UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Metodología de monitoreo funcional y estructural en áreas de compensación del componente biótico a través de herramientas de ecología del paisaje.

Juliana Puerta Manotas

Informe final de práctica para optar al título de Ingeniera Ambiental

Modalidad de Práctica
Semestre de Industria o Práctica Empresarial

Asesora Interna
Lina María Berrouet Cadavid, PhD

Asesora Externa
Catalina Roldan Pérez, MSc

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Medellín
2026

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Cita	(Puerta Manotas, 2026)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Puerta Manotas, J. (2026). *Metodología de monitoreo funcional y estructural en áreas de compensación del componente biótico a través de herramientas de ecología del paisaje.* [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, por ser la base que ha sostenido cada uno de mis pasos y el motor que impulsa mis metas. A mis padres, por su amor incondicional, su paciencia y su ejemplo incansable de constancia y fortaleza; a ellos les debo la disciplina y el compromiso que han guiado este camino. A quienes han creído en mí incluso en los momentos de incertidumbre, gracias por recordarme que los sueños se construyen con esfuerzo, dedicación y esperanza. Este logro es tan mío como de ustedes, porque cada palabra, cada idea y cada avance reflejan el apoyo, el cariño y la confianza que siempre me han brindado.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a la Universidad de Antioquia y al programa de Ingeniería Ambiental por brindarme las herramientas académicas, metodológicas y humanas que hicieron posible este trabajo. A mis asesoras, Lina María Berrouet Cadavid y Catalina Roldán Pérez, por su guía, sus aportes técnicos, su disposición constante y su acompañamiento cercano, que enriquecieron de manera invaluable el desarrollo de esta investigación. A ISA INTERCOLOMBIA, por facilitar el acceso a la información, por su apoyo técnico y por la oportunidad de comprender de primera mano los retos y alcances de la gestión ambiental aplicada al territorio. Finalmente, agradezco a cada persona que, directa o indirectamente, aportó a este proceso: compañeros, amigos y familiares que con sus palabras de ánimo, compañía o escucha hicieron más llevadero el camino. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo que atesoro con gratitud y profundo respeto.

Tabla de contenido

Resumen..... 9
Abstract..... 10
1. Introducción..... 11
2. Objetivos..... 13
2.1 Objetivo general..... 13
2.2 Objetivos específicos..... 13
3. Marco teórico..... 14
3.1. Compensaciones en el componente biótico..... 14
3.2. Plan de compensación del componente biótico..... 15
3.3. Sistemas de información geográfica..... 16
3.4. Ecología y análisis del paisaje..... 16
4. Marco contextual..... 18
5. Metodología..... 20
5.1. Área de estudio..... 20
5.2. Revisión de información inicial..... 21
5.3. Especie de interés para el estudio..... 21
5.4. Variables del modelo y procesamiento..... 22
5.4.1. Preprocesamiento de Imágenes satelitales..... 22
5.4.2. Clasificación de coberturas..... 23
5.4.3. Preparación de capas..... 24
5.5. Análisis Estructural del paisaje..... 25
5.6. Matriz de resistencia..... 26
5.7. Conectividad..... 27
6. Análisis de resultados..... 28
6.1. Revisión de información inicial..... 28
6.2. Coberturas de la tierra..... 29
6.2. Preparación de capas..... 31
6.2.1. Distancia a sección vial..... 31
6.2.2. Distancia a drenajes..... 32
6.2.3. Áreas núcleo..... 33
6.4. Análisis estructural del paisaje..... 34
6.4. Matrices de resistencia..... 37
6.4.1. Simple..... 37
6.4.2. Ponderadas..... 39
6.5. Conectividad..... 41

6.5.1. Superficie de costo acumulado.....41
6.5.2. Rutas de menor costo.....42
6.5.2. Corredores teóricos.....43
7. Recomendaciones y conclusiones..... 45
7.1. Recomendaciones..... 45
7.2. Conclusiones.....46
Referencias..... 48

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de resistencia para las coberturas 24

Tabla 2. Información de las capas temáticas 24

Tabla 3. Escalas de comparación de Saaty 27

Tabla 4. Coberturas de la tierra para el T0 28

Tabla 5. Índices estructurales para T0 y T1 36

Tabla 6. Jerarquización de las variables condicionantes para la matriz de resistencia ponderada – Predios Santa Lucia y Arenoso. 39

Tabla 7. Jerarquización de las variables condicionantes para la matriz de resistencia ponderada – Predio Esmeralda. 39

Lista de figuras

Figura 1. Localización de áreas de compensación bióticas de ISA INTERCOLOMBIA. 19

Figura 2. Áreas de compensación proyecto BEMI. 20

Figura 3. Coberturas de la tierra rasterizadas para T0 y T1 30

Figura 4. Resistencia de movimiento asociada a la distancia de vías 32

Figura 5. Resistencia de movimiento asociada a la distancia de drenajes 33

Figura 6. Áreas núcleo optimas en T0 y T1 34

Figura 7. Coberturas de bosque en T0 y T1 35

Figura 8. Matrices de resistencia simple en T0 y T1 38

Figura 9. Matrices de resistencia ponderada en T0 y T1 40

Figura 10. Superficie de costo acumulado en T0 y T1 42

Figura 11. Rutas de menor costo en T0 y T1 43

Figura 12. Corredores teóricos en T0 y T1 44

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CPPB	Plan de compensaciones del componente biótico.
SiB Colombia	Sistema de Información de Biodiversidad de Colombia.
POA	Proyecto, obra o actividad.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
PSA	Pagos por Servicios Ambientales.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño y aplicación de una metodología para el monitoreo estructural y funcional de las áreas de compensación asociadas al proyecto “Línea de Interconexión Eléctrica Betania–Mirolindo a 230 kV” (BEMI), mediante el uso de herramientas de ecología del paisaje y análisis espacial. El estudio integra imágenes Sentinel-2, clasificación supervisada de coberturas, métricas de estructura del paisaje, matrices de resistencia y modelación de conectividad con el fin de evaluar las condiciones del territorio en dos temporalidades: T0 (2024) y T1 (2025). Los resultados muestran que no se evidenciaron cambios detectables en las coberturas de la tierra durante el primer año de implementación, debido a la resolución temporal de los insumos y al carácter gradual de los procesos de restauración ecológica. Sin embargo, el análisis estructural reveló diferencias significativas entre predios en términos de fragmentación, densidad de borde y disponibilidad de áreas núcleo. La matriz de resistencia ponderada permitió identificar la importancia relativa de variables como la distancia a drenajes y la presencia de vías en la movilidad de la especie animal *Cuniculus paca* para todos los predios, mientras que la conectividad funcional solo pudo modelarse en uno de ellos, único con múltiples núcleos de hábitat. La metodología demostró ser robusta y replicable; no obstante, se concluye que para evaluar la evolución real de las compensaciones año a año es necesario emplear imágenes de mayor resolución o ampliar el periodo de monitoreo más allá de un año.

Palabras clave: Ecología del paisaje, conectividad, compensaciones bióticas, SIG, restauración ecológica.

Abstract

This study presents the design and implementation of a methodology for monitoring the structural and functional dynamics of compensation areas associated with the project "Línea de Interconexión Eléctrica Betania–Mirolindo a 230 kV" (BEMI), using landscape ecology tools and spatial analysis. The approach integrates Sentinel‑2 imagery, supervised land‑cover classification, landscape structural metrics, resistance surface modeling, and connectivity analysis to evaluate the territory across two temporal baselines: T0 (2024) and T1 (2025). Results indicate that no detectable changes occurred in land‑cover patterns during the first year of implementation, mainly due to the temporal resolution of the data and the gradual nature of ecological restoration processes. Nevertheless, the structural analysis revealed marked differences among the study sites in terms of fragmentation, edge density, and availability of core habitat areas. The weighted resistance matrix, based on the Analytic Hierarchy Process, highlighted the relevance of distance to watercourses and the presence of roads in shaping the mobility of *Cuniculus paca*. Functional connectivity could only be modeled in one of three sites, as it was the only area containing multiple suitable habitat cores. Overall, the methodology proved robust and replicable; however, findings suggest that assessing the ecological progression of compensation measures year by year requires the use of higher‑resolution imagery or a monitoring period longer than one year to capture detectable landscape changes.

Keywords: landscape ecology, connectivity, biotic compensation, GIS, ecological restoration.

1. Introducción

Colombia ha experimentado un crecimiento económico significativo en los últimos años, lo que ha impulsado la ejecución de nuevos proyectos, obras o actividades (POA) en todo el territorio nacional. Este dinamismo se refleja en el aumento de solicitudes de licencias ambientales, permisos, autorizaciones y concesiones para el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables. En este contexto, se vuelve indispensable la aplicación de medidas de prevención, mitigación, corrección y compensación, en el marco de la jerarquía de la mitigación, para garantizar que el desarrollo no comprometa la integridad ecológica del país. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Uno de los sectores que ha cobrado mayor relevancia es el de la transmisión de energía, considerado vital para el desarrollo y la conectividad nacional. ISA INTERCOLOMBIA, reconocida por su compromiso con la sostenibilidad, ha liderado este proceso al transmitir más de 12.100 km de líneas de alto voltaje que conectan a más de 400 municipios. Su enfoque en la gestión ambiental responsable ha llevado a implementar planes de compensación que buscan restaurar y conservar los ecosistemas afectados por sus proyectos.

Colombia, como cuarto país más biodiverso del mundo y líder en diversidad de aves, orquídeas y mariposas (SiB Colombia, 2020), enfrenta el reto de conservar su riqueza biológica frente a las presiones del desarrollo. Los planes de compensación ambiental surgen como una respuesta técnica y normativa para resarcir los impactos negativos no mitigables, mediante acciones que aseguren la restauración y el uso sostenible de los ecosistemas. Sin embargo, para que estas medidas sean efectivas, es necesario garantizar su perdurabilidad en el tiempo y su capacidad de generar beneficios reales para la biodiversidad y las comunidades.

En este sentido, el monitoreo y seguimiento de las medidas de compensación se convierte en una herramienta clave para evaluar su efectividad. Hasta ahora, este proceso se ha centrado en indicadores estructurales que describen la configuración espacial de las áreas intervenidas. No obstante, para comprender de manera más profunda si las compensaciones están cumpliendo su propósito, es necesario incorporar el análisis funcional del paisaje, que permita evaluar los procesos ecológicos y la conectividad entre los ecosistemas.

La ecología del paisaje ofrece un enfoque integrador para el análisis de los sistemas socio ecológicos, al estudiar la interacción entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos. A través de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el uso de imágenes satelitales, es posible identificar patrones de fragmentación, conectividad, diversidad y funcionalidad, lo que resulta fundamental para diseñar estrategias de compensación más efectivas y adaptativas. (Esri, 2025)

Por tanto, esta propuesta de práctica tuvo como objetivo fortalecer el monitoreo funcional y estructural de los ecosistemas intervenidos en los planes de compensación de ISA INTERCOLOMBIA, mediante el uso de herramientas de ecología del paisaje. Se buscó integrar el análisis espacial con indicadores ecológicos que permitan evaluar la efectividad de las medidas implementadas, generar información técnica para la toma de decisiones y contribuir a la conservación de la biodiversidad en el marco del desarrollo Sostenible.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Construir una metodología de monitoreo para los planes de compensación del componente biótico a través del uso de herramientas de ecología del paisaje que permita cuantificar los avances en el cumplimiento de los objetivos, metas e indicadores.

2.2 Objetivos específicos

- Calcular indicadores de funcionalidad ecológica en las áreas de compensación correspondientes al momento inicial de implementación, con el fin de verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el plan de compensación.

- Evaluar indicadores estructurales y funcionales en las áreas de compensación en su estado actual, para determinar la efectividad de las medidas implementadas y su contribución a la restauración ecológica.

- Diseñar un sistema de registro y seguimiento periódico de los indicadores funcionales y estructurales, que permita monitorear el cumplimiento de metas y objetivos, y facilite la toma de decisiones adaptativas en la gestión de compensaciones.

3. Marco teórico

La implementación de cualquier proyecto, obra o actividad (POA) conlleva transformaciones inevitables en el territorio, las cuales pueden manifestarse de forma positiva o negativa, afectando tanto a los ecosistemas como a las comunidades humanas que los habitan. Estas transformaciones no solo alteran la estructura física del entorno, sino que también inciden en los procesos ecológicos, sociales y económicos que lo sostienen. Por esta razón, es fundamental que los impactos negativos sean gestionados de manera estratégica, buscando reducir su magnitud y alcance en la mayor medida posible. Esta gestión debe ser proactiva, anticipándose a los efectos adversos y priorizando la conservación de los valores ecológicos y sociales del territorio.

En este contexto, se aplica la jerarquía de la mitigación, entendida como una secuencia lógica de medidas orientadas a manejar los impactos ambientales generados por un POA. Esta jerarquía establece un orden de intervención que inicia con la prevención de los impactos, continúa con su minimización y corrección, y culmina, solo cuando las anteriores no son viables, con la compensación (MADS, 2018). Esta se convierte en una medida de último recurso, pero no por ello menos importante, ya que busca equilibrar las pérdidas inevitables mediante acciones que generen beneficios equivalentes o superiores para el ambiente. La jerarquía debe ser aplicada desde las etapas iniciales de planificación y diseño del proyecto, asegurando que las decisiones se tomen con base en criterios técnicos, ecológicos y sociales que garanticen la sostenibilidad del desarrollo.

3.1. Compensaciones en el componente biótico

Las compensaciones ambientales, en este marco, se definen como el conjunto de acciones orientadas a restituir los beneficios ecológicos, sociales y territoriales que han sido afectados por impactos negativos no mitigables. Estas acciones no solo buscan reparar el daño, sino también generar un valor agregado para la biodiversidad, las comunidades y el paisaje. La compensación se convierte así en una herramienta clave para garantizar que el desarrollo no implique una pérdida neta de biodiversidad, sino que, por el contrario, contribuya a su conservación y uso sostenible. (MADS, 2018)

Es importante reconocer que no todos los impactos pueden ser prevenidos, minimizados o corregidos. En muchos casos, la complejidad de los procesos ecológicos preexistentes, la

presencia de estructuras físicas permanentes o la transformación irreversible del uso del suelo hacen que la compensación sea la única alternativa viable. En estos casos, es fundamental diseñar estrategias de compensación que respondan a criterios técnicos rigurosos y que estén alineadas con los principios de equidad ecológica y funcionalidad del ecosistema.

3.2. Plan de compensación del componente biótico

El Plan de Compensaciones del Componente Biótico (CPPB) surge como una herramienta técnica y normativa que orienta la formulación e implementación de medidas de compensación para los impactos generados sobre la flora, la cobertura vegetal y el contexto paisajístico en los ecosistemas de un territorio. Este plan se aplica en el marco de las licencias ambientales, así como en las solicitudes de permisos de aprovechamiento forestal único y de sustracción de reservas forestales, tanto nacionales como regionales, cuando se presenta un cambio de uso del suelo.

Dos principios fundamentales orientan el diseño del CPPB: la No Pérdida Neta de Biodiversidad (NPNB) y la adicionalidad. El primero implica que las acciones de compensación deben equilibrar las pérdidas de biodiversidad generadas por el proyecto con ganancias equivalentes o superiores, asegurando que, en términos netos, no se reduzca la biodiversidad del territorio. El segundo principio, la adicionalidad, exige que las medidas implementadas generen beneficios adicionales al ecosistema, es decir, que no se limiten a mantener el estado actual, sino que contribuyan activamente a su mejora mediante acciones de conservación, restauración o uso sostenible. Para estructurar adecuadamente un CPPB, se hace uso del Manual de Compensaciones del Componente Biótico (MADS, 2018), el cual proporciona una guía detallada para responder a las preguntas clave del proceso: ¿Qué compensar?, ¿Cuánto compensar?, ¿Dónde compensar? y ¿Cómo compensar? Este manual, actualizado en 2018, integra criterios técnicos, ecológicos y normativos que permiten diseñar planes de compensación ajustados a las características específicas del territorio y del impacto generado.

La efectividad de los planes de compensación se evalúa mediante indicadores ambientales, los cuales permiten medir el cumplimiento de los objetivos establecidos y verificar si las acciones implementadas están generando los resultados esperados. Estos indicadores son herramientas técnicas que permiten sintetizar la información de la línea base y establecer niveles de referencia para los parámetros ambientales caracterizados. Además, facilitan la

estandarización de conceptos y metodologías, lo que contribuye a una evaluación más objetiva y comparable en el tiempo (MADS, 2022).

Por otro lado, durante la ejecución de los proyectos, pueden presentarse eventos no previstos que, aunque no sean frecuentes, pueden generar afectaciones significativas. Por ello, el seguimiento y monitoreo de los planes de compensación es una actividad esencial, ya que permite verificar la validez y confiabilidad de las acciones implementadas, identificar oportunidades de mejora y realizar los ajustes necesarios para garantizar la efectividad del plan. Este proceso debe ser continuo, sistemático y adaptativo, permitiendo una retroalimentación constante que fortalezca la gestión ambiental del proyecto.

3.3. Sistemas de información geográfica

En el proceso de monitorear y dar seguimiento a los planes de compensación, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) juegan un papel fundamental. Estas herramientas integran la ciencia geográfica con tecnologías de análisis espacial, permitiendo visualizar, analizar y comprender datos geoespaciales de manera eficiente. Los SIG facilitan la creación de mapas temáticos, la integración de múltiples fuentes de información y el análisis multitemporal de los cambios en el territorio. Esto los convierte en aliados estratégicos para el ordenamiento territorial, la planificación ambiental y el monitoreo de los impactos generados por los proyectos. Las imágenes satelitales, por su parte, son insumos clave en el análisis geoespacial. Estas permiten obtener una representación óptica y espectral del territorio, lo que facilita la identificación de coberturas, el análisis de cambios en el uso del suelo y la evaluación de la salud de los ecosistemas. Su integración en los SIG amplía las posibilidades de análisis y mejora la precisión de los diagnósticos ambientales, permitiendo una toma de decisiones más informada y basada en evidencia (Esri, 2025).

3.4. Ecología y análisis del paisaje

Finalmente, la ecología del paisaje aporta un enfoque integrador para el análisis de los sistemas socio ecológicos, al estudiar la interacción entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos. Esta disciplina combina elementos de la geografía, la ecología y los SIG, permitiendo comprender cómo se organizan y funcionan los ecosistemas en el espacio y el tiempo. A través del análisis del paisaje, es posible identificar patrones de fragmentación, conectividad, diversidad

y funcionalidad, lo que resulta clave para diseñar estrategias de conservación y compensación más efectivas. Dentro de la ecología del paisaje, se distinguen dos enfoques complementarios: el análisis estructural y el análisis funcional. El primero se enfoca en las características morfológicas del paisaje, como el área, el perímetro, la forma, la densidad y la distribución de los parches. Estos indicadores permiten evaluar la configuración espacial del territorio y su grado de fragmentación. El segundo enfoque, el análisis funcional, se centra en las interacciones ecológicas entre los componentes del paisaje, incluyendo el flujo de energía, materia y organismos. Este análisis permite entender cómo se conectan los ecosistemas, cómo se movilizan las especies y cómo se mantienen los procesos ecológicos esenciales. (Troll, 2003).

4. Marco contextual

ISA INTERCOLOMBIA es una empresa dedicada al transporte de energía de alto voltaje en Colombia, de carácter mixto (pública y privada) y está encargada de administrar, operar y mantener los activos electrónicos propiedad del conglomerado ISA. La empresa es el mayor transportador de energía en el país pues ha liderado este proceso al transmitir más de 12.100 km de líneas de alto voltaje, sus redes de transporte de energía se extienden a gran parte del territorio nacional y conectan a más de 400 municipios, aportando desarrollo y a la competitividad de los colombianos. (ISA INTERCOLOMBIA, 2025)

La empresa es reconocida por su compromiso con la sostenibilidad, logrando impactos ambientales y sociales positivos. Su enfoque en la gestión ambiental responsable ha llevado a implementar planes de compensación que buscan restaurar y conservar los ecosistemas afectados por sus proyectos. Actualmente, cuenta con 23 áreas en compensación en 18 biomas de bosque seco tropical, bosque seco montano bajo, bosque húmedo tropical, bosque húmedo premontano y bosque pluvial premontano, que se encuentran en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Bolívar, Boyacá, Caldas, Córdoba, Guajira, Huila, Magdalena, Sucre y Tolima. (ISA INTERCOLOMBIA, 2025). Estás áreas de compensación corresponden a los diferentes proyectos en operación, los cuales son:

- Conexión Antioquia - Medellín - Ancón Sur a 500/230 kV - AMA
- Línea de Transmisión Asociada a la Conexión Porce III - Sogamoso a 500 kV - POSO
- Ampliación de la subestación Porce III a 500 kV - SEPORCE
- Línea de Transmisión Asociada a la Conexión Antioquia- Porce III a 500 kV - ANPO
- Línea Interconexión Eléctrica Betania-Mirolindo 230 kV - BEMI
- Subestación San Antonio 230 kV y líneas de transmisión asociadas - SOSA
- Conexión Cerromatoso - Chinú - Copey a 500 kV - CECO
- Conexión Cerromatoso - Chinú - Copey a 500 kV - CECO
- Conexión Montería - Urabá a 230 kV - MONUR
- Subestación Caracolí 220kV y Líneas de Transmisión Asociadas - COLI
- Línea de Transmisión Cuestecitas - Majayura 230 kV - CUWI
- Líneas de Transmisión asociadas a la conexión Antioquia - Cerromatoso a 500kV – ANCE
- Línea de Transmisión Sabanalarga - Bolívar a 500kV - SABO

Cada uno de los proyectos mencionados se encuentra en distintas fases de avance, dado que su implementación se ha llevado a cabo en momentos diferentes. No obstante, de manera general, existen varios modos que se la empresa ha adoptado para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de los planes de compensación del componente biótico. Estos mecanismos se describen a continuación:

Acuerdos voluntarios de conservación: se formalizan mediante contratos civiles con propietarios de predios, en los cuales se establecen restricciones al uso de los ecosistemas y se incluyen incentivos orientados a promover la conservación.

Pagos por servicios ambientales (PSA): consisten en incentivos económicos o en especie otorgados a propietarios que desarrollan acciones de restauración y preservación ecológica en sus predios.

Arrendamiento: modalidad contractual en la que se paga al propietario por el uso temporal del predio, permitiendo la ejecución de actividades de compensación ambiental.

Usufructo: acuerdo mediante el cual el propietario concede el derecho de uso parcial o total de su predio, por un tiempo determinado, con fines de conservación y restauración de la biodiversidad.

Adquisición de predios: implica la compra directa de terrenos destinados a la implementación de acciones de preservación y restauración ecológica. (ISA INTERCOLOMBIA, 2025).

Figura 1.

Localización de áreas de compensación bióticas de ISA INTERCOLOMBIA.

Fuente: Tomado de ISA INTERCOLOMBIA, 2024.

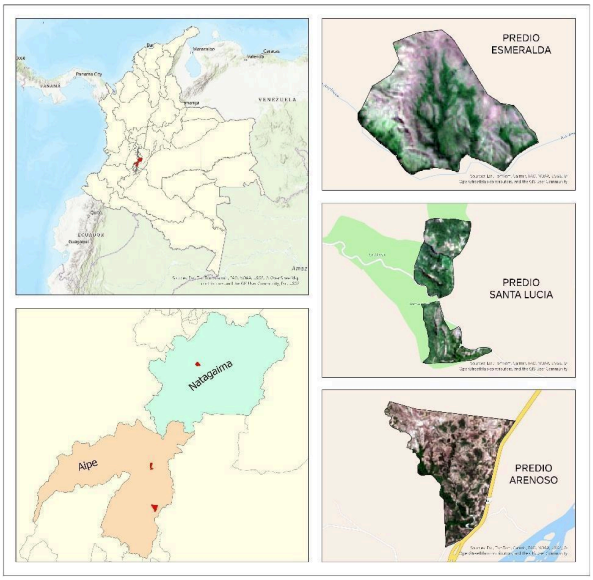
5. Metodología

5.1. Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el marco del Plan de Compensación del Componente Biótico asociado al proyecto "Línea de Interconexión Eléctrica Betania–Mirolindo a 230 kV" (BEMI), el cual contempla la compensación de 323.9 hectáreas distribuidas en los municipios de Natagaima (Tolima) y Aipe (Huila). La totalidad del área se encuentra actualmente en fase de implementación, mantenimiento y monitoreo, lo que permite evaluar de manera comparativa las condiciones iniciales y el primer año de ejecución. Los modos de compensación de esta alternativa son usufructo y acuerdos de conservación, los cuales se nutren por medio de acciones de preservación, enriquecimiento y restauración. Las áreas de compensación se sitúan en los biomas: Orobioma bajo de los Andes y Zonobioma alternohígrico y/o subxer. El plan de compensación está compuesto por tres predios, cuyos límites y distribución espacial se ilustran en la Figura 2. Estos son: El predio Esmeralda ubicado en Natagaima, que cuenta con un área de 91.38 ha y los predios Santa Lucia y Arenoso ubicados en Aipe, cuyas áreas son 163,90 ha y 68.62 ha respectivamente.

Figura 2.

Áreas de compensación proyecto BEMI.



Fuente. Elaboración propia, adaptado de ISA INTERCOLOMBIA, 2024.

Cada uno de ellos presenta variaciones en cobertura, estado de conservación y grado de presión antrópica, lo cual influye en la estructura del paisaje y en los patrones de conectividad ecológica.

Para el análisis multitemporal se establecieron dos momentos de referencia:

- T0 (julio 2024): inicio de la implementación del CPPB.
- T1 (julio 2025): primer año de implementación, periodo en el cual se han adelantado acciones de cerramiento, preparación de suelos y establecimiento de siembras.

5.2. Revisión de información inicial

Para el desarrollo del análisis se recopiló y verificó la información suministrada por la empresa contratista responsable de la caracterización biótica utilizada en la formulación del CPPB. Esta información constituyó la base del momento T0, correspondiente al inicio de la implementación del plan de compensación.

El insumo principal consistió en la capa vectorial de coberturas de la tierra, elaborada a partir de la línea base del CPPB. Esta capa fue sometida a un proceso de revisión espacial y temática con el fin de garantizar su consistencia frente a las condiciones actuales del área de estudio. Para complementar y validar esta información se integraron:

- Imágenes satelitales recientes, utilizadas para contrastar y actualizar la distribución de coberturas.
- Poligonos temáticas complementarias que incluyen la red vial, superficies de agua, las cuales fueron incorporadas para mejorar el detalle del análisis espacial y facilitar la identificación de variables relevantes para la movilidad de la fauna objetivo.

La revisión inicial permitió depurar, armonizar y ajustar los insumos geoespaciales que posteriormente serían empleados en la clasificación de coberturas, la construcción de matrices de resistencia y la modelación de conectividad. Este proceso garantizó que los análisis posteriores se realizaran sobre una base cartográfica confiable y coherente con la realidad del territorio.

5.3. Especie de interés para el estudio

Para el análisis de conectividad ecológica se seleccionó como especie focal a *Cuniculus paca*, especie presente en la caracterización biótica del CPPB, es un roedor de amplia

distribución en Colombia, presente desde los 0 hasta los 2000 m.s.n.m. (SiB Colombia, s.f.). Su elección se fundamenta en dos criterios principales: (i) su alta representatividad en los ecosistemas presentes en el área de estudio, y (ii) su papel ecológico como dispersor de semillas y regulador de la estructura del hábitat, aspectos documentados ampliamente en la literatura científica (Cartaya & Anchundia, Universidad politécnica Saleciana Ecuador, 2017).

De acuerdo con estudios sobre su ecología espacial, *C. paca* presenta preferencia por zonas cercanas a cuerpos de agua, utiliza áreas de refugio bien cubiertas y exhibe patrones de movilidad adaptativa a cambios en la vegetación y a la presencia de barreras antrópicas. Estas características la convierten en un individuo adecuado para evaluar la funcionalidad del paisaje y la efectividad de las medidas de compensación en términos de conectividad.

Dado que su movilidad depende tanto de los atributos estructurales del paisaje como de la disponibilidad de coberturas continuas, *C. paca* resulta particularmente útil para evaluar cómo los cambios en el territorio, a causa de las actividades de compensación, influyen en el movimiento potencial de fauna entre los parches de hábitat. Su integración en el modelo permite estimar la funcionalidad de los corredores ecológicos, identificar áreas críticas para la conexión entre núcleos de bosque y determinar zonas de mayor restricción al movimiento.

5.4. Variables del modelo y procesamiento

5.4.1. Preprocesamiento de Imágenes satelitales

Para la caracterización multitemporal se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2, descargadas desde Copernicus Browser, seleccionando productos con una nubosidad ≤ 30% y de Nivel-2A debido a que corresponden a reflectancia superficial (SR) corregida atmosféricamente mediante el algoritmo Sen2Cor. Esta elección garantiza una mayor precisión radiométrica y facilita el análisis comparativo entre fechas.

Posterior a su descarga, en el software ArcGIS Pro, se realizó una composición de bandas con la herramienta Composite band para genear una visualización RGB (4-3-2). Se utilizó la herramienta Clip para extraer solo las áreas de interés, optimizando así el procesamiento posterior.

Este preprocesamiento permitió garantizar coherencia espectral y facilitar la identificación de patrones de cobertura para la clasificación supervisada y la construcción de insumos raster para los análisis estructurales y funcionales del paisaje.

5.4.2. Clasificación de coberturas

La clasificación de coberturas se desarrolló de manera diferenciada para las dos temporalidades analizadas (T0 y T1), debido a que los insumos disponibles y los métodos aplicados variaron entre ambos momentos.

T0: Para el momento T0 se emplearon las coberturas ajustadas suministradas por la empresa contratista encargada de la línea base del CPPB (Sección 5.2). Estas correspondían a una clasificación previamente validada en campo y ajustada a las condiciones biofísicas de los predios. Debido a su nivel de detalle y precisión temática, esta capa se adoptó directamente como insumo oficial para el análisis estructural y para la construcción inicial de las matrices de resistencia.

T1: El procesamiento para T1 se basó en una clasificación supervisada elaborada a partir de las imágenes Sentinel-2 preprocesadas y la capa CoberturaTierra, usada como referencia para la generación de muestras de entrenamiento.

Se digitalizó una capa de puntos semilla sobre la imagen satelital, asegurando que cada punto correspondiera a píxeles homogéneos y representativos de cada clase. Estos puntos permitieron construir las firmas espectrales mediante la herramienta Create Signatures, obteniendo así un archivo .gsg que sintetizó la variabilidad espectral de cada cobertura. Estos puntos se digitalizaron manualmente sobre la imagen procesada, garantizando que cada muestra correspondiera a píxeles homogéneos y representativos de su respectiva clase de cobertura. Posteriormente, la clasificación se realizó mediante el algoritmo Maximum Likelihood Classification (MLC), que asigna a cada píxel la clase con mayor probabilidad estadística de pertenencia. El resultado fue un raster preliminar con la distribución espacial de coberturas para T1. El raster inicial presentó algunas imperfecciones propias del método supervisado, por lo cual se aplicó un proceso de corrección basado en Majority Filter, para suavizar bordes y eliminar píxeles aislados y Raster to Polygon, para convertir las clases a formato vectorial y permitir una depuración manual y topológica (Marin, 2025).

Una vez depuradas, las coberturas de T0 y T1 fueron rasterizadas nuevamente y reclasificadas según su nivel de resistencia al movimiento de Cuniculus paca, en una escala de 1 a 100, donde valores bajos representan mayor facilidad de desplazamiento (Tabla 1).

Tabla 1.

Clasificación de resistencia para las coberturas

Cobertura	Clasificación de resistencia
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	75
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	60
Pastos	50
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	25
Bosques	1

Fuente: Elaboración propia a partir de (Cartaya & Anchundia, Universidad politécnica Saleciana Ecuador, 2017).

5.4.3. Preparación de capas

La preparación de capas temáticas tuvo como objetivo incorporar variables adicionales que influyen en la movilidad de *Cuniculus paca*, permitiendo complementar la información derivada de las coberturas de la tierra. Estas capas representan elementos naturales y antrópicos que modifican la resistencia del paisaje y, por lo tanto, condicionan el desplazamiento de la especie.

Las variables se seleccionaron con base en antecedentes ecológicos y criterios documentados en la literatura científica, y fueron procesadas de forma independiente para cada predio, dada la variabilidad espacial observada (Tabla 2).

Tabla 2.

Información de las capas temáticas

Capa	Procesamiento	Predios		
		Esmeralda	Santa Lucia	Arenoso
Distancia a vías	Se utilizó la capa vectorial de Vías, analizada en el numeral 5.2 y se usó la herramienta Euclidean Distance y se homogeneizo el raster resultado para obtener valores de 0 a 100. Esta variable es relevante ya que limita el desplazamiento de la		X	X

	especie. (Colorado Zuluaga, Vásquez Muñoz, & Mazo Zuluaga, 2017)			
Distancia a drenajes	Se utilizó la capa vectorial de Drenajes sencillos, analizada en el numeral 5.2 y se usó la herramienta Euclidean Distance y se homogeneizo el raster resultado para obtener valores de 0 a 100. Esta variable es importante, ya que los drenajes favorecen el movimiento de la especie. (Colorado Zuluaga, Vásquez Muñoz, & Mazo Zuluaga, 2017)	X	X	X
Áreas núcleo	Se utilizó la capa vectorial obtenida en la clasificación de coberturas, se seleccionaron las coberturas de bosque que tuvieran un área mínima de 5ha y se creó un buffer de 20 metros hacia dentro. Luego se seleccionaron las áreas que tuvieran un área igual o mayor a 1ha pues áreas de este valor permiten tener una mayor conectividad ecológica. (Colorado Zuluaga, Vásquez Muñoz, & Mazo Zuluaga, 2017)	X	X	X

Fuente. Elaboración propia adaptada de (Colorado Zuluaga, Vásquez Muñoz, & Mazo Zuluaga, 2017).

Las tres capas resultantes: Distancia a vías, distancia a drenajes y áreas núcleo. Estas fueron armonizadas en términos espaciales y de resolución, garantizando su compatibilidad con los análisis posteriores. Además, fueron integradas en la construcción de matrices de resistencia simples y ponderadas, aportando una representación más realista de las condiciones que regulan el desplazamiento de *Cuniculus paca* (Marin, 2025).

5.5. Análisis Estructural del paisaje

El análisis estructural del paisaje se realizó utilizando el complemento LecoS (Landscape Ecology Statistics) integrado en QGIS, con el objetivo de evaluar la configuración espacial de los parches de bosque en los predios del CPPB para ambas temporalidades (T0 y T1). Este análisis permite comprender la fragmentación, la complejidad geométrica y la disponibilidad de hábitats interiores, aspectos fundamentales para interpretar la funcionalidad ecológica del paisaje y su capacidad para favorecer el movimiento de la fauna focal.

Los insumos utilizados fueron los rasters de coberturas generados para T0 y T1, de los cuales se extrajeron exclusivamente los parches clasificados como bosque, debido a su importancia como hábitat principal y áreas de tránsito para Cuniculus paca. Sobre estos parches se calcularon tres indicadores clave: el Índice Fractal (FRAC), la Densidad de Borde (ED) y la

Densidad de Áreas Núcleo. El Índice Fractal permitió evaluar la complejidad geométrica de los parches, donde valores mayores a 1 indican formas más irregulares y, por ende, mayor complejidad en la forma del parche. La Densidad de Borde permitió cuantificar la longitud total de borde por unidad de área, un indicador directamente relacionado con la fragmentación del paisaje, ya que una mayor densidad de bordes indica mayor heterogeneidad espacial. Finalmente, la Densidad de Áreas Núcleo permitió identificar zonas interiores no afectadas por los efectos de borde, fundamentales para la estabilidad ecológica y la provisión de hábitats de calidad (Marin, 2025).

5.6. Matriz de resistencia

La matriz de resistencia representa la dificultad relativa que experimenta *Cuniculus paca* al moverse a través del paisaje. Su construcción integra las coberturas de la tierra y las variables condicionantes previamente procesadas (distancia a vías, distancia a drenajes y áreas núcleo), con el fin de modelar espacialmente la restricción asociada al movimiento (Wade et al., 2015).

Se calcularon dos matrices de resistencia para cada una de las temporalidades, ambas por medio de la herramienta Raster Calcutor. La primera matriz realizada por medio de una suma simple en la que todas las variables condicionan el desplazamiento de la especie de la misma manera y la segunda matriz, analizada de manera ponderada por medio de un proceso de análisis jerárquico, en la que cada una de las variables tiene un peso e imponen una condición diferente a la especie dependiendo de su importancia respecto a la otra, por lo que se aplicó la escala de Saaty, donde valores enteros indican mayor relevancia de la variable de la fila sobre la de la columna, mientras que valores fraccionarios indican lo contrario. Posterior a esto se normalizó la matriz para obtener los pesos de ponderación para cada variable y los pesos derivados se integraron, multiplicando cada capa por su peso respectivo y sumando los resultados para obtener la matriz final. (Marin, 2025).

Tabla 3.

Escalas de comparación de Saaty

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro,	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Fuente: Tomado de Osorio Gómez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008).

Estas ponderaciones permitieron construir matrices más realistas, donde los costos en las áreas de interés se ajustan a los requerimientos ecológicos específicos de la especie (Marin, 2025).

5.7. Conectividad

La modelación de conectividad se realizó utilizando la Toolbox Linkage Mapper, un conjunto de herramientas de código abierto integradas en ArcGIS, diseñadas específicamente para analizar la conectividad del hábitat y priorizar corredores ecológicos. Esta herramienta resulta particularmente útil para identificar rutas potenciales de desplazamiento entre áreas núcleo, basándose en matrices de resistencia que representan el costo relativo del movimiento para la fauna (Linkage Mapper, 2017).

Para este estudio se empleó el módulo Linkage Pathways, encargado de generar rutas de menor costo y mapas sintéticos de conectividad a partir de las áreas núcleo derivadas de las coberturas boscosas (Sección 5.4.4) y las matrices de resistencia simple mencionadas previamente (Sección 5.4.5). Con estos insumos, la herramienta calculó rutas de menor costo entre los núcleos, generó corredores individuales y luego creó un mapa compuesto que muestra el

valor relativo de conectividad de cada celda. Esto permitió identificar las zonas más importantes para la conectividad y evaluar dónde existen cuellos de botella o barreras en el paisaje

6. Análisis de resultados

6.1. Revisión de información inicial

La revisión de la información inicial permitió consolidar los insumos fundamentales para el análisis multitemporal del paisaje. A partir de los datos suministrados por la empresa contratista y los insumos complementarios recopilados en la etapa metodológica, se construyó la base cartográfica oficial para el momento T0, correspondiente al inicio de la implementación del CPPB.

Las coberturas de la tierra para T0 se organizaron en cinco clases principales y se les asoció la clasificación mencionada en la Sección 5.4.2. y desglosadas en la Tabla 4:

Tabla 4.

Coberturas de la tierra para el T0

Cobertura	Descripción	Clasificación de resistencia
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Son espacios artificializados con infraestructuras de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexa y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicios, andenes, terraplenes y áreas verdes.	75
Pastos	Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por la familia Poaceae, dedicadas a pastoreo permanente por un período de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno.	50
Bosque	Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tiene una copa más o menos definida.	1
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica.	25
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente	60

	por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos.	

Fuente: Elaboración propia a partir de (ISA INTERCOLOMBIA, 2024).

La validación de estos insumos confirmó que la información disponible para T0 reflejaba adecuadamente la estructura del paisaje al inicio de la compensación. Asimismo, permitió identificar los elementos del territorio que influyen en la movilidad de *Cuniculus paca*, tales como la presencia de parches de bosque, la distribución de zonas abiertas, la ubicación de cuerpos de agua y la infraestructura vial.

6.2. Coberturas de la tierra

El análisis comparativo de las coberturas de la tierra entre T0 (2024) y T1 (2025) evidencia que no se presentaron cambios sustanciales en la distribución espacial de las clases de cobertura dentro de los predios del CPPB BEMI. Este resultado está directamente relacionado con dos factores: (i) el corto tiempo transcurrido entre ambos momentos, y (ii) la resolución espacial de 10 m de las imágenes Sentinel-2 empleadas para el análisis multitemporal, la cual no permite detectar variaciones finas asociadas a procesos tempranos de restauración o enriquecimiento. Durante la primera fase del proyecto (julio–diciembre de 2024), las actividades se concentraron mayoritariamente en cercado de áreas, adecuación del terreno y preparación para la siembra, mientras que las jornadas de plantación se iniciaron a finales del año 2024. Esto explica que, para T1, las acciones de restauración aún no generen cambios perceptibles en la estructura de coberturas a escala satelital.

A pesar de ello, la evaluación clasificatoria permitió identificar patrones consistentes de paisaje en los tres predios:

- Esmeralda: presenta una matriz dominada por bosque y vegetación herbácea y/o arbustiva, ambas asociadas a valores bajos de resistencia y favorables para el movimiento de la especie focal.
- Santa Lucía: contiene una mayor heterogeneidad, con presencia simultánea de bosque, pastos, vegetación herbácea/arbustiva y red vial, lo que incrementa la resistencia en zonas puntuales y refleja un paisaje más fragmentado.

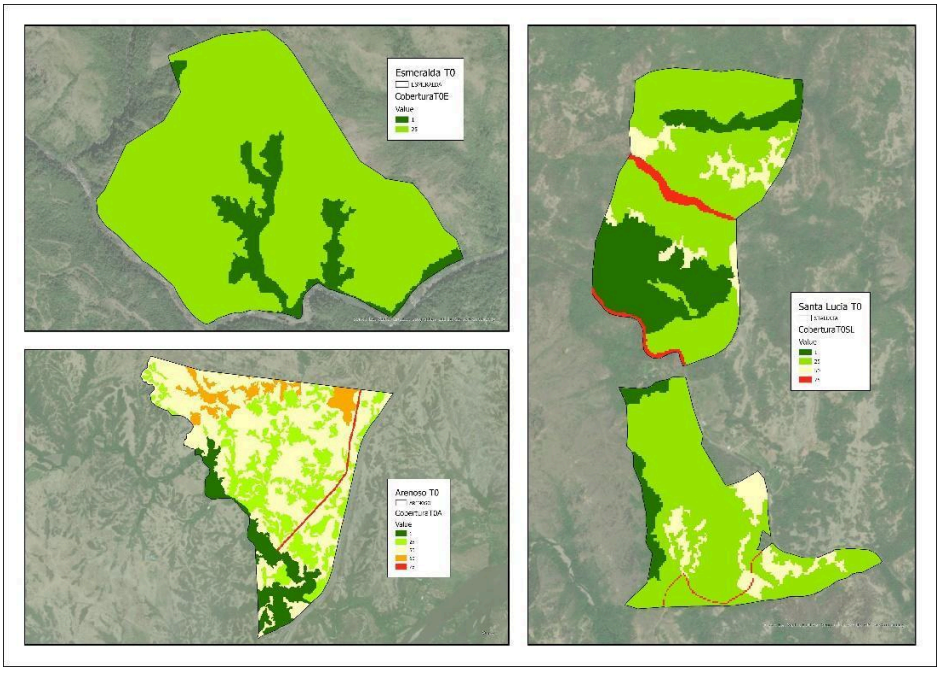
- Arenoso: muestra la estructura más degradada, con presencia de áreas abiertas, pastos, red vial y remanentes de vegetación natural. Esta composición se traduce en valores de resistencia más altos y una menor proporción de coberturas favorables.

La clasificación raster evidenció que, aunque la composición general de coberturas se mantuvo estable para ambos momentos, los patrones internos de resistencia permiten reconocer diferencias importantes entre predios, que ilustan su grado de intervención. En conjunto, este diagnóstico confirma que los cambios significativos en la estructura del paisaje requerirán un periodo mayor de implementación, acumulación de coberturas arbóreas y consolidación de procesos de restauración.

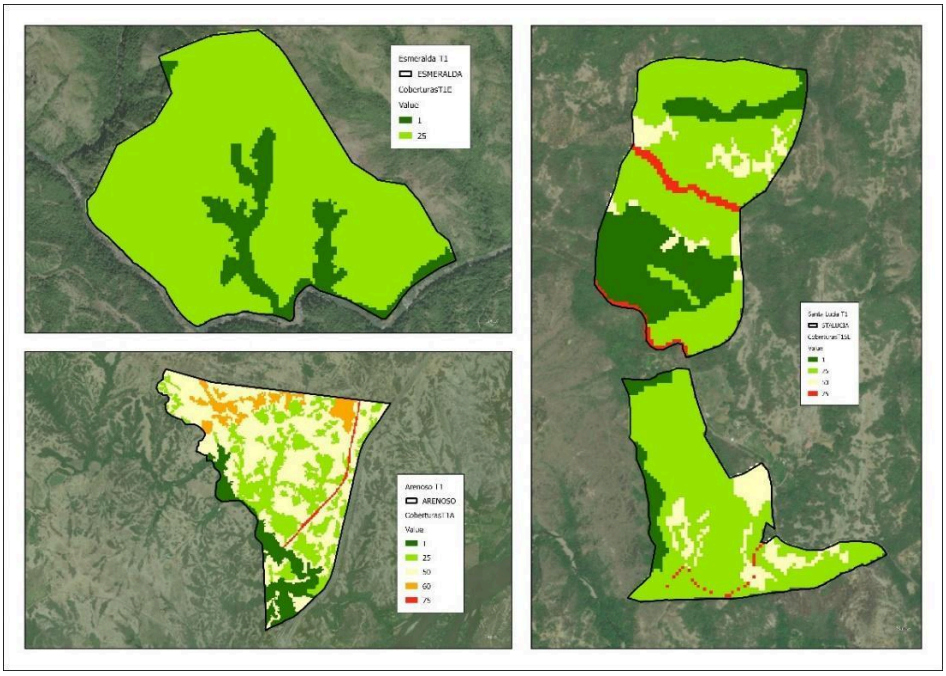
Figura 3.

Coberturas de la tierra rasterizadas para T0 y T1

a.



b.



Nota. Figura 3.a. T0, Figura 3.b T1.

6.2. Preparación de capas

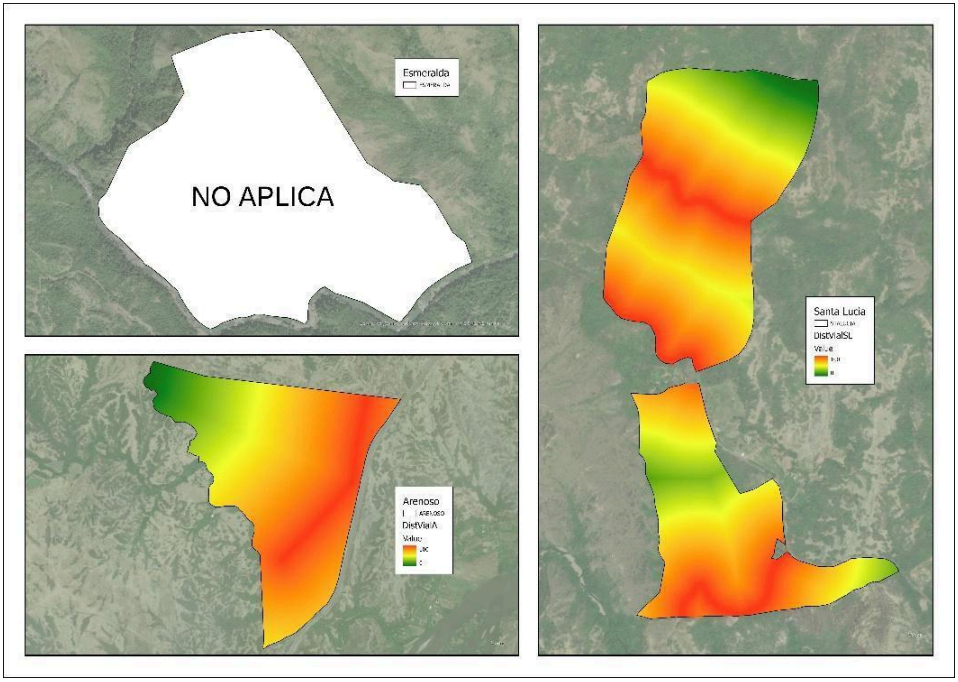
6.2.1. Distancia a sección vial

La capa de distancia a vías evidenció contrastes significativos entre los predios, por ejemplo, Santa Lucía presentó la mayor densidad de infraestructura vial, generando valores altos de resistencia (colores rojizos) en amplias zonas del predio. La existencia de vías incrementa la fragmentación funcional y limita la movilidad de la especie debido a amenazas como ruido, tránsito vehicular y pérdida de cobertura natural. Arenoso mostró una presencia moderada de vías, generando áreas de resistencia intermedia que se intercalan con zonas de vegetación más densa. Y Esmeralda, al no contar con vías dentro de su delimitación, no presenta restricciones asociadas a esta variable. En este predio, la movilidad potencial de la especie focal no se ve condicionada por infraestructura vial, lo que contribuye a valores generales más bajos de resistencia.

En conjunto, la capa evidencia que Santa Lucía es el predio con mayor restricción al movimiento por presencia de vías, mientras que Esmeralda constituye el escenario más favorable para el desplazamiento debido a su aislamiento de esta presión antrópica.

Figura 4.

Resistencia de movimiento asociada a la distancia de vías



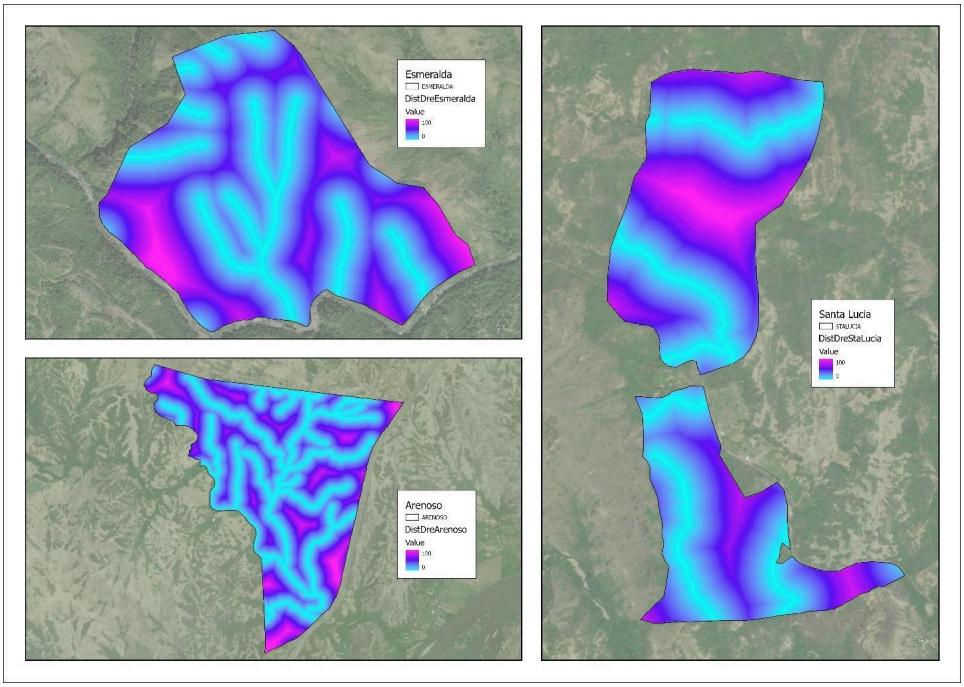
6.2.2. Distancia a drenajes

La distribución de drenajes mostró patrones consistentes con las preferencias ecológicas de la especie focal, fuertemente asociada a cuerpos de agua. Tanto Esmeralda como Arenoso presentaron una red de drenajes más densa y homogénea, lo que generó amplias zonas de baja resistencia (tonos azules), indicando que gran parte del predio ofrece condiciones favorables para el movimiento y permanencia de la especie. En Santa Lucía, aunque existe una red hídrica funcional, esta se encuentra distribuida de manera menos uniforme, generando áreas con mayor distancia a drenajes y, por ende, tramos con resistencia moderada.

La capa confirma que la disponibilidad de drenajes constituye un elemento clave para la conectividad funcional, especialmente en predios con menor cobertura boscosa.

Figura 5.

Resistencia de movimiento asociada a la distancia de drenajes



6.2.3. Áreas núcleo

El análisis de áreas núcleo, las cuales fueron definidas como zonas interiores de bosque sin influencia de borde, permitió identificar los núcleos de hábitat potencialmente conectables. Para Arenoso mostró la mayor cantidad de áreas núcleo óptimas, con tres núcleos identificados, lo que evidencia un paisaje con presencia de unidades significativas de hábitat interior (Figura 6). Esta condición permitió ejecutar el análisis de conectividad en este predio.

Santa Lucía y Esmeralda presentaron únicamente un núcleo óptimo cada uno. Aunque estos núcleos son funcionales a escala local, su número reducido limita la posibilidad de modelar corredores internos mediante Linkage Mapper.

Figura 6.

Áreas núcleo optimas en T0 y T1

a.

b.

Nota. Figura 6.a. T0, Figura 6.b T1.

6.4. Análisis estructural del paisaje

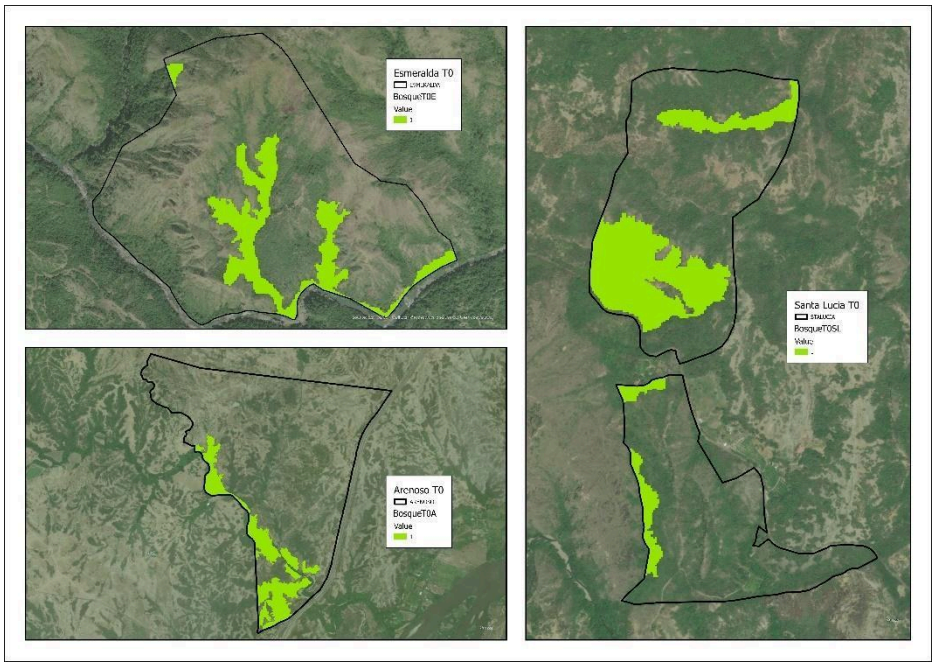
El análisis estructural del paisaje permitió evaluar la configuración espacial de los parches boscosos en los predios del proyecto BEMI para las dos temporalidades analizadas (T0 y T1). Aunque las coberturas no presentaron variaciones sustanciales entre ambos momentos (Figura 7),

las diferencias en resolución espacial y método de generación de las capas influyeron en los valores obtenidos para los indicadores estructurales (Tabla 5). Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como una caracterización entre predios, más que como un cambio temporal atribuible a la implementación del CPPB durante el primer año.

Figura 7.

Coberturas de bosque en T0 y T1

a.



b.

Nota: Figura 7.a. T0, Figura 7.b T1.

Tabla 5.

Índices estructurales para T0 y T1

	Esmeralda		Santa Lucía		Arenoso	
	T0	**T1**	**T0**	**T1**	**T0**	**T1**
Densidad de borde (m/ha)	587.34	610.11	363.89	391.39	460.02	504.90
índice de dimensión fractal	1.1242	1.1187	1.1700	1.1542	1.1660	1.1254
Densidad de áreas núcleo	14.82%	15.94%	42.25%	42.41%	34.08%	37.01%

Respecto a la densidad de borde los resultados indican que el predio Esmeralda presentó los valores más altos de densidad de borde, lo cual sugiere un bosque más expuesto a efectos de borde. Los predios Santa Lucía y Arenoso mostraron valores intermedios evidenciando una estructura menos afectada o expuestas a los efectos de borde. Los resultados del índice fractal muestran que los predios Santa Lucía y Arenoso presentan los valores fractales más altos, lo que indica parches más irregulares. El predio Esmeralda mostró los valores más bajos, evidenciando parches más simples y compactos. Al analizar los resultados de la densidad de áreas núcleo, el predio Santa Lucía mostró la mayor proporción de hábitats interiores respecto al área total, seguida por Arenoso, mientras que Esmeralda presentó la menor densidad.

Es importante resaltar que las métricas no deben interpretarse como evidencia de cambios temporales, dado que los insumos de T0 y T1 se derivan de fuentes con resoluciones distintas y métodos de clasificación diferentes.

6.4. Matrices de resistencia

El análisis de la matriz de resistencia permitió evaluar la dificultad relativa que enfrenta *Cuniculus paca* al desplazarse a través del paisaje en los predios del proyecto BEMI. Este análisis se fundamenta en la integración espacial de las coberturas de la tierra y de las variables condicionantes (distancia a vías, distancia a drenajes y áreas núcleo), las cuales se mantuvieron constantes entre T0 y T1, razón por la cual las diferencias encontradas responden principalmente a la variabilidad interna de cada predio y no a cambios temporales.

6.4.1. Simple

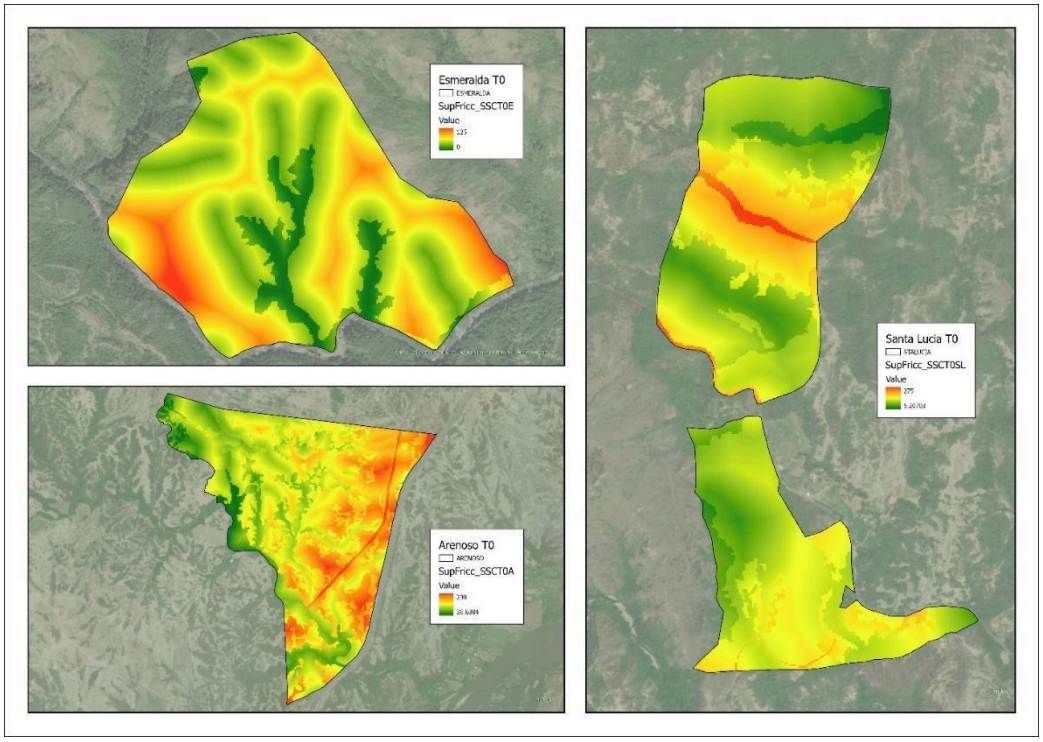
La matriz de resistencia simple permite el análisis espacial para identificar diferencias claras entre predios, el predio Esmeralda presentó los valores más bajos de resistencia (rango aproximado entre 0 y 125), reflejando un paisaje dominado por coberturas naturales favorables para la movilidad de la especie. El predio Arenoso registró valores intermedios (aprox. 36–230), influenciados por la presencia simultánea de pastos, áreas abiertas y vegetación natural. Por último, el predio Santa Lucía mostró los valores más elevados (aprox. 5–275), asociados a la presencia de red vial y una mayor proporción de coberturas con resistencia media-alta.

En términos funcionales, la matriz simple evidencia que los predios con mayor continuidad de bosques y drenajes ofrecen menores costos de desplazamiento, mientras que la presencia de vías y áreas abiertas incrementa la resistencia del paisaje.

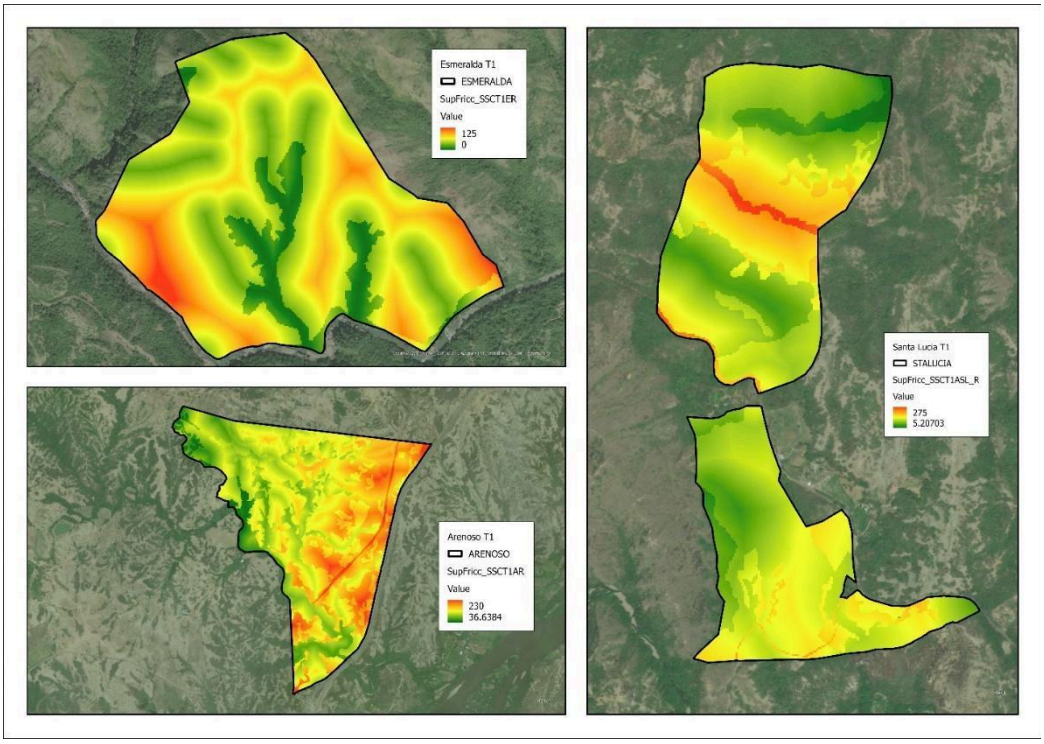
Figura 8.

Matrices de resistencia simple en T0 y T1

a.



b.



Nota. Figura 8.a. T0, Figura 8.b T1.

6.4.2. Ponderadas

Los pesos obtenidos de la clasificación Satty reflejaron diferencias en la importancia ecológica de las variables (Tablas 6 y 7).

Tabla 6.

Jerarquización de las variables condicionantes para la matriz de resistencia ponderada – Predios Santa Lucia y Arenoso.

	Cobertura suelo	**Distancia a la vía**	**Distancia a la red hídrica**	**Área núcleo**	**% DE PONDERACIÓN**
Cobertura suelo	1	1/9	1/3	2	**9%**
Distancia a la vía	9	1	5	7	**37%**
Distancia a la red hídrica	3	1/5	1	3	**42%**
Área núcleo	1/2	1/7	1/3	1	**13%**

Tabla 7.

Jerarquización de las variables condicionantes para la matriz de resistencia ponderada – Predio Esmeralda.

	Cobertura suelo	**Distancia a la red hídrica**	**Área núcleo**	**% DE PONDERACIÓN**
Cobertura suelo	1	1/5	1/3	**11%**
Distancia a la red hídrica	5	1	3	**63%**
Área núcleo	3	1/3	1	**26%**

En los predios Santa Lucía y Arenoso, la distancia a la red hídrica y la distancia a vías fueron las variables más influyentes (42% y 37%, respectivamente), dado su impacto directo en la movilidad y riesgo para la especie. En el predio Esmeralda, la variable de mayor peso fue la distancia a drenajes (63%), seguida por la presencia de áreas núcleo (26%).

Como resultado, las matrices ponderadas mostraron para el predio Esmeralda como el de menor resistencia ponderada (-0.15 a 65.75), producto de su cercanía generalizada a drenajes y su

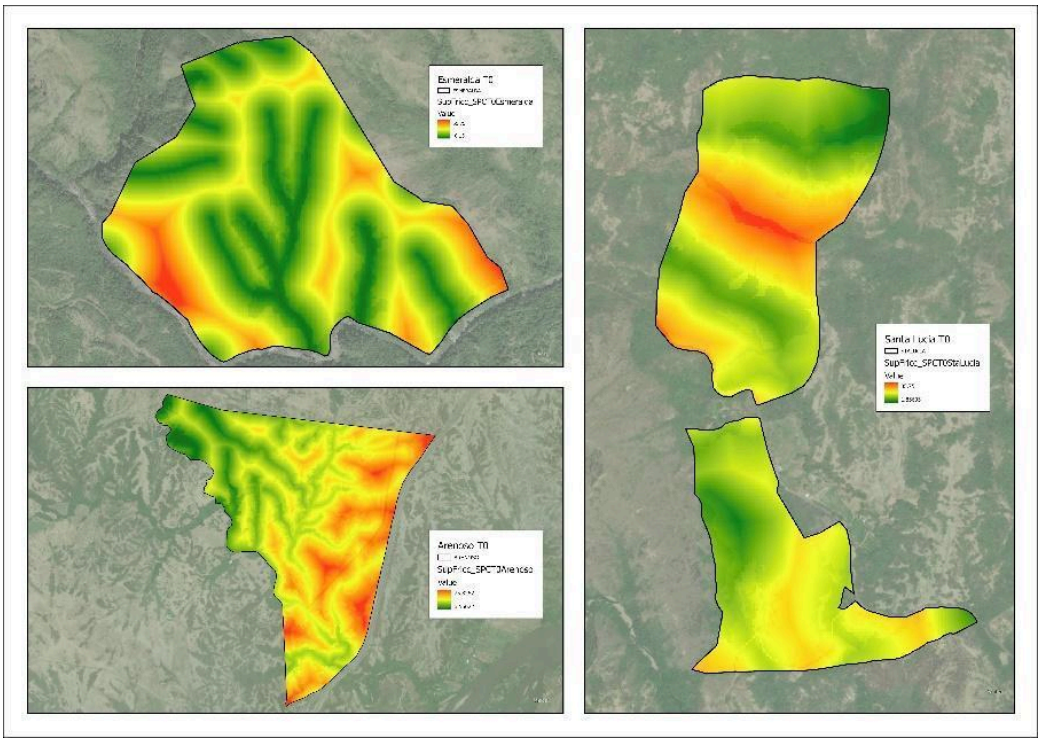
cobertura dominada por bosque y vegetación densa. El predio Arenoso con valores moderados (6.55 a 75.82), reflejando un paisaje heterogéneo y parcialmente degradado. Y el predio Santa Lucía con la mayor resistencia ponderada (1.85 a 85.75), debido a la presencia de vías y a una oferta de drenajes menos homogénea.

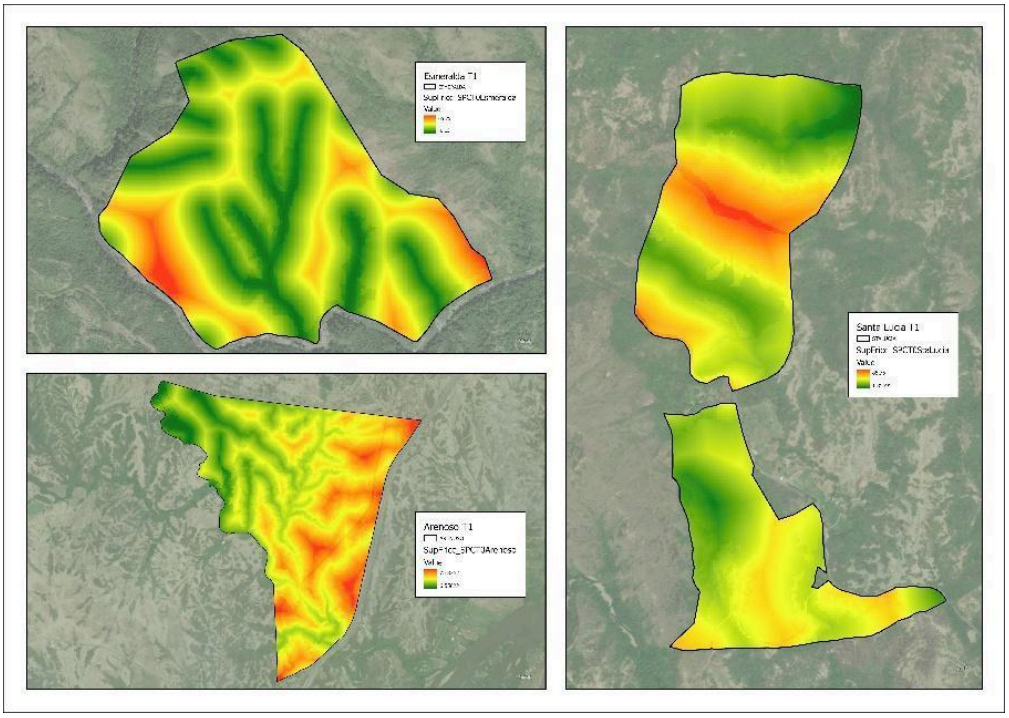
Estos resultados permiten identificar con claridad las zonas donde el movimiento de *Cuniculis paca* se facilita y donde enfrenta mayores restricciones. En términos ecológicos, los niveles más bajos de resistencia se concentran en sectores donde las áreas núcleo y los drenajes convergen, mientras que los valores más altos se asocian a vías, áreas abiertas y coberturas menos densas.

Figura 9.

Matrices de resistencia ponderada en T0 y T1

a.



b. 

Nota. Figura 9.a. T0, Figura 9.b T1.

6.5. Conectividad

Es importante señalar que solo el predio Arenoso presentó la cantidad mínima de áreas núcleo requerida para ejecutar el modelo (al menos dos). En contraste, Santa Lucía y Esmeralda presentaron un único núcleo óptimo cada uno, lo que imposibilita generar rutas de conectividad interna mediante este enfoque. Por esta razón, los resultados se centran exclusivamente en Arenoso, aunque las implicaciones ecológicas se consideran en el contexto general del CPPB.

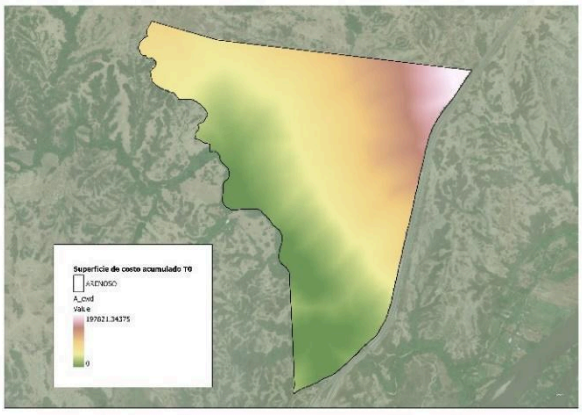
6.5.1. Superficie de costo acumulado

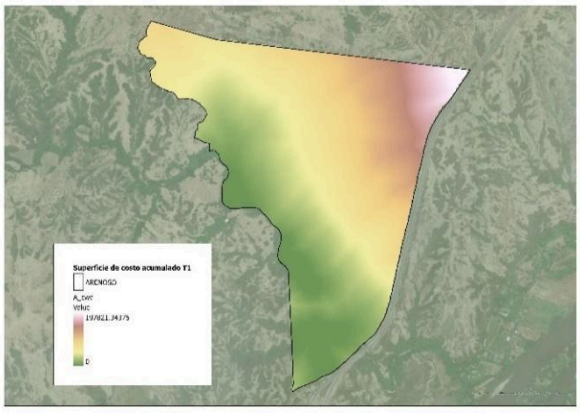
La superficie de costo acumulado representa, para cada celda del paisaje, el esfuerzo relativo necesario para desplazarse desde los núcleos de hábitat hacia cualquier punto del predio. Los resultados muestran que las áreas núcleo registraron los valores de costo más bajos, como es esperable en zonas donde la resistencia es mínima y la especie dispone de hábitat adecuado. A medida que aumenta la distancia a los núcleos o se presentan coberturas menos favorables (pastos, áreas abiertas o zonas cercanas a vías), el costo acumulado incrementa progresivamente, alcanzando valores máximos en sectores periféricos o degradados del predio.

No se observaron diferencias entre T0 y T1, lo cual es consistente con la estabilidad en las coberturas y variables condicionantes documentadas previamente. Esto indica que, durante el primer año del CPPB, la accesibilidad ecológica y la configuración funcional del paisaje no experimentaron cambios significativos.

Figura 10.

Superficie de costo acumulado en T0 y T1

a. 

b. 

Nota. Figura 10.a. T0, Figura 10.b T1.

6.5.2. Rutas de menor costo

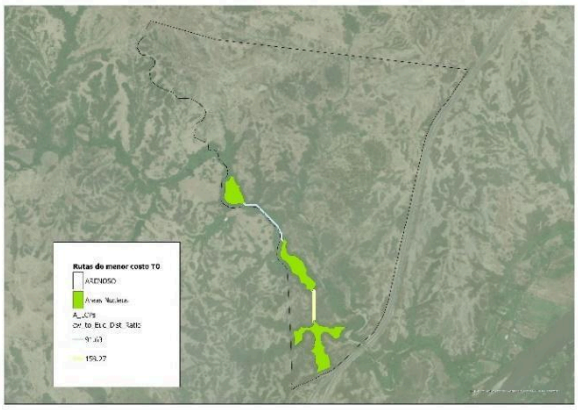
El modelo identificó dos rutas principales de menor costo entre los núcleos del predio Arenoso, la ruta 1 (azul) es la ruta más larga, pero presenta el costo más bajo (91.63). Se ubica principalmente a través de zonas de bosque y vegetación densa, lo que facilita el movimiento y reduce la exposición a perturbaciones. La ruta 2 (amarilla) es más corta, pero presenta un costo mayor (159.27). Se superpone con sectores de vegetación menos densa y áreas abiertas, lo que incrementa la resistencia y disminuye su calidad como corredor funcional.

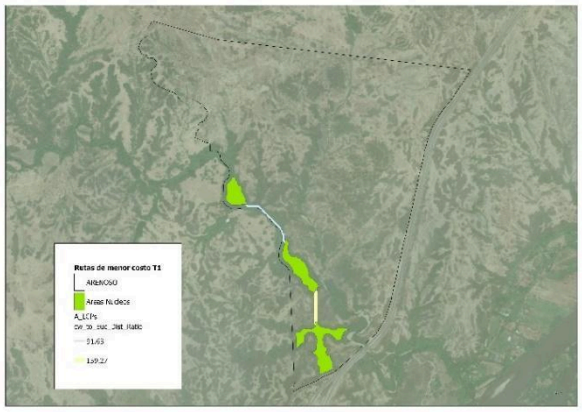
La comparación entre rutas evidencia un principio clave en conectividad ecológica: la distancia no es el único determinante del desplazamiento; la calidad del hábitat y la continuidad estructural del paisaje son igualmente decisivas.

Las rutas obtenidas fueron idénticas en T0 y T1, lo que confirma que las condiciones del paisaje para el movimiento permanecieron estables durante el periodo evaluado.

Figura 11.

Rutas de menor costo en T0 y T1

a. 

b. 

Nota. Figura 11.a. T0, Figura 11.b T1.

6.5.2. Corredores teóricos

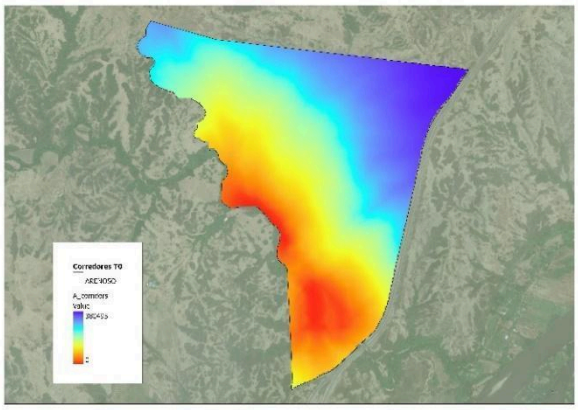
El mapa de corredores teóricos sintetiza las rutas potenciales que mantiene el predio y asigna un valor relativo a cada celda según su participación en los trayectos de menor costo.

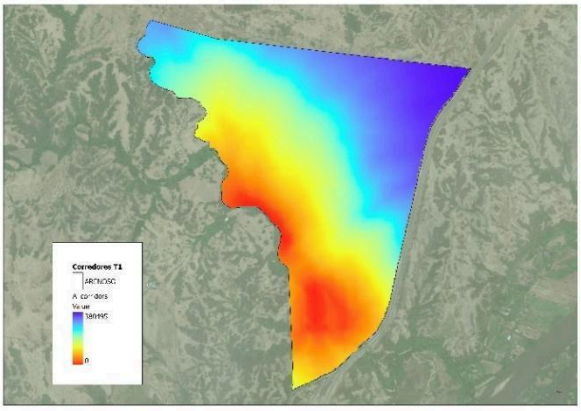
Los resultados muestran que zonas en tonos rojos representan los segmentos más importantes para la conectividad. Corresponden a tramos centrales de los corredores, donde la coincidencia entre drenajes, áreas núcleo y vegetación natural genera condiciones óptimas para el movimiento. Zonas en tonos fríos representan áreas con baja importancia conectiva y altos costos de desplazamiento, generalmente distantes de los núcleos de bosque.

La estabilidad de estos corredores entre T0 y T1 refuerza la conclusión de que la conectividad ecológica no ha mostrado mejoras ni deterioros perceptibles durante el primer año del CPPB, debido a la naturaleza gradual de los procesos de restauración y a la escala espacial del análisis.

Figura 12.

Corredores teóricos en T0 y T1

a. 

b. 

Nota. Figura 12.a. T0, Figura 12.b T1.

7. Recomendaciones y conclusiones

7.1. Recomendaciones

- Es fundamental contar con la información correcta para el desarrollo de la metodología, especialmente en la información de las capas restricción, por lo que realizar un preprocesamiento que estudie y corrija información faltante o las inconsistencias que se puedan presentar en la GDB del proyecto, esto garantizará que el procesamiento posterior se realice de manera efectiva.
- Se recomienda analizar las coberturas de la tierra bajo la misma resolución, de manera que pueda realizarse un análisis directo entre los cambios de forma de parches boscosos, de densidad de áreas núcleo y de disminución de densidad de borde. Así mismo, ampliar el análisis estructural del paisaje incluyendo métricas adicionales como conectividad estructural (p. ej., índices de proximidad o conectividad de grafos), que complementen las métricas de forma, borde y áreas núcleo por medio de software más precisos, especializados y detallados como Fragstats.
- Para a obtención de mejores resultados, se recomienda incorporar el análisis de áreas periféricas a los predios del plan de compensación, pues los ecosistemas no se comportan como bloques aislados, si no una abundante suma de diferentes factores a lo largo del territorio, por lo que una análisis con estás áreas adicionales permitiría obtener mejor información para la interpretación de corredores y rutas de menor costo para el desplazamiento de la especie, brindado mayor información acerca de la conectividad en las áreas de compensación.
- Se recomienda incorporar especies adicionales que representen diferentes capacidades de movilidad, preferencias de hábitat y niveles de sensibilidad a la fragmentación, con el fin de ampliar la interpretación ecológica del paisaje y generar un análisis de conectividad más robusto y multiescalar. Incluir especies de baja movilidad, permitiría evaluar conectividad local y sensibilidad a barreras pequeñas, mientras que especies de alta movilidad, facilitarían analizar conectividad fuera de los predios de compensación; asimismo, puede ser provechoso incorporar especies de interés de conservación.
- Se recomienda fortalecer el proceso de validación en campo mediante la recolección de puntos GPS georreferenciados para cada tipo de cobertura incluida en la clasificación supervisada y el uso de fotografías georreferenciadas y la caracterización de atributos

estructurales como altura del dosel, información que es suministrada por el contratista siembra a siembra y monitoreo a monitoreo.

- Se recomienda integrar un análisis espectral mediante el uso complementario de índices de vegetación como NDVI, GNDVI y NDRE, ya que estos permiten detectar variaciones sutiles en la salud de la vegetación, el estado hídrico del área de estudio y condiciones biofísicas que no son visibles a través de la clasificación de coberturas ni del análisis estructural tradicional, lo cual mejoraría la sensibilidad del monitoreo frente a cambios tempranos derivados de acciones de restauración.
- Por último, se recomienda integrar los resultados de la conectividad ecológica a la implementación del plan de compensación, dado que estos productos permiten identificar con alta precisión las áreas del paisaje que facilitan o restringen el movimiento de la fauna focal y, por tanto, constituyen información estratégica para orientar acciones de restauración, conservación y manejo adaptativo.

7.2. Conclusiones

Los resultados del análisis de conectividad ecológica permiten concluir que la funcionalidad del paisaje depende no solo de la presencia de coberturas boscosas, sino de su configuración espacial y de la interacción entre nodos y corredores, lo cual determina la capacidad real de la fauna para desplazarse entre áreas de hábitat. La diferencia marcada entre predios, especialmente la presencia de múltiples núcleos en el predio Arenoso en contraste a la estructura más aislada de los predios Esmeralda y Santa Lucía, evidencia que la efectividad de las medidas de compensación está condicionada por la estructura preexistente del territorio y por la distribución de elementos favorables o restrictivos para el movimiento, reafirmando principios fundamentales de la ecología del paisaje sobre la relación entre patrones y procesos ecológicos. Por otro lado, el peso otorgado a la distancia a drenajes en las matrices de resistencia demuestra que los elementos hidrológicos cumplen un rol determinante en la movilidad de *Cuniculus paca* y pueden influir significativamente en la conectividad funcional, incluso más que algunas coberturas terrestres. Esta conclusión resalta la necesidad de considerar los componentes hidrológicos como ejes estratégicos en la planificación de acciones de restauración, ya que su capacidad de concentrar humedad y proveer refugio favorece la permanencia de fauna y fortalece

procesos ecológicos esenciales, especialmente en paisajes fragmentados en donde la cobertura vegetal continua es limitada.

En conjunto, la metodología constituye un instrumento sólido para el monitoreo de compensaciones, aunque su capacidad para reflejar cambios dependerá de mejorar la escala espacial de los insumos o de extender los intervalos temporales de evaluación.

La metodología implementada integró herramientas de teledetección, análisis espacial y modelación ecológica para caracterizar la estructura y funcionalidad del paisaje en las áreas de compensación del proyecto BEMI, consolidando un enfoque multiescalar y replicable para el monitoreo de los CPPB en implementación de empresa, si se desea realizar un monitoreo anual o no depender de la información de contratistas.

El uso de imágenes Sentinel-2 preprocesadas proporcionó una base sólida para la clasificación de coberturas y los análisis multitemporales, aunque la resolución de 10 m limitó la capacidad para detectar cambios tempranos derivados de las acciones de restauración, lo que sugiere que la metodología, si bien es funcional y robusta, requiere imágenes de mayor resolución o periodos de monitoreo superiores a un año para evidenciar variaciones significativas en las coberturas. La combinación de clasificación supervisada, depuración espacial y reclasificación por resistencia generó insumos confiables para la modelación funcional, mientras que el análisis estructural del paisaje permitió identificar diferencias en fragmentación, calidad del hábitat y distribución de áreas núcleo entre predios, sin embargo, es importante definir un área de estudio que contemple los alrededores de los predios de compensación para obtener información más amplia y diciente acerca de la conectividad para la especie focal.

La preparación de capas condicionantes y la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico posibilitaron construir matrices de resistencia acordes con la ecología de *Cuniculus paca*, y la modelación de conectividad a través de Linkage Mapper integró de manera efectiva todos los insumos anteriores, demostrando la utilidad de esta metodología para priorizar áreas de restauración y evaluar la funcionalidad ecológica.

Referencias

Aguas y Aguas de Pereira. (2020). *Capítulo 8: Plan de monitoreo y seguimiento*. Retrieved from https://www.aguasyaguas.com.co/images/ptar/Cap%208%3A%20Plan%20de%20Monitoreo%20y%20Seguimiento/8.PLANES%20DE%20MONITOREO%20Y%20SEGUIMIENTO%20%2811_12_2020%29.pdf

Animal Diversity Web. (n.d.). *Animal Diversity Web*. Retrieved from https://animaldiversity.org/accounts/Cuniculus_paca/

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (s.f.). *Marco normativo de compensaciones del medio biótico.* Retrieved from https://consultas.anla.gov.co/eureka/normatividad/2678-marco-normativo-de-compensaciones-del-medio-biotico

Badii, M. H. y J. Landeros. (2006-07). *Cuantificación de la fragmentación del paisaje y su relación con Sustentabilidad.* Spenta Mexico. Retrieved from https://www.spentamexico.org/v2-n1/2(1)%2026-38.pdf

Cartaya, S., & Anchundia, C. (2017). *DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA POTENCIAL DE LA ESPECIE Cuniculus Paca EN EL OCCIDENTE DE ECUADOR*. Retrieved from https://www.redalyc.org/journal/4760/476051632010/

Cartaya, S., Zurita, S., & Manuano-Eduarte, R. (2016). *Propuesta de corredores ecológicos y zonas de amortiguamiento como medidas para restaurar la conectividad del habitad de la especie Cuniculus paca en Ecuador.* Retrieved from https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/17974

Colorado Zuluaga, G. J., Vásquez Muñoz, J. L., & Mazo Zuluaga, I. N. (2017). *ACTA BIOLÓGICA COLOMBIANA*. Retrieved from http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v22n3/0120-548X-abc-22-03-00379.pdf

Esri. (2025). *What is GIS? | Geographic Information System Mapping Technology.* Retrieved from https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview

Ginting, Setiawan, Anggraini, Suardana, Nandika, Ulfa, . . . Dewanti. (2024). *Comparison between top and bottom of atmosphere Sentinel-2 image for mangrove mapping in Balikpapan Bay, East Kalimantan.* Retrieved from

https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/08/bioconf_srcm2024_07003.pdf

Harmsen, B. J., Wooldridge, R. L., (Taveira, y otros, 2022) Gutierrez, S. M., Doncaster, C. P., & Foster, R. J. (2018). *Spatial and temporal interactions of free-ranging pacas (Cuniculus paca)*. Mammal Research, 63(2), 161-172.

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.

ISA Intercolombia. (n.d.). *Empresa de energía ISA Intercolombia*. Retrieved from https://www.isa.co/es/empresa-de-energia/isa-intercolombia/

Linkage Mapper. (2017). *Linkage Mapper*. Retrieved from https://linkagemapper.org/

Alba L. Marin. (2025) *S3_PracticaGeneral_EcologíadelPaisaje* [Material de apoyo para la clase]. Universidad Nacional de Colombia.

McGarigal, K., Cushman, S. A., & Ene, E. (2012). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. University of Massachusetts. Retrieved from https://fragstats.org/index.php/fragstats-metrics/patch-based-metrics/area-and-edge-metrics/l4-edge-density

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Manual de compensaciones del componente biótico.* Retrieved from https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/manual_de_compensaciones/Manual_de_compensaciones_del_componente_bi%C3%B3tico.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Listado de indicadores para la evaluación y seguimiento de impactos ambientales.* Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/listado-de-indicadores-para-la-evaluacion-y-seguimiento-de-impactos-ambientales/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Estrategia Nacional de Compensaciones*

Ambientales. Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemicos/estrategia-nacional-de-compensaciones-ambientales/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Manual de seguimiento ambiental de proyectos.* Retrieved from https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/manual-de-seguimiento-ambiental-de-proyectos/

Osorio Gómez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). *El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio.* Ejemplo de aplicación. scientia et technica, xiv(39), 247-252.

SiB Colombia. (n.d.). *SiB Colombia*. Retrieved from Catálogo de la Biodiversidad: https://catalogo.biodiversidad.co/file/59e41fca5f369343443080da/summary

SiB Colombia. (2020, abril 10). *Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia.* Recuperado de https://biodiversidad.co/

Taveira, G., Beboulaz, R., Ramos, M., Ximena, L., Bergamino, L., & Inda, H. (2022). *Evaluación de la fragmentación del paisaje en la cuenca de la laguna costera Garzón, Uruguay.* Retrieved from https://www.redalyc.org/journal/6061/606170065004/html/

Troll, C. (2003). Ecología del paisaje. Gaceta Ecológica, (68), 71–84. Retrieved from https://www.redalyc.org/pdf/539/53906808.pdf[1](https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=53906808)

Wade, A., McKelvey, K., & Schwartz, M. (2015). *Resistance-surface-based wildlife conservation connectivity modeling: Summary of efforts in the United States and guide for practitioners*. Forest Service U.S. Department of Agriculture. Retrieved from https://research.fs.usda.gov/treesearch/48464