

Estado de conservación y conectividad del hábitat del Yaguarundí *Herpailurus yagouaroundi*, en el área de influencia del Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda, Caldas, Colombia

Proyecto "PARQUE TECNOLÓGICO AMBIENTAL LA ESMERALDA
PROYECTO DE AMPLIACIÓN DEL RELLENO SANITARIO LA
ESMERALDA"

Presentado por
Juliana Cerón Cardona

Manizales, agosto 30 de 2025

1. Estado de conservación y conectividad del hábitat del Yaguarundi *Herpailurus yagouaroundi*, en el área de influencia del Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda, Caldas, Colombia

1.1. Introducción

La pérdida y fragmentación de hábitats naturales constituye una de las principales amenazas para la biodiversidad a escala global, pues reduce la disponibilidad de áreas continuas para las especies, limita el flujo génico y compromete la persistencia de poblaciones silvestres en paisajes dominados por actividades humanas (Fahrig, 2003; Saura & Rubio, 2010). En este contexto, el análisis de la conectividad ecológica se ha consolidado como una herramienta fundamental para comprender la estructura espacial de los ecosistemas y orientar estrategias de conservación que garanticen la movilidad de la fauna, la resiliencia de los ecosistemas y el mantenimiento de servicios ecosistémicos (Pascual-Hortal & Saura, 2006; Avon & Bergès, 2016).

En el contexto local, la ciudad de Manizales y su entorno inmediato se caracterizan por una intensa interacción entre áreas urbanas, agroecosistemas y fragmentos de bosque andino, lo que genera paisajes altamente transformados y con creciente presión sobre la biodiversidad. En particular, la zona donde se ubica el Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda (PTAE) constituye un espacio de especial interés, pues combina la presencia de ecosistemas de bosque montano con actividades antrópicas como la disposición de residuos sólidos y el desarrollo urbano-periurbano (Cáceres-Martínez et al., 2022; Betancur, 2023). Esta interacción de dinámicas de conservación y uso humano convierte al área de influencia del PTAE en un laboratorio natural para comprender cómo la estructura del paisaje y la conectividad ecológica se ven modificadas en entornos donde la biodiversidad coexiste con procesos productivos y urbanos.

El yaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), felino de amplia distribución en América y con presencia confirmada en el área de estudio, se constituye en una especie focal para evaluar la conectividad del paisaje. Aunque a nivel global está catalogado como de Preocupación Menor por la UICN (Caso et al., 2015), enfrenta amenazas locales asociadas a la fragmentación, la pérdida de cobertura boscosa y la presión de entornos urbanos y rurales (Payán & Soto, 2012; Coronado-Quibrera et al., 2019). Su capacidad de desplazamiento y uso de hábitats heterogéneos lo convierten en un indicador apropiado para analizar la estructura espacial del paisaje y el grado en que los fragmentos de hábitat mantienen su funcionalidad ecológica.

El presente trabajo evalúa el estado de conservación y conectividad del hábitat del yaguarundi en el área de influencia del PTAE, para el periodo 2020–2024. Específicamente, se analizó el nivel de fragmentación del hábitat disponible, se priorizaron los parches clave para la conectividad y se evaluó la conectividad dinámica en el tiempo, con el fin de identificar tendencias y posibles implicaciones para la conservación de la especie en paisajes altamente

transformados. Los resultados constituyen una base técnica que puede orientar la gestión ambiental local y aportar insumos para la toma de decisiones relacionadas con la planificación territorial y la conservación de la biodiversidad en la región andina colombiana.

1.2. Metodología

1.2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende el área de influencia alrededor del Relleno Sanitario La Esmeralda, la cual fue digitalizada para los años 2020 y 2024 siguiendo la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010). El Relleno Sanitario, se encuentra localizado en el municipio de Manizales (Caldas Colombia) y forma parte del “Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda (PTAE)”, cuyos predios suman en total 161 ha y los cuales son administrados desde el año 1995 por la Empresa Metropolitana de Aseo EMAS (Superservicios 2018, Betancur 2023). El área de influencia tiene una extensión total de 1725,1 hectáreas. Abarca un rango altitudinal que va desde los 1790 hasta los 2330 metros sobre el nivel del mar. En el área de influencia no se encuentra inmersa dentro de una categoría estricta de área protegida. Según la clasificación de ecorregiones mundiales propuesta por Olson et al. (2001), esta área se encuentra en la ecorregión de los bosques montanos del Valle del Cauca, y pertenece al ecosistema de Orobioma Andino Cauca medio.

1.2.2. Especie de estudio

Herpailurus yagouaroundi

El yaguarundi se distribuye desde México hasta Argentina (Caso et al. 2015). Es una de las especies de felinos medianos a pequeños (por debajo de 13 kg) que se encuentran en Colombia (Payán & Soto 2012). La especie habita predominantemente ecosistemas de tierras bajas desde los 0 hasta los 2.000 msnm, aunque en Colombia se ha informado hasta los 3.200 msnm (Caso & Carvajal 2015). Habitando zonas boscosas, agrícolas, urbanas y periurbanas (Payán y Soto, 2012; Coronado-Quibrera et al. 2019). Esta especie fue escogida para el análisis de conectividad, ya que fue registrada por medio de cámara trampa en el monitoreo de mamíferos en el año 2022 (Cáceres-Martínez et al. 2022).

H. yagouaroundi ha sido clasificado como Preocupación Menor (LC) a nivel global (Caso et al. 2015), y se menciona en el apéndice II de CITES, donde figuran aquellas especies que no están necesariamente amenazadas de extinción, pero cuyo comercio es controlado para garantizar su supervivencia (CITES, 2023). La pérdida y fragmentación de su hábitat es sin duda su principal amenaza para la supervivencia de la especie.

1.2.3. Identificación de parches de hábitat remanentes para el Yaguarundi

Para identificar los parches de hábitat remanente para el Yaguarundi dentro del área de influencia de los predios de EMAS se procedió de la siguiente manera: a) Se tuvieron en cuenta las coberturas digitalizadas existentes del año 2024 en el área de influencia del PTAE, teniendo en cuenta la metodología de Corine Land Cover adaptada para Colombia en una escala 1:10000 (IDEAM, 2010). b) Posteriormente, se llevó a cabo una selección de las coberturas de la tierra que constituyen el hábitat para la especie, excluyendo aquellas que no corresponden a su hábitat natural. La selección de las coberturas que conforman el hábitat se basó en información proveniente de la literatura científica que aborda el uso de hábitat y aspectos relacionados con la historia natural de la especie (Payán y Soto, 2012, Coronado-Quibrera et al. 2019). Los tres procedimientos anteriores se realizaron utilizando el software Qgis versión 3.28 (QGIS Development Team, 2023).

1.2.4. Estado de fragmentación del hábitat del Yaguarundi en el 2024

Con los parches de hábitat identificados para el Yaguarundi se evaluó el grado de fragmentación dentro del área de influencia utilizando el paquete de R “Makurhini” (Godínez-Gómez et al., 2025). Se utilizó la función “MK_Fragmentation” para analizar la configuración espacial de los parches de hábitat dentro del área de influencia. Las métricas de fragmentación calculadas fueron el área, tamaño y número de parches de hábitat, el índice de forma; el cual indica que tan irregular es un parche. Por ejemplo, un parche tiene una forma regular cuando es circular (valor 0) e incrementando (≥ 1) cuando la forma del parche se vuelve más irregular (McGarigal y Marks, 1995) y, por último, el índice “*Mesh*” (medida del grado de fragmentación en el paisaje que va de 0 al área total del paisaje). El valor del índice *Mesh* es máximo cuando el paisaje consiste en un solo fragmento de hábitat. Para el análisis de fragmentación del hábitat del Yaguarundi, se estimó una distancia de borde de 10 m. En este caso, el Yaguarundi, se mueve a través de diferentes hábitats los cuales van desde bosques tropicales, subtropicales húmedos y secos, matorrales, pastizales y puede habitar paisajes altamente modificados (Payán y Soto, 2012; Caso, de Oliveira, y Carvajal, 2015; Coronado-Quibrera et al. 2019). Por lo tanto, no es una especie que se encuentre exclusivamente en el interior de bosque.

1.2.5. Priorización de parches en el hábitat del Yaguarundi y contribución de los parches para mantener la conectividad

Con base en los mismos parches remanentes de hábitat identificados anteriormente. Se priorizaron los parches más importantes para mantener la conectividad en el hábitat del Yaguarundi y su contribución individual para mantener la red de los parches de hábitat conectada. Para esto, se utilizó el índice de probabilidad de conectividad (PC) para cada uno

de los parches de hábitat idóneo utilizando la función MK_dPCIIC de Makurhini (Godínez-Gómez et al., 2025) en R v4.4.4 (R Core Team, 2020). El PC puede ser calculado para cada parche como la contribución de cada uno a la conectividad del paisaje (dPC), es decir, cómo se ve afectada la conectividad del paisaje al eliminar un parche particular (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). El dPC tiene valores de 0 – 100 (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). Al igual que con el PC, se usa la fracción dPC para calcular la contribución a la conectividad general del hábitat de un parche particular (Avon & Bergés, 2016; Pascual-Hortal & Saura, 2006; Saura & Rubio, 2010). Además, se calcularon las fracciones dPCintra, dPCflux y dPCconnector. La primera, refleja cuál es la contribución de cada parche a la intra-conectividad, es decir, cual es el grado de conectividad dentro de cada parche, sin tener en cuenta los enlaces hacia otros parches (Saura & Rubio, 2010). La segunda, corresponde al flujo de dispersión de los parches, a través de las conexiones de un parche hacia otros parches y la tercera refleja la función de un parche como conector en la red ecológica. Este valor no depende del tamaño del parche, sino de su posición estratégica en el paisaje: parches con alto dPCconnector facilitan el flujo entre otros fragmentos y mantienen la cohesión de la red. Su pérdida implica una reducción significativa en la conectividad funcional, al eliminar corredores o pasos intermedios que permiten la dispersión de las especies.

Para realizar este análisis, se utilizó una distancia aproximada de la mediana de dispersión para el Yaguarundi que se estimó a partir del rango de hogar reportado para la especie (51,45 km², Kasper et al., 2016). Para ello, se utilizó la fórmula propuesta por Bowman et al. (2002), que permite calcular la distancia máxima de dispersión como la raíz cuadrada del rango de hogar multiplicado por 40, obteniéndose un valor de aproximadamente 45,4 km. Dado que la dispersión real de la mayoría de los individuos suele ser menor a la máxima, se asumió como criterio conservador que la mediana corresponde a la mitad de esta distancia, resultando en un valor estimado de 22 km (22000 m). Adicionalmente, se incorporaron mapas de resistencia a 5 m de resolución, contruidos para la especie en el área de estudio. Las variables utilizadas fueron: distancia a carreteras y tipo de cobertura, seleccionadas por su relevancia en la ecología e historia natural de la especie. A cada categoría se le asignó un valor de resistencia entre 1 y 100, donde los valores más altos representan mayor presión antrópica y, en consecuencia, mayor resistencia al movimiento de la especie.

1.2.6. Evaluación de la conectividad dinámica con MK_dECA()

Para evaluar la conectividad dinámica dentro del área de influencia del proyecto, se utilizaron las coberturas digitalizadas de los años 2020 y 2024. A las coberturas obtenidas de los dos años, se les seleccionó los fragmentos de hábitat de la especie, para cada año, y teniendo en cuenta la extensión del área de influencia digitalizada, se evaluó el cambio y porcentaje de hábitat disponible dentro de cada periodo de tiempo. A su vez, se incorporaron mapas de resistencia a 5 m de resolución, contruidos para la especie para cada año (2020 y 2024) en el área de estudio. Para esto se aplicó el índice de Área Conectada Equivalente (ECA), el cual se

define como el área de un parche de hábitat hipotético continuo y completamente conectado, que proporciona la misma probabilidad de conectividad que la red existente de parches de hábitat en un área determinada (Saura y Rubio 2010). Para el análisis del cambio de la conectividad se calculó el porcentaje de variación de ECA (dECA) a través de los años analizados (2020 y 2024). La variación de ECA, se comparó con el porcentaje de variación de la superficie de hábitat (dA). Esta comparación permite identificar si los cambios en términos de conectividad son mayores y más eficientes (o viceversa) que los cambios en la superficie de hábitat para cada especie. En este sentido, si los parches de hábitat en el área digitalizada se encuentran más distantes y aislados con respecto a los previamente existentes, el aumento de la superficie del hábitat no tendrá un aumento significativo en términos de conectividad ($dECA < dA > 0$). Por el contrario, si los parches de hábitat tienen una ubicación clave en el paisaje, y sirven como conectores de parches de hábitat, la conectividad será significativa, más que la de la superficie que no corresponde al hábitat de las especies ($dECA > dA$). Por último, si toda superficie de hábitat pertenece a la misma superficie continua antes y después del cambio, entonces $dECA = dA$ (Murillo Sandoval et al., 2022). Para el análisis del ECA, se utilizó la mediana de la dispersión para el puma Yaguarundi, estimada en el análisis anterior (ver página 6).

1.3. Resultados y discusión

1.3.1. Estado de fragmentación del hábitat del Yaguarundi en el 2024

Para el año del 2024, existen 14 coberturas de la tierra (IDEAM, 2010), en el área de influencia del PTAE, de las cuales tres son coberturas de hábitat para el Yaguarundi (Bosque de galería y ripario, Vegetación secundaria alta y Vegetación secundaria baja), lo que corresponde a 769,2 ha, que representa un 44,6% del total de coberturas de la tierra. En las tres coberturas de hábitat se distribuyen 26 parches de hábitat con un tamaño de 0,01 a 447,4 ha, con una media de 29,6 ha, los parches de mayor tamaño se pueden observar en la zona central y parte nororiental de color verde oscuro (figura 1A). El 41,8% de los parches tuvieron un área menor a 100 ha. El índice de forma estuvo entre 0,1 a 0,9; con un valor promedio de media de 0,3. Los parches con mejor índice de forma, se encuentran de igual manera la zona central y nororiental del área de estudio, señalados en color verde oscuro (figura 1B). El área núcleo va de 0,01 a 376,6 ha. El promedio del área núcleo es de 23,6 ha (figura 1C).

El perímetro de los parches va desde 0,005 a 73,3 ha, con un promedio de 6,2 ha. Los parches de mayor perímetro son igualmente los de la zona central y nororiental señalados con color verde oscuro (figura 2A). La relación área - perímetro va de 0,2 a 6,1 ha con un promedio de 2,5. Los fragmentos que se muestran de color verde oscuro, son los que mayor relación Área – Perímetro tienen (figura 2B). La longitud total del borde de los fragmentos en el paisaje es de 162,5 ha. El índice Mesh fue de 124,8 ha. El cual expresado en porcentaje indica que un 92,8 % del área de hábitat para el Yaguarundi, se encuentra fragmentada.

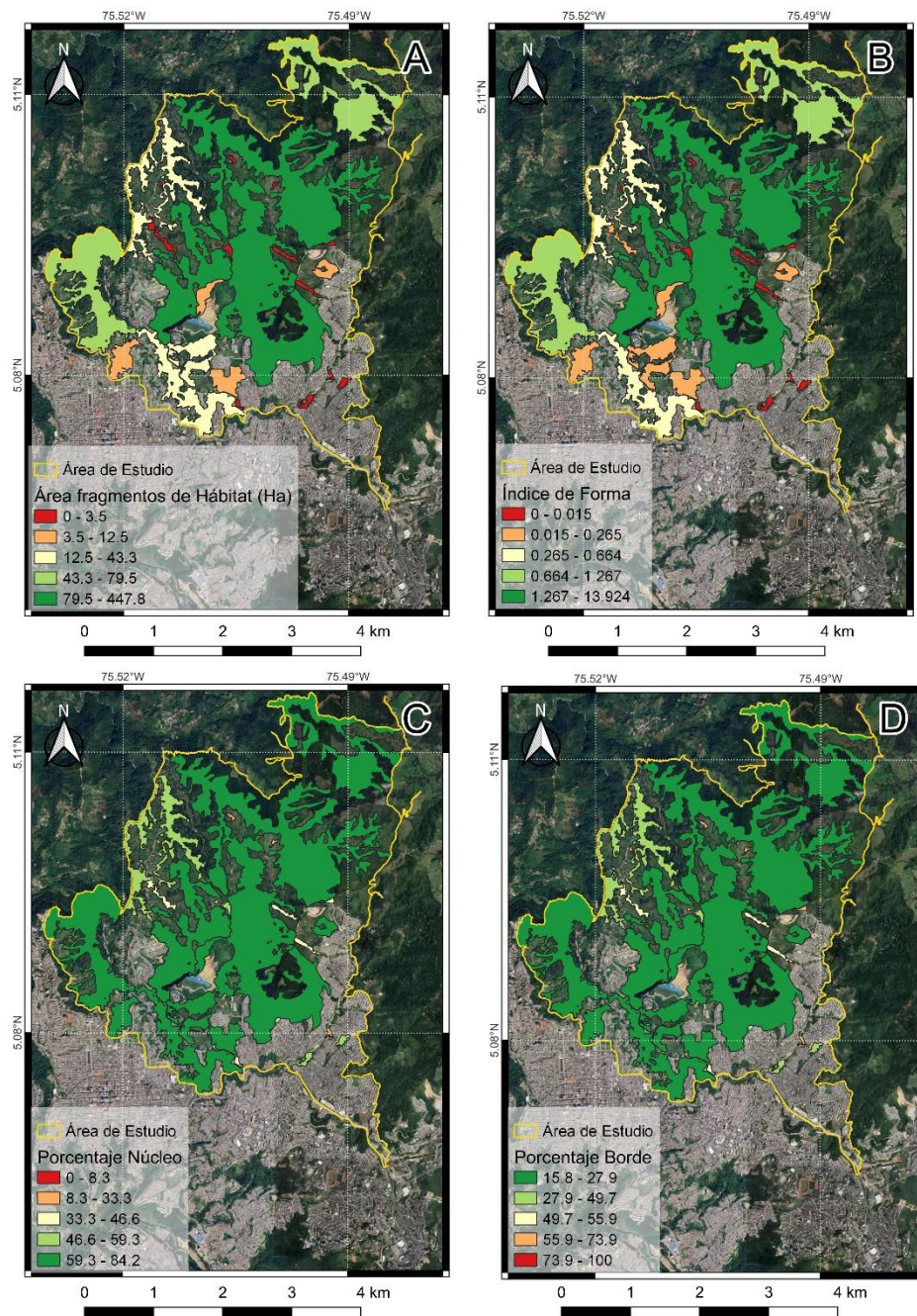


Figura 1. Mapas en el hábitat actual del Yaguarundi en el área de influencia, mostrando métricas de fragmentación: [A] tamaño (Área), [B] índice de forma, [C] porcentaje de área núcleo y [D] porcentaje de borde. Los valores de las métricas se indican mediante el color de las barras.

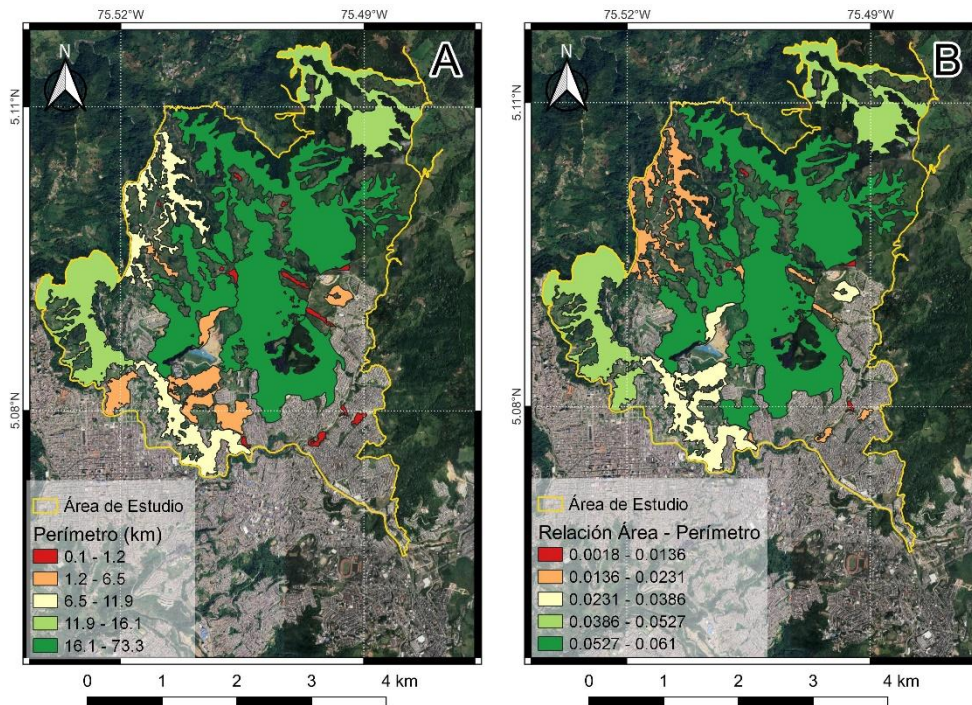


Figura 2. Mapas en el hábitat actual del Yaguarundi en el área de influencia, mostrando métricas de fragmentación: [A] Perímetro y [B] Relación Área- Perímetro. Los valores de las métricas se indican mediante el color de las barras.

En 2024, cerca del 44,6 % del área de influencia del PTAE corresponde a hábitat potencial para el yaguarundi, distribuido en 26 parches con tamaños que van desde 0,01 hasta 447 ha. Aunque este porcentaje es significativo, la configuración del paisaje revela un escenario de alta fragmentación, donde predominan fragmentos pequeños (41,8 % menores a 100 ha) y con valores reducidos de área núcleo (promedio de 23,6 ha). Estos rasgos limitan la calidad interior del hábitat y lo hacen más susceptible a efectos de borde (McGarigal & Marks, 1995).

A pesar de esta fragmentación, el yaguarundi se caracteriza por su flexibilidad en el uso de hábitats y su capacidad de desplazarse en paisajes heterogéneos, incluyendo zonas agrícolas y periurbanas (Payán & Soto, 2012; Coronado-Quibrera et al., 2019). Esto sugiere que la especie puede mantener cierta funcionalidad en el área de estudio, siempre y cuando los parches grandes y mejor conservados —localizados en la zona central y nororiental— continúen funcionando como núcleos de conectividad.

El valor del índice Mesh (92,8 % de fragmentación) confirma la baja cohesión del paisaje, pero también resalta la importancia estratégica de los parches de mayor tamaño y forma regular. Según Saura y Rubio (2010), la conservación de estos fragmentos clave puede sostener la conectividad funcional incluso en paisajes altamente transformados.

1.3.2. Priorización de parches en el hábitat del Yaguarundi y contribución de los parches para mantener la conectividad

A continuación, se muestran los valores asignados de resistencia a las coberturas de la tierra digitalizadas para los años 2024 y 2024 para el puma (tabla 1). Con los valores de resistencia, se obtuvo un ráster de resistencia que se utilizó para el análisis de probabilidad de conectividad.

Tabla 1. Valores de resistencia de 1 a 100 asignados a las coberturas de la tierra para el puma yaguarundi.

Coberturas de la tierra	Resistencia
1.1.1. Tejido urbano continuo	100
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	95
1.2.1.1. Zonas industriales	100
1.2.2.1. Red vial y territorios asociados	80
1.3.2.4. Relleno sanitario	88
1.4.1. Zonas verdes urbanas	76
2.3.1. Pastos limpios	55
2.3.3. Pastos enmalezados	50
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	45
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	35
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	40
3.1.4. Bosque de galería y ripario	5
3.1.5. Plantación forestal	10
3.2.3.1 Vegetación secundaria alta	1
3.2.3.2 Vegetación secundaria baja	1

Los parches de hábitat, que tuvieron una mayor contribución al mantenimiento de la conectividad para el yaguarundi, se encuentran ubicados en la zona central y nororiental del área de influencia, los cuales se muestran de color verde oscuro, que corresponde a Vegetación secundaria alta (figura 3A). Los que presentan menor contribución, se muestran en color rojo, en la zona suroccidental y lado izquierdo y derecho de la zona central, que son los parches que se encuentran inmersos entre la cobertura de Tejido urbano continuo (figura 3A).

La fracción dPC intra (figura 3B) tuvo valores similares al dPC y al dIIC flux. Los cuales muestran que los parches de la zona central y nororiental del área de influencia, tienen una mejor conectividad interna y contribuyen mejor a mantener el flujo de la conectividad, los cuales se destacan en color verde oscuro (figura 3B y 3C). Por último, los parches de la zona norte del área de estudio, son los que se destacan como “Stepping stones” (figura 3D).

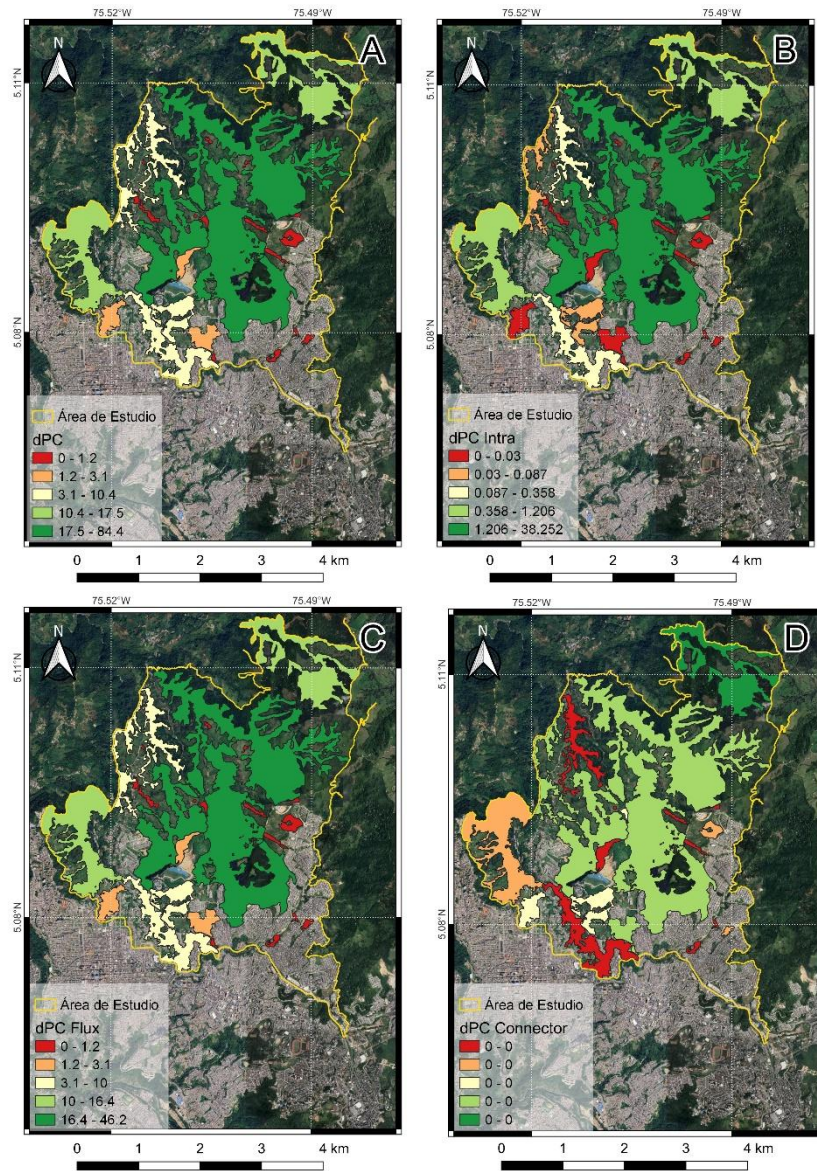


Figura 3. Mapa del hábitat actual del yaguarundi, mostrando [A] el dPC, [B] el dPC intra, [C] dPC flux y [D] dPC connector. Con una mediana de dispersión de 22 km. Los valores del índice están indicados por el color de las barras.

El análisis de priorización de parches evidenció que los fragmentos ubicados en la zona central y nororiental del área de estudio presentan los valores más altos de contribución a la conectividad (dPC, dPCintra y dPCflux). Estos parches coinciden con las coberturas de vegetación secundaria alta, que en el paisaje funcionan como núcleos de hábitat y como fuentes de dispersión hacia otros fragmentos. La relevancia de estos núcleos se alinea con lo planteado por Saura y Rubio (2010), quienes destacan que la conectividad de un paisaje depende en gran medida de unos pocos parches estratégicamente ubicados.

Por su parte, los parches pequeños e inmersos en coberturas urbanas y periurbanas mostraron baja contribución, lo cual refleja el efecto de la matriz antrópica como limitante de la conectividad. No obstante, algunos fragmentos en la zona norte se destacaron por su función de *stepping stones*, es decir, parches que, aunque de menor tamaño, cumplen un rol desproporcionado como conectores dentro de la red ecológica (Pascual-Hortal & Saura, 2006). Su conservación resulta clave, ya que su pérdida implicaría la desconexión de flujos entre los parches mayores.

Estos resultados confirman que, en paisajes fragmentados, no todos los parches aportan por igual a la conectividad: mientras algunos grandes fragmentos aseguran hábitat interno y recursos, otros pequeños pero estratégicos permiten mantener la cohesión del paisaje. En el caso del yaguarundí, especie de gran movilidad y tolerancia a matrices heterogéneas (Payán & Soto, 2012; Coronado-Quibrera et al., 2019), esta combinación de parches grandes y conectores intermedios es fundamental para sostener la dispersión y el flujo génico.

En síntesis, la priorización de parches en el área de influencia del PTAE evidencia que la gestión de la conectividad debe enfocarse en dos escalas complementarias: la protección y mantenimiento de los fragmentos más extensos y de mejor calidad, y la conservación de parches menores estratégicamente ubicados que actúan como nodos de enlace en la red.

1.3.3. Evaluación de la conectividad dinámica con MK_dECA()

El análisis de conectividad dinámica mediante el índice de Área Conectada Equivalente (ECA) evidenció un aumento en la proporción de hábitat disponible y en la conectividad del paisaje entre 2020 y 2024. En 2020, el área de hábitat identificada fue de 745,1 ha, con un valor de ECA de 585,6 ha, lo que correspondió a un 33,8 % del paisaje. Para 2024, el hábitat aumentó a 769,1 ha y el ECA a 621,0 ha, equivalente al 35,8 % del paisaje. Esto representa un incremento relativo en la conectividad ($dECA = 6,05 \%$) superior al aumento proporcional del

área de hábitat ($dA = 3,22 \%$). La relación $dECA/dA$ fue mayor a 1, lo que indica que la ganancia de conectividad fue más eficiente que la simple ganancia en superficie de hábitat.

La figura 4 muestra cómo, pese a que la proporción de hábitat disponible pasó de 43 % en 2020 a 44,4 % en 2024, la fracción de hábitat efectivamente conectado dentro del área de influencia aumentó de 33,8 % a 35,8 %, reflejando una mejora en la cohesión espacial de los fragmentos.

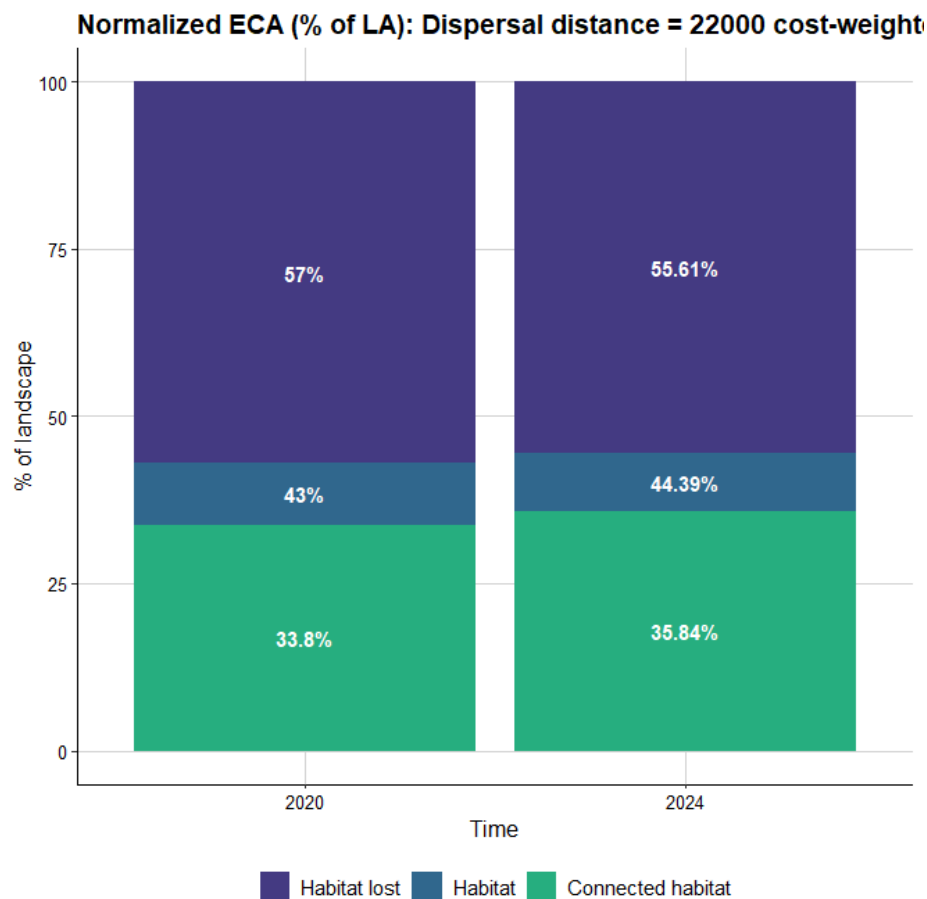


Figura 4. Análisis del cambio en el Área conectada equivalente (dECA), para el puma yaguarundi, utilizando una distancia de dispersión de 22 km.

Tabla 2. Resultados del análisis de conectividad dinámica (ECA) para el puma yaguarundi en el área de estudio.

Año	Superficie de hábitat (ha)	ECA (ha)	ECA normalizado (% del paisaje)	Variación de hábitat (dA, %)	Variación de conectividad (dECA, %)	Relación dECA/dA	Tipo de cambio
2020	745,1	585,6	33,8	-56,99	-66,20	1,16	Pérdida de conectividad
2024	769,1	621,0	35,8	3,22	6,05	1,88	Ganancia de hábitat y conectividad

Los resultados sugieren que, entre 2020 y 2024, no solo se incrementó la superficie de hábitat para *H. yagouarundi*, sino que dicho aumento se tradujo en una mejora proporcionalmente mayor en la conectividad ecológica del paisaje. Este patrón ($dECA > dA$) indica que los fragmentos adicionales o el reacomodamiento espacial de la cobertura boscosa desempeñan un rol funcional en la red de hábitat, actuando como conectores o fortaleciendo la integración de los parches ya existentes.

Para una especie como el yaguarundí, caracterizada por amplios desplazamientos y requerimientos de conectividad para mantener el flujo génico y la dispersión, la mejora en el índice ECA resulta particularmente relevante. La ganancia de conectividad observada podría favorecer la persistencia poblacional y la movilidad de individuos dentro del área de influencia, reduciendo los riesgos de aislamiento. Este hallazgo concuerda con lo planteado por Saura et al. (2011) y Murillo-Sandoval et al. (2022), quienes destacan que pequeñas ganancias en hábitat, cuando se ubican estratégicamente, pueden generar incrementos significativos en la conectividad funcional de los paisajes fragmentados.

1.4. Conclusiones

1. El área de influencia del Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda conserva una proporción importante de hábitat potencial para el yaguarundí (*Herpailurus yagouarundi*), equivalente al 44,6 % del paisaje. Sin embargo, este hábitat se encuentra altamente fragmentado en 26 parches, predominando fragmentos pequeños e irregulares con baja proporción de área núcleo, lo que refleja un escenario vulnerable frente a los efectos de borde y la presión antrópica.
2. La priorización de parches mostró que la conectividad del paisaje depende en gran medida de unos pocos fragmentos de vegetación secundaria alta localizados en la zona central y nororiental, que funcionan como núcleos principales de hábitat y como fuentes de dispersión. A su vez, algunos parches de menor tamaño cumplen un papel estratégico

como stepping stones, destacando la importancia de conservar tanto fragmentos extensos como conectores intermedios.

3. El análisis de conectividad dinámica (ECA) entre 2020 y 2024 evidenció que, pese a la alta fragmentación, la red de hábitat mostró una ligera ganancia en conectividad relativa ($dECA = 6,05 \%$) superior al aumento de la superficie de hábitat ($dA = 3,22 \%$). Esto indica que los cambios en la configuración espacial de los fragmentos favorecieron la cohesión de la red, lo que resulta especialmente relevante para una especie de amplia movilidad como el yaguarundí.
4. En conjunto, los resultados sugieren que el hábitat del yaguarundí en el área de estudio no se encuentra en un estado crítico, pero sí en una condición vulnerable, donde la persistencia de la especie dependerá de mantener la integridad de los parches principales y de garantizar la función de los fragmentos conectores.
5. Estos hallazgos aportan insumos valiosos para la planificación territorial y la gestión ambiental en el orobioma andino del Cauca medio. La conservación de los parches estratégicos identificados y la implementación de medidas que reduzcan la pérdida de conectividad pueden contribuir no solo a la persistencia del yaguarundí, sino también al mantenimiento de la biodiversidad y los procesos ecológicos en paisajes altamente transformados.

1.4.1. Material anexo

```
library(Makurhini)
library(sf)
library(terra)
library(raster)
library(sp)
library(dplyr)
```

```
#####ANALISIS FRAGMENTACION#####
```

```
vegetation_patches <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad
ecologica/Trabajo final/Sig/Coberturas/2024/Puma/Habitat_puma_2024_disuelto.shp")
```

```
nrow(vegetation_patches)
```

```
plot(st_geometry(vegetation_patches), col = "#00B050")
```

```
####area de estudio
```

```
paisaje <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad ecologica/Trabajo
final/Sig/Coberturas/area_estudio.shp")
```

```
area_paisaje <- st_area(paisaje)
```

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

```
Fragmentation_test <- MK_Fragmentation(nodes = vegetation_patches, edge_distance = 10,
                                         plot = TRUE, min_node_area = 100,
                                         landscape_area = area_paisaje, area_unit = "ha",
                                         perimeter_unit = "km", write = NULL)
```

```
class(Fragmentation_test)
```

```
Fragmentation_test$`Summary landscape metrics (Viewer Panel)`
```

```
#####visualizacion#####
```

```
tabla_list <- st_drop_geometry((Fragmentation_test[["Patch statistics shapefile"]]))
```

```
tabla_lista <- st_drop_geometry((Fragmentation_test[["Summary landscape metrics (Viewer
Panel)"]]))
```

```
###Exportar la tabla con xlsx
```

```
install.packages("csv")
```

```
library(csv)
```

```
write.csv(data.frame(tabla_list), "resultado_parche_Yaguarundi_2024.csv")
```

```
write.csv(data.frame(tabla_lista), "resultado_paisaje_Yaguarundi_2024.csv")
```

```
###%mesh#####
```

```
mesh <- as.data.frame(Fragmentation_test[[1]])
```

```
mesh <- mesh[13,2]
```

```
mesh_porcentage <- (area_paisaje - mesh) * 100 / area_paisaje
```

```
mesh_porcentage
```

```
#####PROBABILIDAD DE CONECTIVIDAD#####
```

```
##parches
```

```
vegetation_patches <- st_read("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Coberturas/2024/Puma/Habitat_puma_2024_disuelto.shp")
```

```
vegetation_patches <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Coberturas/2024/Puma/Habitat_puma_2024_disuelto.shp")
```

```
##area estudio
```

```
paisaje <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad ecologica/Trabajo  
final/Sig/Coberturas/area_estudio.shp")
```

```
area_paisaje <- st_area(paisaje)
```

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

```
#raster de resistencia cargado y convertido
```

```
resistance_terra <- rast("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Analisis_resistencia/2024/resistenciapuma_2024.tif")
```

```
resistance_raster <- raster(resistance_terra) # para usar con Makurhini
```

```

PC <- MK_dPCIIC(nodes = vegetation_patches,
  attribute = NULL,
  area_unit = "ha",
  distance = list(
    type = "least-cost",
    resistance = resistance_raster
  ),
  parallel = NULL,
  LA = area_paisaje,
  overall = TRUE,
  metric = "PC",
  probability = 0.5,
  distance_thresholds = 22000,
  intern = TRUE)

```

PC

```

resultado <- st_drop_geometry(PC)
resultado <- st_drop_geometry((PC[["node_importances_d22000"]]))
PC[["overall_d22000"]]
write.csv(data.frame(resultado), "resultado_puma_PC.csv")

```

#####CONECTIVIDAD DINAMICA#####

#####calculo de MK_dECA#####

##parches

```

T2020 <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad ecologica/Trabajo
final/Sig/Coberturas/2020/puma/Habitat_puma_2020_disuelto.shp")

```

```

T2024 <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad ecologica/Trabajo
final/Sig/Coberturas/2024/Puma/Habitat_puma_2024_disuelto.shp")

```

```

lista_parches <- list("2020" = T2020, "2024" = T2024)

```

```
###area de estudio
```

```
area_estudio <- read_sf("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Coberturas/area_estudio.shp")
```

```
Max_atributo <- st_area(area_estudio)* 0.0001 # Hectáreas
```

```
Max_atributo
```

```
Max_atributo <- unit_convert(st_area(area_estudio), "m2", "ha")
```

```
###resistencias
```

```
resistance_terra <- rast("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Analisis_resistencia/2020/resistenciapuma_2020.tif")
```

```
resistance_raster2020 <- raster(resistance_terra) # para usar con Makurhini
```

```
resistance_terra <- rast("E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Analisis_resistencia/2024/resistenciapuma_2024.tif")
```

```
resistance_raster2024 <- raster(resistance_terra) # para usar con Makurhini
```

```
dECA_test <- MK_dECA(nodes= lista_parches, attribute = NULL, area_unit = "ha",  
  distance = list(type= "least-cost", resistance = list (resistance_raster2020,  
resistance_raster2024)), metric = "PC",  
  probability = 0.05, distance_thresholds = 22000,  
  LA = Max_atributo, plot= c("2020", "2024"),  
  intern = TRUE)
```

```
dECA_test
```

```
####exportar estos resultados a excel####
```

```
install.packages("openxlsx")
```

```
library(openxlsx)
```

```
write.xlsx(dECA_test[[1]], "E:/JULIANA/Material conectividad/Curso conectividad  
ecologica/Trabajo final/Sig/Conectividad dinamica/ECA_puma.xlsx")
```


1.5. Bibliografía

Avon, C., & Bergès, L. (2016). Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. *Landscape ecology*, 31, 1551-1565.

Betancur, L.F. (2023). Análisis del programa de comunicación externa de la Empresa Metropolitana de Aseo, para la aceptación del Relleno Sanitario La Esmeralda en las comunidades de Puerta del Sol y Palonegro de la ciudad de Manizales. [Tesis de Maestría] Universidad de Manizales. Manizales.

Bowman, J., Jaeger, J. A., & Fahrig, L. (2002). Dispersal distance of mammals is proportional to home range size. *Ecology*, 83(7), 2049-2055.

Cáceres-Martínez, C. H., Serna-Ovallos, C. A., Cabrera-Pacheco, J. A. & Cano-Castaño, N. (2022). Caracterización de fauna (aves, mamíferos, reptiles, anfibios) y flora en el Parque Tecnológico Ambiental La Esmeralda – Manizales, Caldas. Informe técnico, EMAS.

Caso, A., de Oliveira, T. & Carvajal, S.V. 2015. *Herpailurus yagouaroundi*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2015: e.T9948A50653167. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-2.RLTS.T9948A50653167.en>. Accessed on 27 December 2024.

CITES. 2023. Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestres. Apéndices I, II y III.

Coronado-Quibrera, W. P., Olmos-Oropeza, G., Bender, L. C., Rosas-Rosas, O. C., Palacio-Núñez, J., Tarango-Arámbula, L. A., & Herrera-Haro, J. G. (2019). Adaptability of the threatened jaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi* Schreber, 1777) to human-altered environments in San Luis Potosí, Mexico. *Acta zoológica mexicana*, 3

Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 34(1), 487-515.

Godínez-Gómez, O., Correa-Ayram, C., Goicolea, T., & Saura, S. (2025). Makurhini: An R package for comprehensive analysis of landscape fragmentation and connectivity.

IDEAM (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

Kasper, C. B., Schneider, A., & Oliveira, T. G. (2016). Home range and density of three sympatric felids in the Southern Atlantic Forest, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 76(1), 228-232.

McGarigal, K., Marks, B.J. 1995. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1-122.

Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., & Correa-Ayram, C. (2022). Rapid loss in landscape connectivity after the peace agreement in the Andes-Amazon region. *Global Ecology and Conservation*, 38, e02205.

Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V., Underwood, E.C., Kassem, K.R., 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience* 51(11), 933-938.

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, 959-967.

Payán G., y Soto V. (2012). Los Felinos de Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y Panthera Colombia. 30-32pp.

QGIS Development Team., 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Versión 3.28. Disponible en: <https://qgis.org/es/site/>.

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Versión 4.0.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

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. *Ecography*, 33(3), 523-537.

Superservicios. (2018). Informe de seguimiento a sitios de disposición final con vida útil menor a 3 años Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P. “Relleno Sanitario La Esmeralda. Superintendencia Delegada para Acueducto Alcantarillado y Aseo, Bogotá.