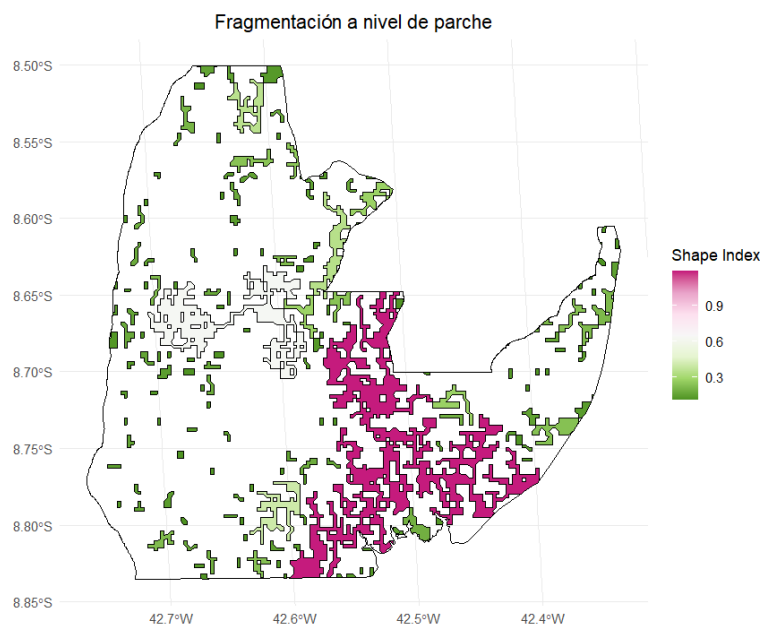


Ilustración 7 Índice de Forma (Shape Index) de los parches de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de fragmentación a nivel de parche de Shape Índice.

Este mapa busca clasificar los fragmentos de hábitat según su FRAC (Índice de Dimensión Fractal), una métrica que cuantifica la complejidad de la forma de un parche.

El aspecto más notable del mapa es la homogeneidad de color en la gran mayoría de los parches. Casi todos los fragmentos se muestran en un tono de verde claro uniforme.

Asumiendo que los colores representan una escala relativa de complejidad, la uniformidad del color en el mapa sugiere que la mayoría de los fragmentos en el paisaje, sin importar su tamaño o ubicación, poseen un grado de complejidad de forma muy similar.

Este resultado es consistente con los mapas del Índice de Forma (Shape Index) y PARA, que indicaban que los parches, en general, no tienen formas extremadamente irregulares o enrevesadas. En conjunto, estos análisis de la forma de los parches sugieren que la fragmentación en esta área ha resultado en fragmentos de geometría relativamente simple, aunque, como ya se ha establecido, de muy baja calidad en términos de área núcleo.

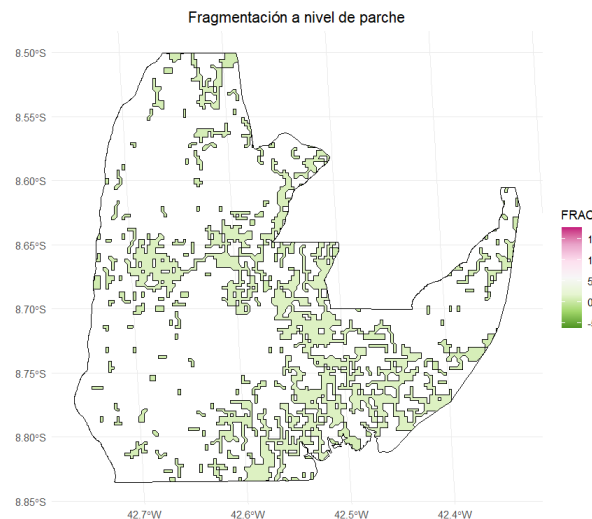


Ilustración 8 Índice de Dimensión Fractal (FRAC) de los parches de hábitat en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa de la delta de Probabilidad de Conectividad

El mapa de la delta de Probabilidad de Conectividad (dPC) ilustra la importancia de cada fragmento de hábitat para mantener la conectividad funcional de todo el paisaje del Parque Nacional. Este índice integra tanto el área de un parche como su contribución al flujo de la fauna entre otros parches. Los valores altos (verde) señalan los parches más críticos, cuya eliminación causaría el mayor impacto negativo en la conectividad total.

El análisis revela un patrón espacial muy claro y definido. La columna vertebral de la conectividad del parque se concentra en un gran conglomerado de parches de alta importancia (colores verdes) ubicado en las zonas central-sur y sureste. Estos fragmentos, que en conjunto forman el bloque de hábitat más grande y cohesivo, son los elementos más

cruciales para sostener la integridad ecológica del paisaje. Su gran tamaño y su interconexión los convierten en el motor principal de la red de hábitat.

Rodeando este núcleo, se encuentran parches de importancia media (colores amarillos y naranjas) que actúan como áreas de transición o conectores secundarios. En contraste, los parches de menor importancia (color rojo), se encuentran dispersos principalmente en la periferia, sobre todo en las regiones norte y oeste. Estos fragmentos, debido a su pequeño tamaño y/o su gran aislamiento, contribuyen de manera muy marginal a la conectividad general de la red.

En conclusión, el mapa del dPC permite identificar inequívocamente el "corazón ecológico" del parque. Demuestra que los esfuerzos de conservación y monitoreo deben priorizarse en el gran bloque de hábitat del sureste, ya que su preservación es indispensable para garantizar la funcionalidad del ecosistema para la fauna a escala de paisaje.

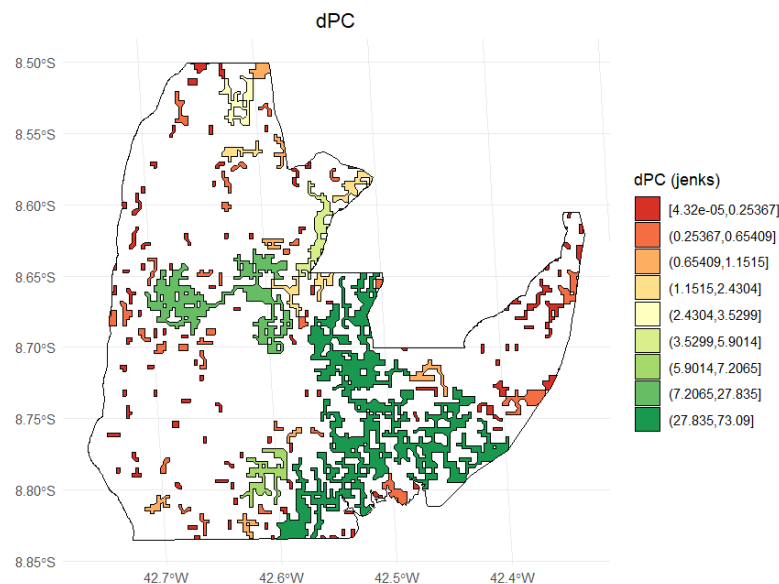


Ilustración 9 Importancia de los parches de hábitat para la conectividad (dPC) en el Parque Nacional da Serra da Capivara.

Mapa del Componente de Área (dPCintra)

Este mapa desglosa la importancia de cada parche, mostrando específicamente la contribución de su propia área y recursos internos (dPCintra) a la conectividad total. En otras palabras, identifica cuáles parches son importantes simplemente por ser grandes "reservorios" de hábitat, capaces de albergar poblaciones significativas.

El patrón espacial es muy claro y refuerza los hallazgos anteriores. Los parches con los valores más altos de dPCintra (colores verdes) se concentran de manera casi exclusiva en el gran bloque de hábitat de la zona central-sur y sureste del parque. Esto confirma que esta área no solo es crucial por su ubicación (como se vio en el dPC general), sino también por la gran

cantidad de hábitat que contiene. Estos parches actúan como las "fuentes" o los "motores" demográficos de la red, sosteniendo a las poblaciones principales.

Por el contrario, los fragmentos más pequeños y aislados en la periferia, especialmente en el norte, presentan los valores más bajos de dPCintra (colores rojos y anaranjados). La contribución de su área individual es prácticamente insignificante para el conjunto del paisaje.

En resumen, el mapa de dPCintra permite identificar inequívocamente el conglomerado sureste como el reservorio de hábitat fundamental del parque, cuya protección es vital para mantener la capacidad del paisaje de albergar poblaciones viables de fauna.

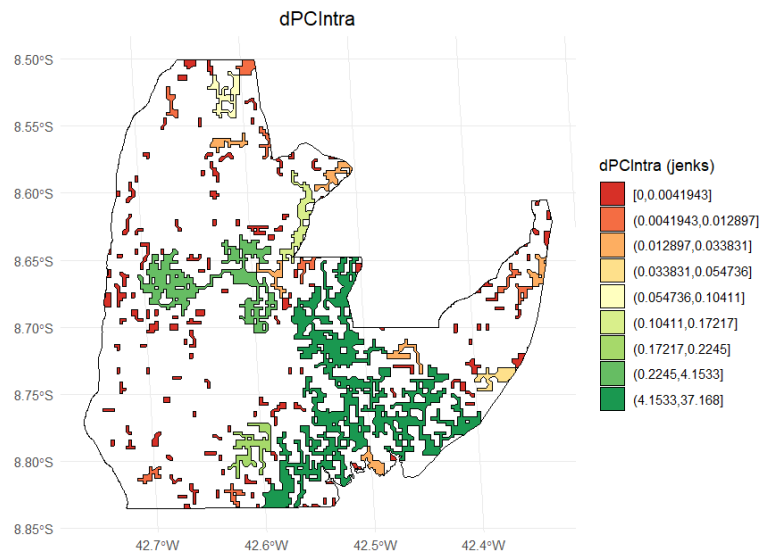


Ilustración 10 Contribución de cada parche a la conectividad por su área interna (dPCintra).

Mapa del Componente de Conexión (dPCCconnector)

Este mapa evalúa la importancia de cada parche como un "puente" o "stepping stone" (dPCCconnector). A diferencia del dPCintra, este índice resalta los parches que, independientemente de su tamaño, son cruciales por su ubicación estratégica para conectar otras áreas de hábitat y facilitar el movimiento de la fauna a través del paisaje.

El resultado más significativo de este análisis es que los valores de dPCCconnector para la práctica totalidad de los parches son extremadamente bajos y cercanos a cero (del orden de 10^{-16}). Visualmente, el mapa refleja esto con un dominio casi absoluto del color rojo, que representa una contribución como conector prácticamente nulo.

Este resultado indica que la conectividad en el Parque Nacional da Serra da Capivara no depende de una red de pequeños parches "puente" que sean indispensables. En cambio, la conectividad funcional del paisaje está abrumadoramente dominada por el componente de área (dPCintra), es decir, por el gran bloque de hábitat contiguo del sureste. El flujo de individuos ocurre principalmente dentro de este gran conglomerado, y la importancia de los parches se define por el hábitat que contienen, no por su rol como conectores.

En conclusión, el análisis del dPCCconnector demuestra que no existen "eslabones débiles" o conectores clave cuya eliminación fracturaría la red. La estrategia de conservación debe, por lo tanto, centrarse en mantener la integridad y el tamaño de los grandes bloques de hábitat, ya que son ellos los que constituyen, casi en su totalidad, la red funcional para la fauna del parque.

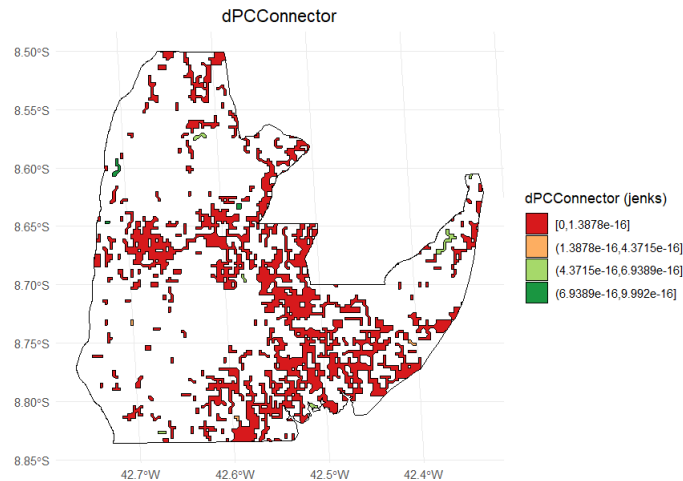


Ilustración 11 Contribución de cada parche como conector o "stepping stone" (dPCCconnector).

Mapa de Prioridades de Restauración Ecológica

Este mapa presenta los resultados del análisis de prioridades de restauración, identificando las áreas donde las acciones de reforestación tendrían el mayor impacto positivo en la conectividad del paisaje. Cada polígono de color representa un "parche candidato" para la restauración, y su color indica el porcentaje de ganancia en la conectividad total (% dPCres) que se obtendría si fuera restaurado.

El resultado es inequívoco y de gran valor para la planificación. Se identifica un único parche de máxima prioridad, resaltado en color rojo en la zona noroccidental del parque. La restauración de esta área específica generaría un aumento de aproximadamente el 12% en la Probabilidad de Conectividad (PC) de todo el paisaje. Ecológicamente, este parche está ubicado en una posición estratégica que actuaría como un "puente" o "stepping stone" crucial, conectando dos grandes áreas de hábitat que actualmente están funcionalmente aisladas por una brecha en la red.

Los demás parches candidatos, mostrados en tonos de azul, tienen una prioridad considerablemente menor. Aunque su restauración también contribuiría positivamente a la conectividad, el beneficio sería mucho más modesto, con ganancias cercanas al 4%.

En conclusión, este mapa constituye una guía estratégica para la toma de decisiones. Demuestra que los recursos limitados de conservación y restauración deben ser dirigidos de manera prioritaria al parche rojo del noroeste. Esta acción, por sí sola, es la intervención más costo-efectiva para fortalecer la resiliencia y la integridad de la red de hábitat para la fauna del Parque Nacional da Serra da Capivara.

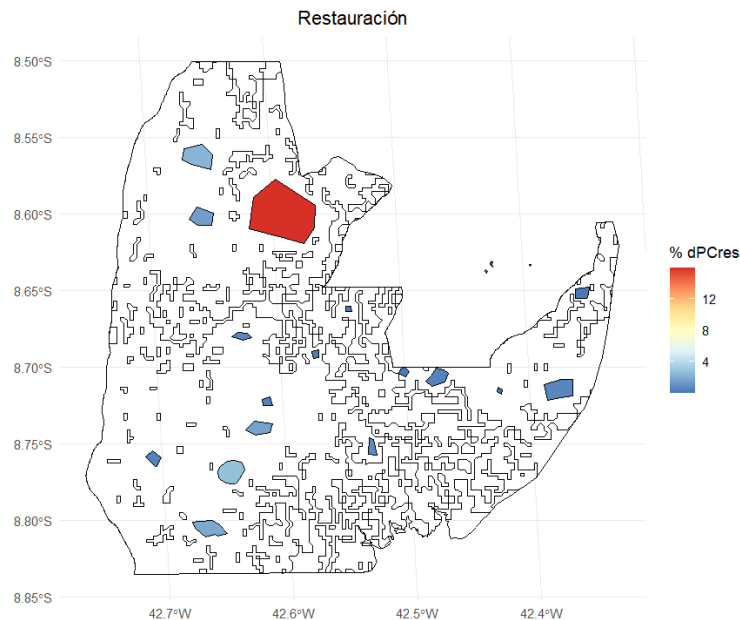


Ilustración 12 Priorización de áreas para la restauración ecológica según la ganancia en conectividad (% dPCres).

Discusión

Este estudio evaluó la conectividad estructural y funcional del hábitat para la fauna dentro del Parque Nacional da Serra da Capivara. Los resultados revelan un paisaje internamente fragmentado cuya viabilidad ecológica depende de un único bloque de hábitat principal y destacan una oportunidad estratégica clave para su restauración.

Interpretación Ecológica de los Resultados

El análisis de fragmentación pintó un cuadro alarmante de la estructura del hábitat. A pesar de que el parque protege más de 21,000 hectáreas de bosque, este se encuentra dividido en 164 parches, con una pérdida casi total de su área núcleo (menos del 1%). Esto significa que el ecosistema forestal ha sido transformado en un paisaje de "bordes", un ambiente de baja calidad, vulnerable a perturbaciones y poco adecuado para las especies especialistas que requieren las condiciones estables del interior del bosque. Si bien los fragmentos individuales no poseen formas excesivamente complejas, su gran número y la falta de hábitat de calidad confirman una degradación estructural severa.

El análisis de conectividad funcional, sin embargo, reveló que no todos los parches son iguales. Los resultados de dPC y dPCintra identificaron de manera inequívoca al gran conglomerado de parches del sureste como el corazón ecológico del parque. Esta área no solo contiene la mayor cantidad de hábitat (actuando como el principal "reservorio"), sino que también es el motor que sostiene toda la red de conectividad. La funcionalidad del paisaje para la fauna depende casi exclusivamente de la integridad de este bloque.

Por otro lado, el análisis de dPCCconnector demostró que el paisaje carece de "puentes" o "stepping stones" críticos. Ningún parche pequeño destacó por tener un rol indispensable como conector, ya que sus valores fueron prácticamente nulos. Esto implica que la conectividad no se basa en una red de pequeños enlaces, sino en la cohesión del bloque principal. Finalmente, el análisis de restauración identificó una única área en el noroeste cuya reforestación produciría un beneficio desproporcionadamente alto para la conectividad, sugiriendo que su rol sería el de conectar dos sub-redes importantes que actualmente se encuentran aisladas.

Relación con la Literatura y Estudios Previos

Los resultados de este estudio son consistentes con la literatura científica que alerta sobre la creciente fragmentación en el bioma de la Caatinga, a menudo considerado erróneamente como más resiliente que los bosques húmedos. Estudios previos han demostrado que, aunque la Caatinga es un ecosistema adaptado a condiciones extremas, la fragmentación de sus áreas boscosas impacta negativamente a la fauna, especialmente a los mamíferos de mediano y gran porte, como los que habitan en la Serra da Capivara.

La identificación del bloque sureste como el "corazón" del parque es coherente con el principio de la ecología del paisaje de que las áreas grandes y contiguas son fundamentales para el mantenimiento de poblaciones viables, especialmente para especies con grandes requerimientos de área como el jaguar (*Panthera onca*) y el puma (*Puma concolor*), cuya presencia está confirmada en el parque. La falta de área núcleo detectada en nuestro análisis representa una amenaza directa para estas poblaciones, un hallazgo que coincide con estudios que vinculan la viabilidad de los grandes carnívoros con la calidad y no solo con la cantidad del hábitat.

Limitaciones del Análisis y Posibles Mejoras

A pesar de la robustez del enfoque, este estudio presenta algunas limitaciones que abren la puerta a futuras mejoras:

- **Parámetros de Especie Única:** El análisis se realizó utilizando un único valor de costo máximo (10,000). Este enfoque es útil para una evaluación general, pero no captura las diferentes capacidades de movimiento de toda la comunidad de fauna. Una mejora sería realizar un análisis multiespecífico, utilizando diferentes umbrales de costo para representar a especies con alta, media y baja movilidad (ej. un jaguar, un ocelote y un tatú-bola, respectivamente), lo que permitiría crear planes de conservación más específicos.
- **Superficie de Resistencia Genérica:** Se utilizó la Huella Humana como una matriz de resistencia general. Aunque es un excelente indicador, podría no capturar barreras o resistencias específicas para la fauna local. Para mejorar el modelo, la superficie de resistencia podría ser calibrada con datos de campo, como localizaciones de GPS de

animales monitoreados o el conocimiento de expertos locales, para reflejar de manera más precisa cómo las diferentes coberturas del suelo afectan a cada especie.

- **Análisis Estático:** El estudio representa una "fotografía" de la conectividad en el año 2020. Sin embargo, los paisajes son dinámicos. Una mejora futura sería realizar un análisis temporal, utilizando los datos de la Huella Humana de años anteriores (ej. 1990, 2000, 2010) para evaluar cómo ha cambiado la conectividad a lo largo del tiempo y predecir tendencias futuras.
- **Candidatos de Restauración Predefinidos:** La evaluación de la restauración se basó en un conjunto de parches candidatos predefinidos. Un enfoque más avanzado sería utilizar algoritmos de optimización (como los disponibles en el software Zonation o Prioritizr) para identificar las áreas óptimas para la restauración en todo el paisaje, en lugar de evaluar únicamente opciones predeterminadas.

Conclusión

Este estudio revela una dualidad crítica en el estado ecológico del Parque Nacional da Serra da Capivara. Por un lado, el paisaje sufre una severa fragmentación estructural, con una alarmante pérdida de casi el 99% del hábitat de área núcleo, lo que compromete su capacidad para albergar fauna especialista. Por otro lado, el análisis funcional demuestra que la conectividad del parque no está perdida, sino que depende de manera casi exclusiva de la integridad de un gran bloque de hábitat en la región sureste, que actúa como el corazón ecológico del área protegida.

Los hallazgos clave de este trabajo tienen implicaciones directas para la conservación y el manejo del paisaje:

1. **Priorización de la Conservación:** La gestión y protección no deben ser homogéneas en todo el parque. Los esfuerzos deben priorizar la vigilancia y conservación del bloque de hábitat del sureste. Su rol como reservorio principal y motor de la conectividad lo convierte en el área más crítica para la viabilidad a largo plazo de las poblaciones de fauna.
2. **Acción de Restauración Estratégica:** El análisis identificó un área específica en el noroeste cuya restauración generaría el mayor beneficio para la conectividad de toda la red. Esto proporciona una hoja de ruta clara y costo-efectiva para los gestores del parque, permitiendo dirigir recursos limitados a la acción con el mayor retorno ecológico posible.

En definitiva, este estudio demuestra que, a pesar de la degradación estructural, la conectividad funcional del Parque Nacional da Serra da Capivara puede ser mantenida y mejorada a través de acciones de manejo informadas y estratégicamente localizadas. La protección del "corazón" del parque y la restauración de "puentes" clave son las dos estrategias fundamentales para asegurar el futuro de su valiosa biodiversidad.

Bibliografía

- Theobald, D. (2024). Global human modification datasets of terrestrial ecosystems from 1990 to 2020 [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14449495>
- 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/>
- ICMBio. (2019). Plano de Manejo do Parque Nacional da Serra da Capivara. https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/caatinga/lista-de-ucs/parna-da-serra-da-capivara/arquivos/plano_de_manejo_parna_da_serra_da_capivara.pdf
- UNESCO. (2023). Patrimônio Mundial – Serra da Capivara. <https://www.unesco.org/archives/multimedia/document-3544-por-2>
- IPE (2024). Registros recientes de anta (Tapirus terrestris) en la Caatinga.
- Potapov, P. et al. (2021). Global maps of forest canopy height from GEDI and Landsat. Remote Sensing of Environment, 253: 112165.
- UNEP-WCMC and IUCN. (2025). *Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA)* [Online]. Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN. Retrieved August 15, 2025, from <https://www.protectedplanet.net>



Proyecto_Final.R