

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE
CIRCUNDANTE A LOS CORREDORES BIOLÓGICOS
DEL ITCR, CAMPUS TECNOLÓGICO CENTRAL
CARTAGO, COSTA RICA**

**PROYECTO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
FORESTAL CON ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE
ECOSISTEMAS FORESTALES GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

DYLANA ÁLVAREZ MASIS

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE
CIRCUNDANTE A LOS CORREDORES BIOLÓGICOS
DEL ITCR, CAMPUS TECNOLÓGICO CENTRAL
CARTAGO, COSTA RICA**

**PROYECTO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
FORESTAL CON ÉNFASIS EN CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE
ECOSISTEMAS FORESTALES GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

DYLANA ÁLVAREZ MASIS

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE CIRCUNDANTE A LOS CORREDORES BIOLÓGICOS DEL ITCR, CAMPUS TECNOLÓGICO CENTRAL CARTAGO, COSTA RICA

Dylana Alvarez-Masís*

RESUMEN

En este estudio, se aplicaron técnicas de teledetección con sistemas de información geográfica (SIG), para evaluar la fragmentación y conectividad del paisaje en la microcuenca del río Toyogres, ubicada en Cartago, Costa Rica. Se realizó una caracterización de los usos de la tierra en la microcuenca, en la cual se identificaron cinco categorías principales que abarcan "Conservación y manejo de bosques", "Agricultura", "Ganadería y pastos", "Infraestructura" y "Zonas húmedas". La clasificación se llevó a cabo utilizando el algoritmo Random Forest, mediante el software SNAP, logrando un sólido desempeño con un 95,36% de predicciones correctas en un conjunto de 5648 muestras. Además, se evaluó la conectividad estructural del paisaje mediante diversas métricas que consideraron la proporción del paisaje, el número y el área de parches, así como la cohesión y división de estos. Los resultados revelaron como categorías predominantes en la microcuenca la "Agricultura" e "Infraestructura". Se destacó la fragmentación en la zona media de la microcuenca debido al desarrollo urbano. A partir de los resultados, se propusieron rutas de conectividad, con estrategias como la revegetación de las zonas de protección de los ríos de la zona, para contrarrestar la fragmentación. Se sugirieron tres componentes clave para la conservación, incluyendo aspectos ecológicos, de investigación y educación, haciendo hincapié en la importancia de la colaboración entre actores públicos y privados para lograr el éxito de las acciones propuestas.

Palabras clave: teledetección, sistemas de información geográfica (SIG), fragmentación, conectividad del paisaje, microcuenca, río Toyogres, Random Forest, rutas de conectividad.

STRUCTURAL CONNECTIVITY OF THE SURROUNDING LANDSCAPE OF THE BIOLOGICAL CORRIDORS OF THE ITCR, CENTRAL TECHNOLOGICAL CAMPUS, CARTAGO, COSTA RICA.

Dylana Alvarez-Masís*

ABSTRACT

In this study, remote sensing techniques, Geographic Information Systems (GIS) and statistical analysis were applied to evaluate the fragmentation and connectivity of the landscape in the Toyogres River micro-watershed, located in Cartago, Costa Rica. A characterization of land cover and land use in the micro-watershed was carried out, in which five main categories were identified, including "Forest conservation and management", "Agriculture", "Livestock and pasture", "Infrastructure" and "Wetlands". Classification was carried out using the Random Forest algorithm, using SNAP software, achieving a solid performance with 95.36% correct predictions in a set of 5648 samples. In addition, the structural connectivity of the landscape was evaluated using various metrics that considered the proportion of the landscape, the number and area of patches, as well as their cohesion and division. The results revealed "Agriculture" and "Infrastructure" as the predominant categories in the micro-watershed. Fragmentation in the middle zone of the micro-watershed due to urban development was highlighted. Based on the results, connectivity routes were proposed, such as revegetation of the protection zones of the rivers in the area, to counteract fragmentation. Three key components for conservation were suggested, including ecological, research and education aspects, emphasizing the importance of collaboration between public and private actors to achieve the success of the proposed actions.

Keywords: remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), fragmentation, landscape connectivity, micro-watershed, Toyogres River, Random Forest, connectivity routes.

CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE CIRCUNDANTE A LOS CORREDORES BIOLÓGICOS DEL ITCR, CAMPUS TECNOLÓGICO CENTRAL CARTAGO, COSTA RICA © 2023 by DYLANA ALVAREZ-MASIS is licensed under Attribution-NonCommercial 4.0 International

*D. Alvarez-Masís, “CONECTIVIDAD ESTRUCTURAL DEL PAISAJE CIRCUNDANTE A LOS CORREDORES BIOLÓGICOS DEL ITCR, CAMPUS TECNOLÓGICO CENTRAL CARTAGO, COSTA RICA”. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2023.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo Final de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por Dra. Nancy Gamboa Badilla, M.Sc. Casia Soto Montoya y Lic. Raquel Mejías Elizondo, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal con énfasis en Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Nancy Gamboa Badilla Dra.
Directora de tesis

Casia Soto Montoya M.Sc
Lectora

Raquel Mejías Elizondo Lic.
Lectora

Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.
Coordinador Trabajos Finales de
Graduación



Dylana Álvarez Masís
Estudiante

DEDICATORIA

A los hacedores de mi espacio en este tiempo: Evelyn y Adrián. A Melina, Diego, Adir y Shak, el lugar cálido para aprenderme. A los que tejen el hilo de mi historia.

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por ser el lustro de mi existencia. A Melina, por esparcir la claridad como el más bello sol. A Diego, por su melodía, mi rabo de nube. A Adir, mi romancillo de mayo, por su ternura. A Maicol por la enseñanza. A Shak, la gota de rocío, por la paciencia y el amor. A mi familia.

A la educación pública por la oportunidad esparcir mi entendimiento.

Al hermoso círculo de mujeres que me acompañó para realizar mi trabajo. Mi tutora Nancy Gamboa Badilla por sus aportes, experiencia y comentarios precisos. A Cassia Soto Montoya, por encender mi curiosidad por los SIG, su gran vocación y conocimiento. A Raquel Mejías Elizondo que gestionó desde la GASEL para llevar a cabo el trabajo.

A Iván, por la yunta que forjamos desde el primer día, mi ayuda incondicional.

A el grupo de conservación: Ana Paula, Emmanuel, Jonathan y M. Fernanda.

A las personas que conocí en este camino.

A mí.

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
3	REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
3.1	Ecología del paisaje	15
3.1.1	Usos del suelo.....	16
3.1.2	Características y dinámicas de los usos del suelo	16
3.2	Conectividad estructural del paisaje	17
3.3	Conectividad funcional del paisaje	18
3.4	Corredores biológicos como estrategia de conservación	19
3.4.1	Corredores interurbanos en el Campus Tecnológico Central Cartago - ITCR....	21
4	MATERIALES Y METODOS.....	22
4.1	Área de estudio	22
4.2	Recolección de datos	23
4.2.1	Caracterización de coberturas y usos del suelo	23
4.2.2	Evaluación de la conectividad estructural del paisaje	24
4.2.3	Recomendaciones para la conservación	25
4.3	Análisis de la información	26
5	RESULTADOS.....	27
5.1	Caracterización de coberturas y usos del suelo.....	27
5.2	Evaluación de la conectividad estructural del paisaje.....	29
5.3	Recomendaciones para la conservación de la microcuenca.....	33
5.3.1	Rutas de conectividad.....	36
6	DISCUSIÓN.....	38
7	CONCLUSIONES.....	42
	La microcuenca del río Toyogres se distingue por la predominancia de áreas urbanas y agrícolas.	42
8	RECOMENDACIONES.....	43
9	REFERENCIAS	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de la microcuenca del río Toyogres.	23
Figura 2. Usos del suelo 2023 de la microcuenca del río Toyogres, Cartago, Costa Rica	28
Figura 3. Mapa de fragmentación de la microcuenca río Toyogres.	32
Figura 4. Mapa de conectividad de la microcuenca del río Toyogres.	33
Figura 5. Propuesta de rutas de conectividad en la microcuenca del río Toyogres.	37

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación por categorías de uso de suelo de la microcuenca del río Toyogres.	27
Cuadro 2. Exactitud y precisión de la clasificación por categoría en la microcuenca del río Toyogres.	29
Cuadro 3. Usos de la tierra, proporción del paisaje, número y mayor área de parches según las clases en la microcuenca del río Toyogres.	29
Cuadro 4. Índice de cohesión e Índice de división para cada clase en el paisaje de la microcuenca del río Toyogres.	30
Cuadro 5. Categorías de fragmentación para el análisis de la microcuenca del río Toyogres.	31
Cuadro 6. Recomendaciones de conservación y mejoramiento de la conectividad en el paisaje fragmentado de la microcuenca del río Toyogres según componentes, objetivos y acciones a desarrollar.	34

1 INTRODUCCIÓN

La dinámica de los bosques tropicales es compleja y su estructura es un conjunto de factores físicos y biológicos que han coexistido por cientos de años. Sin embargo, tanto causas antropogénicas como naturales han favorecido la transformación de los bosques, ocasionando la fragmentación del hábitat y los efectos negativos que provoca sobre la naturaleza. La reducción de la cobertura boscosa y el aislamiento de las poblaciones conduce a que las especies adquieran algún grado de vulnerabilidad y riesgo de extinción (Kattan, 2002).

La fragmentación del paisaje es un fenómeno alarmante que puede tener un impacto negativo en la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas. Según Fahrig (2003), la fragmentación del paisaje se refiere a la disminución de los hábitats naturales en segmentos más pequeños y aislados, causada por actividades humanas como la urbanización, la agricultura intensiva, la ganadería y la construcción de carreteras. Este proceso cambia significativamente la estructura del paisaje y afecta negativamente a las especies y los ecosistemas naturales. Haddad et al. (2015), destacaron que la fragmentación del paisaje interrumpe el flujo de genes, restringe el movimiento de especies, fragmenta poblaciones, aumenta el riesgo de extinción local y reduce la biodiversidad. Además, la fragmentación del paisaje afecta procesos ecológicos más complejos como la dispersión de semillas, la polinización y la dinámica de las poblaciones, interacciones clave para la sostenibilidad de los ecosistemas boscosos.

La cobertura forestal en Costa Rica, según datos de 2005 se situó en un 47,89 % (Obando & Malavasi, 2012). Sin embargo, de acuerdo con el mapa más reciente de tipos de bosque y otras tierras, la cobertura forestal ha aumentado a un 57,1% (Cubero, 2022). La disminución de la deforestación en Costa Rica fue motivada por políticas de conservación ambiental entre ellas el establecimiento de corredores biológicos. El establecimiento de corredores biológicos se ha convertido en una estrategia para combatir el efecto negativo de la fragmentación, los cuales tienen como objetivo el movimiento de poblaciones, individuos, gametos y propágulos a través de hábitats fragmentados (Hilty, Keeley, Merenlender & Lidicker, 2019). Mediante el Decreto Ejecutivo N° 33106, en el año 2006, Costa Rica oficializó su Programa Nacional de Corredores Biológicos (PNCB), el cual tiene como objetivo la conservación y uso sostenible de la biodiversidad. Los corredores biológicos abarcan más del 38 % del territorio continental del país, y cuando se combinan

con el 25 % de las áreas protegidas, conforman más del 60 % del territorio total. Estas dos estrategias de conservación juegan un papel fundamental (Sancho, 2021).

A partir del año 2016, el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) ha impulsado la ejecución de iniciativas que incluyen el diseño paisajístico y el establecimiento de una red de corredores biológicos en el Campus Tecnológico Central Cartago y el Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR, 2019). A partir de estas iniciativas, se han realizado estudios para determinar la diversidad de la flora y la fauna en los corredores biológicos del campus; sin embargo, aún se tienen vacíos de información como es el análisis de la conectividad de los corredores biológicos del campus. Por este motivo, el presente trabajo tiene como fin evaluar los índices de fragmentación del paisaje de la microcuenca del río Toyogres, con el objetivo de generar recomendaciones de conservación que aumenten la conectividad de los corredores biológicos del Campus Tecnológico Central Cartago.

2 OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Evaluar la conectividad estructural del paisaje circundante a los corredores biológicos del Campus Tecnológico Central Cartago del ITCR.

1.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las coberturas y usos del suelo del paisaje circundante al Campus Tecnológico Central Cartago del ITCR en la microcuenca del río Toyogres.
2. Analizar la conectividad estructural del paisaje circundante al Campus Tecnológico Central Cartago del ITCR en la microcuenca del río Toyogres.
3. Generar recomendaciones para la conservación de la biodiversidad de los corredores biológicos del Campus Tecnológico Central Cartago del ITCR según las coberturas, usos del suelo y conectividad estructural del paisaje.

3 REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Ecología del paisaje

La ecología del paisaje es una ciencia interdisciplinaria en la cual se analizan los patrones de heterogeneidad paisajística y los procesos que establecen la abundancia y distribución de los organismos (Arroyo-Rodríguez, Moreno & Galán-Acedo, 2017). Según Wu (2013), la ecología del paisaje es un campo científico que se enfoca en examinar y mejorar la conexión entre las pautas de distribución espacial y los procesos ecológicos, en una amplia gama de escalas y niveles de organización. Para identificar posibles corredores biológicos y su establecimiento, es importante comprender la dinámica del paisaje y los elementos que lo componen (Hernández, 2020).

La ecología del paisaje es un campo de estudio que examina las interacciones entre los patrones espaciales de los elementos naturales y los procesos ecológicos. Al considerar las variables relevantes, se busca comprender la complejidad de los paisajes y su impacto en la biodiversidad y los ecosistemas. La conectividad del paisaje, como señala Haddad et al. (2015), es otra variable crucial que se refiere a la facilidad de desplazamiento entre hábitats. Por otro lado, la fragmentación del paisaje evaluada por Fahrig (2003) examina los efectos de la división de paisajes en fragmentos más pequeños. Además, Pickett et al. (2007) destacan la importancia de la heterogeneidad del paisaje, que analiza la variabilidad de los hábitats y características espaciales. Estas variables influyen en la distribución de especies y los procesos ecológicos en los paisajes, y su comprensión es fundamental para desarrollar estrategias de conservación y gestión sostenible.

Las estrategias de conservación son fundamentales para proteger la biodiversidad y los ecosistemas en todo el mundo. Por ejemplo, la creación y gestión de áreas protegidas ha sido ampliamente reconocida como una estrategia clave (Dudley, 2008). La restauración de hábitats degradados también desempeña un papel crucial en la conservación de la biodiversidad, permitiendo la recuperación de especies y la mejora de la calidad del hábitat (Jones & Schmitz, 2009). Además, la adopción de prácticas de uso sostenible de los recursos naturales es esencial para garantizar la conservación a largo plazo (Díaz et al., 2019). La participación de las comunidades locales en la toma de decisiones se ha destacado como un factor clave para el éxito en la implementación de estrategias de conservación (Berkes, 2004).

3.1.1 Usos del suelo

Según la Ley de Planificación Urbana 4240, el uso de la tierra es la utilización de un terreno y la estructura construida o instalada en él, incluida la forma y la cantidad de uso. Esta ley define las diferentes categorías de uso de suelo, como por ejemplo la residencial, comercial, industrial, agrícola, turístico, forestal, entre otros. Además, el uso del suelo en Costa Rica está reglamentado por el Plan Regulador de cada municipalidad, el cual establece las normas específicas para el uso del suelo en cada zona del territorio municipal.

Para los estudios de uso y cobertura del suelo en Costa Rica, se han utilizado varios sistemas de clasificación como lo es el Sistema Nacional de Monitoreo de Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE), cuyo propósito principal es dar a conocer la condición actual y las modificaciones en la cobertura y uso del suelo, así como en los ecosistemas, a través del monitoreo (CENIGA, 2020).

Un estudio realizado por Foley et al. (2005), señala que la conversión de los ecosistemas naturales en tierras agrícolas y urbanas es una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad y la degradación de los servicios ecosistémicos. La expansión de la agricultura y la urbanización implican la eliminación de hábitats naturales, lo que resulta en la pérdida de especies y la disminución de la conectividad del paisaje. Además, la planificación urbana basada en principios de diseño sostenible y la creación de áreas verdes urbanas pueden mejorar la calidad del hábitat, la conectividad ecológica y la salud de los ecosistemas urbanos (Nielsen et al., 2014). Esto destaca la importancia de considerar los usos del suelo de manera sostenible y equilibrada para mantener la integridad ecológica. Por otro lado, la conservación y la gestión adecuada de los usos del suelo pueden ser herramientas efectivas para proteger la biodiversidad y mantener la funcionalidad de los ecosistemas. Según un estudio realizado por Tschardt et al. (2012), la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, como la agricultura orgánica y la agricultura de conservación, puede promover la diversidad de especies y la provisión de servicios ecosistémicos.

3.1.2 Características y dinámicas de los usos del suelo

En el ciclo global del carbono, se presentan tanto los flujos como las reservas de carbono. Las principales reservas de carbono incluyen los minerales de la Tierra, tales como la caliza y la dolomita, los océanos, los suelos y la vegetación terrestre, junto con la

atmósfera (Osman & Osman, 2013). Según Lindenmayer & Fischer (2006), es posible que la diversidad natural se deba a las diferencias espaciales en las condiciones del suelo, lo que ha permitido la convivencia de diferentes tipos de plantas adaptadas a suelos con diferentes niveles de nutrientes. La transformación del uso del suelo, tiene consecuencias sobre las características en cuanto a su eficacia y capacidad de producción, generando modificaciones en el sustrato y repercutiendo en su calidad (Toledo, Arzuaga, Galantini & Vazquez, 2018). Conocer las características y dinámicas del suelo es fundamental al diseñar estrategias de recuperación, tales como la restauración ecológica. Es importante considerar el estado del suelo, como la compactación, erosión, niveles freáticos, lixiviación entre otras características, para garantizar la eficacia en la restauración (Vargas, 2011).

3.2 Conectividad estructural del paisaje

Los bosques tropicales tienen una estructura única gracias a varios factores importantes, como sus altas temperaturas, la exposición constante a la luz solar a lo largo del año, las abundantes lluvias y la diversidad biológica (Brandon, 2014). En un estudio realizado por Alvarado (2020), entre los principales elementos para evaluar la conectividad estructural se encuentran los usos de suelo, los tipos de suelo, el porcentaje de pendientes, los pozos y nacientes, la zonas de vida, la densidad poblacional, la fragmentación del bosque, tamaño de los parches, caminos y carreteras, entre otros.

La conectividad es el grado en que el paisaje facilita o dificulta los desplazamientos entre zonas (Acuña, 2010). Según Rico (2017), la conectividad estructural se refiere a la disposición física y la diversidad de los componentes del paisaje, como la vegetación y la distribución de las carreteras. En cambio, la conectividad funcional se refiere al comportamiento de los organismos en respuesta a estos elementos del paisaje, que pueden facilitar o restringir la dispersión de genes y el movimiento de organismos entre parches de hábitat. La conectividad estructural aumenta cuando los fragmentos con cobertura vegetal están próximos entre sí, lo cual se fundamenta en la teoría de la biogeografía de islas (Gustafson & Parker, 1994).

La teoría de la biogeografía de islas se ha utilizado para estudiar los efectos de la fragmentación de los paisajes terrestres, debido a que comparte los principios básicos de la fragmentación del hábitat. En ambos casos, el hábitat se divide en parches aislados de diferentes tamaños, separados por barreras que limitan la distribución de las especies. La

teoría de la biogeografía insular predice que la diversidad de especies en las islas depende de la tasa de colonización y extinción, así como de la relación entre el tamaño de la isla y la distancia de otras islas o del continente (MacArthur y Wilson, 1967). De manera similar, la diversidad de especies en hábitats continentales fragmentados puede depender de las tasas de colonización y extinción y de la relación entre el tamaño del fragmento y la distancia de otros fragmentos o hábitats continuos (Hanski, 1998). Esta teoría proporciona un marco conceptual útil para comprender los efectos de la fragmentación de los hábitats naturales sobre la biodiversidad y la ecología de las especies, para analizar patrones de diversidad y composición de especies de parches fragmentados y predecir los efectos tanto en la biodiversidad como en los procesos ecológicos (Laurance et al., 2002).

Costa Rica es un país conocido por su biodiversidad y su extensa red de áreas protegidas, pero también es un lugar donde la fragmentación del hábitat es un problema creciente. Varios estudios han abordado la conectividad estructural en el país y han identificado áreas clave para la conservación y la restauración de la conectividad del paisaje. En un estudio realizado por Wood, Sheridan, Feagin, Castro & Lacher (2017), se analizó la estructura del paisaje y los procesos de conectividad y fragmentación en los corredores biológicos de Costa Rica. Se utilizaron datos de teledetección para evaluar la estructura del paisaje y se llevaron a cabo encuestas para evaluar la presencia y abundancia de especies animales. Los resultados mostraron que la estructura del paisaje es importante para la conectividad de los corredores biológicos y que la fragmentación del hábitat es un problema para la biodiversidad en la región. Otro estudio realizado por Calvo-Obando (2009) evaluó la fragmentación del paisaje y la conectividad de los corredores biológicos en Costa Rica. A través de la utilización de técnicas de teledetección, SIG y análisis estadístico, el estudio pudo identificar los principales índices de fragmentación presentes en tres corredores biológicos específicos, y evaluar la capacidad de estos corredores para permitir el movimiento de la fauna y la flora entre áreas fragmentadas. Como parte de los resultados se obtuvo que a nivel nacional el 26% de los corredores biológicos presentan conectividad estructural alta, el 69% media y el 6% baja.

3.3 Conectividad funcional del paisaje

Es esencial verificar la efectividad de los corredores biológicos al determinar su conectividad funcional. No obstante, es importante destacar que evaluar esta conectividad implica identificar qué organismos o grupos de organismos son de interés principal para el corredor, considerando las características particulares de las especies involucradas

(Alonso, Finegan, Brenes, Günter & Palomeque, 2017). Las especies pueden tener diferentes requerimientos de hábitat y movilidad, por lo que es fundamental considerar estas características al diseñar estrategias de conservación y restauración del paisaje (Haddad et al., 2015). La conectividad funcional juega un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. Los corredores biológicos son una herramienta importante para facilitar esta conectividad, pero es crucial tener en cuenta las características específicas de las especies focales al evaluar su eficacia (Fahrig et al., 2019; Haddad et al., 2015).

En el caso de las especies de mamíferos, por ejemplo, la evaluación de la conectividad funcional de los corredores biológicos se puede realizar mediante diversas metodologías, entre las cuales destaca el modelado de hábitat y la utilización de herramientas de análisis de paisaje (Adriaensen et al, 2003; Guillera-Aroita et al, 2018). En el modelado de hábitat, se identifican los factores clave que influyen en la distribución de la especie en cuestión y se construyen modelos que permiten estimar la calidad del hábitat en diferentes áreas del paisaje (De Angelo et al, 2014). Por otro lado, las herramientas de análisis de paisaje permiten cuantificar la conectividad funcional entre las diferentes áreas de hábitat, identificando los obstáculos que impiden el movimiento de los mamíferos y evaluando la eficacia de los corredores biológicos existentes o propuestos (Baguette et al, 2013; Guillera-Aroita et al, 2018).

3.4 Corredores biológicos como estrategia de conservación

Los corredores biológicos son franjas de vegetación que unen fragmentos aislados (Sharon, 2009) y han progresado de diversas maneras en todo el mundo como herramientas para la conservación. Los enfoques adoptados han sido influenciados por la diversidad de elementos físicos y contextos sociopolíticos presentes en los territorios, lo que ha llevado a la creación de una variedad de esquemas de corredores con distintas funcionalidades y permanencias (Hernández, Ortega-Argueta, Campillo, Bello-Baltazar & Nieto, 2022). Existen corredores planificados y no planificados. Los corredores no planificados a menudo se encuentran en áreas naturales con buena calidad de hábitat y alta biodiversidad. Por el contrario, los corredores planificados son corredores de conservación biológica construidos con el objetivo de mejorar la conectividad del hábitat (Wang, Qu, Zhong, Zhang, Zhang, Zhang, Yi, Zhang, Li, Liu, 2022).

El Programa Nacional de Corredores Biológicos de Costa Rica es una iniciativa del gobierno que busca la conservación y conectividad de los ecosistemas del país mediante la creación de corredores biológicos. Este programa es ejecutado por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). El MINAE trabaja en coordinación con otras instituciones, como el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), organizaciones de base y no gubernamentales, así como de los sectores productivo y privado. La ejecución del programa incluye la identificación y delimitación de corredores biológicos, la restauración de áreas degradadas y la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de los recursos naturales (SINAC, 2006).

Algunos de los métodos para el diseño de un corredor biológico es el descrito por Wang et al. (2022), quienes utilizaron una metodología que consta de varias etapas para identificar áreas críticas para la conservación y restauración en un entorno urbano. En primer lugar, se llevó a cabo la selección de especies focales. Posteriormente, se evaluó la calidad del hábitat y los valores de resistencia. Luego, se identificaron las posibles rutas mediante programas de computación especializados. Para delimitar la extensión espacial apropiada de los corredores ecológicos, se determinó la anchura mediante el establecimiento de búferes, se identificó la distancia máxima a la que los animales podían migrar por medio de la modelización de enlaces y se clasificaron las áreas con alta movilidad potencial según la densidad actual. Finalmente, se identificaron las áreas con mayores oportunidades de restauración mediante la evaluación de costos de la construcción de posibles corredores.

Por otra parte, un estudio realizado por Beita, Murillo & Alvarado (2021), examinó la efectividad de los corredores ecológicos en Costa Rica como herramienta para la conservación de la biodiversidad y la adaptación al cambio climático. El estudio utilizó datos de teledetección y análisis espacial para evaluar la estructura del paisaje y la conectividad entre diferentes parches de hábitat, así como la vulnerabilidad de los corredores al cambio climático. Los resultados mostraron que los corredores ecológicos en Costa Rica son importantes para mantener la conectividad entre los parches de hábitat y mejorar la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático. Sin embargo, también se identificaron limitaciones en algunos corredores, como la falta de conectividad entre parches de hábitat y la presencia de barreras artificiales como carreteras y zonas urbanas.

3.4.1 Corredores interurbanos en el Campus Tecnológico Central Cartago - ITCR

La falta de espacios verdes en las ciudades precisa la implementación de estrategias que involucren tramas verdes. La creación de corredores biológicos en zonas urbanas ayuda a equilibrar la asignación de espacios verdes, además contribuye a la reducción de ruido y contaminación, el establecimiento de estos corredores favorece la conectividad y conservación ecológica (Feoli, 2013). Además, los corredores biológicos interurbanos ofrecen beneficios adicionales, como la mitigación de los efectos del cambio climático y la mejora de la calidad del aire y del agua en áreas urbanas (Alberti et al., 2017). Estos corredores también pueden promover la recreación y el contacto con la naturaleza para los residentes urbanos.

En el caso del Campus Tecnológico Central Cartago del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), cerca del 32% de las 88,5 hectáreas que comprende han sido designadas como zonas de conservación y protección, lo que implica que su uso está restringido y limitado para actividades humanas. Entre las áreas conservadas se encuentran nacientes de agua, humedales y orillas de ríos. Sin embargo, también se han incluido áreas urbanizables (Guzmán, 2019). En la actualidad, las áreas de conservación del ITCR cuentan con un reconocimiento de protección otorgado por la oficina regional del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) de Cartago. Así mismo, el ITCR está ubicado dentro del Corredor Biológico Ribereño Interurbano Subcuenca Reventado Aguacaliente (COBRI SURAC). Este corredor abarca desde las montañas del Volcán Irazú, atraviesa la ciudad de Cartago de norte a sur y se extiende hasta las zonas protegidas de los ríos Navarro y Sombrero, ubicados en las estribaciones de la cordillera de Talamanca.

4 MATERIALES Y METODOS

4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la microcuenca del río Toyogres, la cual tiene un área aproximada de 23 km² y pertenece a la cuenca del Reventazón (Figura 1), ubicada entre las coordenadas 9.95973, -83.93239 y 9.83312, -83.85566 (latitud, longitud). Esta microcuenca incluye los corredores ecológicos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Campus Tecnológico Central Cartago. La distribución del suelo en la zona se caracteriza principalmente por áreas destinadas a la agricultura y el desarrollo urbano en la parte sur. El terreno presenta un relieve abrupto, con un cambio significativo de elevación que va desde las áreas cercanas al volcán Irazú con altitudes de 2300 msnm hasta el centro urbano de Cartago a 1300 msnm (Méndez-Morales, 2013).

La temperatura promedio de la microcuenca oscila entre los 16 °C a 25 °C en la parte media, mientras que en las cercanías del volcán Irazú las temperaturas varían desde los 5 °C hasta los 9 °C (Varela, 2013). La precipitación anual es en promedio de 1480,4 mm. Las zonas de vida presentes son: Bosque Húmedo, Bosque Muy Húmedo y Bosque Pluvial (INDER, 2016). Los principales ríos de la zona son río Toyogres, río Chinchilla, río Seco, Quebrada Seca, Quebrada Caída y Quebrada Zopilote según el Atlas de Costa Rica 2014 (Ortiz-Malavasi, 2014).

Respecto a la biodiversidad de la microcuenca, la zona presenta gran diversidad principalmente de avifauna. Los corredores biológicos del ITCR reportan más de 100 especies de aves (Chinchilla, 2022). Además, presentan gran diversidad de mamíferos terrestres como el tepezcuintle, coyote, guatusa, armadillo, entre otros; mientras que las especies de flora con mayor abundancia son *Digitaria costaricensis*, *Callistemon speciosus* y *Cojoba arborea* (Alvarado, 2022).

Microcuenca Río Toyogres, Cartago, Costa Rica

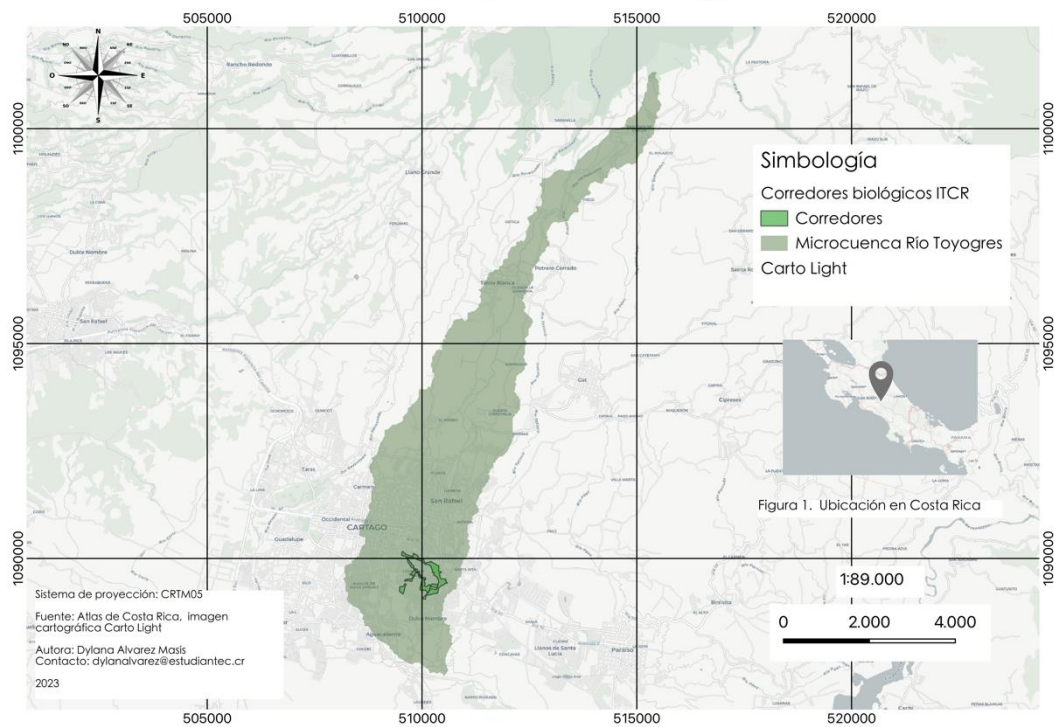


Figura 1. Delimitación de la microcuenca del río Toyogres.

La zona comprende los distritos Oriental, Occidental, Dulce Nombre, Carmen, Potrero Cerrado, San Rafael y Tierra Blanca. Así mismo, la microcuenca está ubicada dentro del Corredor Biológico Ribereño Interurbano Subcuenca Reventado Aguacaliente (COBRI SURAC). Este corredor atraviesa la ciudad de Cartago de norte a sur y abarca los cantones de Oreamuno, El Guarco y Cartago. Además, forma parte del área de conservación Cordillera Volcánica Central (Rojas-Guerrero, 2010).

4.2 Recolección de datos

4.2.1 Caracterización de coberturas y usos del suelo

Para la toma de datos de campo se utilizaron los usos de la tierra determinados por el Sistema de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE). Se tomó un total de 122 puntos, ubicados cada 500 metros, iniciando en el campus central del ITCR (coordenadas en CRTM05, X: 509796,5948 Y: 1089099,166) y abarcando toda la microcuenca del río Toyogres.

Se obtuvieron imágenes SENTINEL-2 mediante un código programado en Google Earth Engine, modificado para esta tesis, el cual arrojó un mosaico delimitado con la microcuenca. Las imágenes no requirieron preprocesamiento debido a que no presentaban nubosidad y tenían un nivel de procesamiento 2A. Las imágenes utilizadas fueron las de agosto del 2023. Se determinaron macro clases, entre ellas: Infraestructura, Agricultura, Zonas húmedas, Ganadería y pastos y por último Conservación y manejo de bosques.

Para el proceso de clasificación se utilizó el programa SNAP, con el cual se crearon polígonos de entrenamiento a través de toda la microcuenca. Se utilizó el algoritmo Random Forest para la clasificación, basado en la construcción de múltiples árboles de decisión aleatorios y la combinación de sus resultados para obtener una predicción más precisa. La clasificación con SNAP no requirió de un proceso de validación, ya que el algoritmo ejecuta la validación cruzada mediante la separación de datos para estimar el rendimiento del modelo (Fragoso-Campón & Quirós, 2019).

Para evaluar la exactitud de la clasificación se utilizó la fórmula:

$$E = \frac{\text{Número de predicciones correctas}}{\text{Total de predicciones}}$$

Mientras que para evaluar la precisión se utiliza la fórmula:

$$P = \frac{\text{Verdaderos positivos}}{\text{Verdaderos positivos} + \text{falsos positivos}}$$

4.2.2 Evaluación de la conectividad estructural del paisaje

Las imágenes obtenidas en el punto anterior fueron analizadas utilizando el software QGIS 3.32, con el complemento LecoS (Landscape Ecology Statistics), el cual se basa en las métricas de FRAGSTATS, que permite descargar un archivo Excel (.csv) para su interpretación. Para realizar el análisis de la conectividad estructural del paisaje, se seleccionaron los índices de número de parche (NP), área (CA), porcentaje (PLAND), número de parches, mayor área de parches, cohesión (COHESION) e índice de división del paisaje.

Se calculó manualmente la proporción del área con el paisaje mediante la fórmula:

$$pi = \left(\frac{\text{Área total por categoría}}{\text{Área total del paisaje}} \right) \times 100$$

Además, se calculó el índice SHANNON para calcular la diversidad en cada fragmento. Posteriormente, con el complemento SAGA versión 9.1, se determinó la fragmentación y conectividad con mapas de calor que representaron la menor y mayor fragmentación de la microcuenca. Se utilizaron las categorías de SAGA utilizadas por López, (2016). El grado de fragmentación se estimó según la relación del área de cobertura boscosa y el área total (Galván-Guevara, Ballut-Dajud & De La Ossa-V, 2015), con la siguiente fórmula: $F = \text{área de bosque} / \text{área total}$. Los valores de F varían entre 0 y 1, siendo 1 un paisaje sin fragmentar y 0 un paisaje altamente fragmentado.

4.2.3 Recomendaciones para la conservación

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización de los usos del suelo, así como de la evaluación de la fragmentación del paisaje, se elaboró una propuesta preliminar con acciones específicas para aumentar la conectividad del paisaje. Lo anterior, para brindar mejores condiciones al hábitat natural que permitan la conservación de las especies de fauna que en estudios anteriores se han registrado que utilizan los corredores biológicos del Campus Tecnológico Central Cartago del ITCR. Posteriormente, se seleccionaron actores clave, como personal de la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral (GASEL) y el Comité local de gestión del Corredor Biológico Ribereño Interurbano Subcuenca Reventado Aguacaliente (COBRI SURAC), para validar de forma conjunta la propuesta preliminar elaborada. De esta forma, tomar en cuenta otras acciones de conservación que se consideraran necesarias para llevar a cabo dentro de la microcuenca y disminuir la fragmentación. El proceso se ejecutó mediante reuniones virtuales, la primera reunión se realizó el 6 de septiembre del 2023, con el personal de GASEL, con la participación de dos personas. Posteriormente, el 13 de octubre 2023 se realizó la segunda reunión en conjunto con el Comité local del COBRI SURAC, con la participación de 13 personas. En las sesiones, se anotaron las propuestas brindadas y se plasmaron en el documento de manera puntual. Posteriormente, se conformó la propuesta final con las acciones de conservación, la cual fue presentada mediante correo electrónico a los actores clave que participaron previamente, con la intención de acordar las posibilidades reales de llevarla a cabo.

4.3 Análisis de la información

El análisis de las coberturas y usos del suelo se realizó mediante la utilización de sistemas de información geográfica con mapas para visualizar los usos en el área de estudio. En el caso de la fragmentación, se interpretaron los índices del paisaje con base en el estudio “Análisis de Conectividad Espacial y Fragmentación de la Ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta” (López, 2016). Para el análisis de los datos se utilizaron los programas Excel, QGIS, LecoS. Por su parte, la propuesta de recomendaciones de conservación de la microcuenca fue analizada de forma grupal con los actores clave en cada una de las reuniones realizadas. Según se iban recibiendo las recomendaciones se realizó una discusión para cada una con la intención de afinar las acciones concretas y se agregaron a la propuesta hasta conformar la versión final.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterización de coberturas y usos del suelo

El total de muestras para entrenar y evaluar el algoritmo Random Forest fue de 5648, las cuales representan un conjunto de datos con características asociadas que el modelo utiliza para realizar las predicciones. Para la categoría "Conservación y manejo de bosques" (1000), se registraron 636 muestras, lo que corresponde al 11,26% del conjunto. Posteriormente, la categoría "Agricultura" (2000), representa un 35,41% del total con 2000 muestras. La categoría "Ganadería y pastos" (3000) comprende 821 muestras, lo que equivale al 14,54%. Asimismo, "Infraestructura" (5000) con 2000 muestras, contribuyendo con un 35,41%. Por último, la categoría "Zonas húmedas" (4000) y cuenta con 191 muestras, representando el 3,38% del conjunto (Cuadro 1). El resultado obtenido de la clasificación se presenta en la Figura 2.

Cuadro 1. Clasificación por categorías de uso de suelo de la microcuenca del río Toyogres.

Clase	Nombre	Porcentaje (%)	Número de datos	Área (m ²)
1000	Conservación y manejo de bosques	11,26	636	2 314 000
2000	Agricultura	35,41	2000	8 683 500
3000	Ganadería y pastos	14,57	821	3 842 400
4000	Zonas húmedas	3,38	191	369 200
5000	Infraestructura	35,41	2000	8 984 000

Fuente: Datos de campo.

Según el cuadro anterior, se destaca la infraestructura como la categoría con mayor extensión, ocupando 8 984 000 m². En contraste, las zonas húmedas presentan la menor área, con 369 200 m². La agricultura se caracteriza por una extensa área de 8 683 500 m², lo que destaca la presencia de áreas agrícolas a gran escala. En la categoría de ganadería y pastos abarca un área de 3 842 400 m². Estos datos indican una coexistencia marcada de actividades agrícolas y ganaderas, principalmente en la zona norte de la microcuenca. En cuanto a la conservación y manejo de bosques, esta tiene un área de 2 314 000 m². Este parche es notablemente menor en comparación con los de infraestructura y agricultura, resaltando la expansión extensa de áreas dedicadas a estas actividades.

En la Figura 2 se muestra el mapa resultante de la clasificación de los usos de suelo.

Cobertura del suelo 2023 de la microcuenca del río Toyogres,
Cartago, Costa Rica

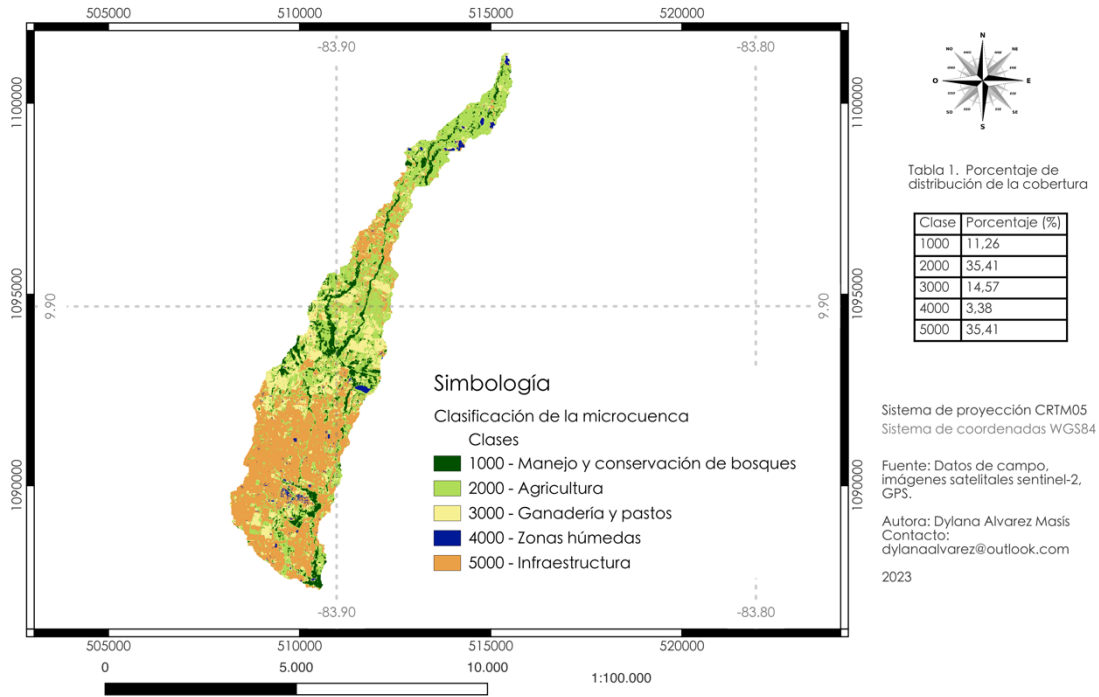


Figura 2. Usos del suelo 2023 de la microcuenca del río Toyogres, Cartago, Costa Rica

Las zonas altas de la microcuenca se caracterizan por la producción agrícola principalmente de hortalizas como coliflor, cebolla y papa. También presenta actividad ganadera con presencia de pastos y algunos sitios con zonas urbanas discontinuas. La zona media y sur de la microcuenca se caracteriza por la presencia de zonas urbanizadas de manera continua e infraestructura industrial, comercial y de servicio como escuelas y colegios (Figura 2).

Los resultados con la clasificación de Random Forest con el software SNAP, indican un sólido desempeño del modelo, con un 95,36% de predicciones acertadas en un conjunto de 5648 muestras. Además, el bajo valor del cuadrado medio del error de 0,29, respalda la eficacia del modelo en la realización de predicciones en el conjunto de datos.

Los resultados de la validación cruzada presentan altos niveles de exactitud, precisión y correlación en la mayoría de las clases. Específicamente, la clase "Conservación y manejo de bosques" destaca con una exactitud del 98,19%, lo que determina que el modelo realiza muy buenas predicciones en esta categoría. De manera similar, las clases "Agricultura" con una precisión del 92,50%, "Ganadería y pastos" con 95,29 % e "Infraestructura" con 99,18 % (Cuadro 2).

Cuadro 2. Exactitud y precisión de la clasificación por categoría en la microcuenca del río Toyogres.

Clase	Nombre	Exactitud	Precisión
1000	Conservación y manejo de bosques	0,98	0,91
2000	Agricultura	0,95	0,92
3000	Ganadería y pastos	0,98	0,95
4000	Infraestructura	0,98	0,99
5000	Zonas húmedas	0,99	1,00

Fuente: Datos de campo e imagen clasificada.

5.2 Evaluación de la conectividad estructural del paisaje

Los datos presentados en el Cuadro 3 se desglosan en varias categorías. La "Clase" representa la categoría específica de uso de suelo. El "Uso de la tierra" proporciona la cantidad exacta de metros cuadrados de tierra que cada clase abarca. La "Proporción del paisaje" muestra la contribución de cada categoría al paisaje general, expresada en términos de porcentaje. El "Número de parches" indica cuántas áreas discontinuas o parches conforman cada categoría. Por último, la "Mayor área de parche" señala el tamaño del parche más grande dentro de cada categoría.

Cuadro 3. Uso de la tierra, proporción del paisaje, número y mayor área de parches según las clases en la microcuenca del río Toyogres.

Clase	Nombre	Uso de la tierra (m ²)	Proporción del paisaje	Número de parches	Mayor área de parche (m ²)
1000	Conservación y manejo de bosques	2 314 000	9,56	1077	344 100
2000	Agricultura	8 683 500	35,89	2135	3 416 100
3000	Ganadería y pastos	3 842 400	15,88	2043	444 200
4000	Zonas húmedas	369 200	1,53	442	52 500
5000	Infraestructura	8 984 000	37,14	1077	6 995 000

Fuente: Datos de campo

Según el Cuadro 3, la clase infraestructura, tuvo la mayor cantidad de metros cuadrados (8 984 000 m²) y también el parche más grande con un área de 6 995 000 m². La clase agricultura tuvo la segunda mayor cantidad de metros cuadrados, con un valor de 8 683 500 m² y un parche grande de 3 416 100 m². La clase Zonas húmedas mostró la menor cantidad de metros cuadrados (369 200 m²).

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de cohesión, índice que midió la unión o cohesión de los parches de una clase. Valores más altos indican una mayor cohesión, lo que sugiere que los parches son más grandes y continuos. Por su parte, el índice de división midió cuán fragmentados o divididos estaban los parches en una clase, valores más bajos indican una menor fragmentación.

Cuadro 4. Índice de cohesión e Índice de división para cada clase en el paisaje de la microcuenca del río Toyogres.









Clase	Nombre	Índice de cohesión del parche	Índice de división
1000	Conservación y manejo de bosques	9,61	2843,48
2000	Agricultura	9,91	34,42
3000	Ganadería y pastos	9,65	1343,22
4000	Zonas húmedas	9,94	11,92
5000	Infraestructura	9,17	108343,46

Fuente: Datos de campo

Las clases de Agricultura y Zonas húmedas obtuvieron los valores más altos en cuanto al índice de cohesión (9,91 y 9,94 respectivamente), lo que significa una mayor unión en sus parches. Respecto al índice de división, estas mismas clases mostraron los valores más bajos en este índice (34,42 y 11,92 respectivamente), lo que sugiere que la extensa presencia de cultivos agrícolas en el paisaje resulta en la cohesión y escasa fragmentación de las fincas o terrenos destinados a esta actividad. Esta predominancia de zonas agrícolas adquiere una importancia significativa, ya que limita el espacio disponible para otras actividades, como la conservación (Cuadro 4).

En el Cuadro 5 se muestran las categorías de fragmentación utilizadas por SAGA GIS (López, 2016), las cuales permiten identificar, cuantificar y mapear las categorías de fragmentación dentro de las áreas cubiertas de árboles. Este Cuadro fue utilizado para analizar la Figura 3.

Cuadro 5. Categorías de fragmentación para el análisis de la microcuenca del río Toyogres.

Categorías de fragmentación	Color	Densidad
Núcleo		Igual a 1
Interior		Mayor a 0,9
Indeterminado		Mayor a 0,6
Perforado		Mayor a 0,6
Borde		Mayor a 0,6
Transición		0,4 < densidad < 0,6
Parche		Menor a 0,4
Ninguno		Menor a 0,2

Fuente: López, F., 2016. Adaptado de Phua et al., 2008, antes Riitters et al., 2000.

Según el cuadro 5, la categoría "Núcleo" con una densidad igual a uno destaca áreas de extrema cohesión y homogeneidad, representando zonas donde la fragmentación es mínima. Por otro lado, la categoría "Interior" con una densidad mayor a 0,9 señala áreas con cierto grado de fragmentación, pero manteniendo una conectividad significativa. La categoría "Indeterminado" y "Perforado", ambas con densidades mayores a 0,6 reflejan paisajes que exhiben una fragmentación más evidente. La categoría "Borde", también con una densidad mayor a 0,6, resalta áreas de transición entre fragmentos. La categoría "Transición", con una densidad entre 0,4 y 0,6 representa zonas de cambio gradual en la estructura del paisaje. Por último, las categorías "Parche" y "Ninguno" con densidades menores a 0,4 y 0,2 respectivamente, identifican áreas altamente fragmentadas.

En la Figura 3, se muestran los resultados obtenidos de la fragmentación del paisaje en el área de estudio. Se logra observar muy pocas áreas núcleo, que son fundamentales para establecer las posibles rutas de conectividad del paisaje. Según la fórmula de fragmentación, la microcuenca obtuvo un valor de $F = 0,11$, lo que representa una zona altamente fragmentada. Esta fragmentación se puede atribuir a la actividad agrícola extensiva y la expansión urbana.

Fragmentación 2023 de la microcuenca del río Toyogres, Cartago, Costa Rica

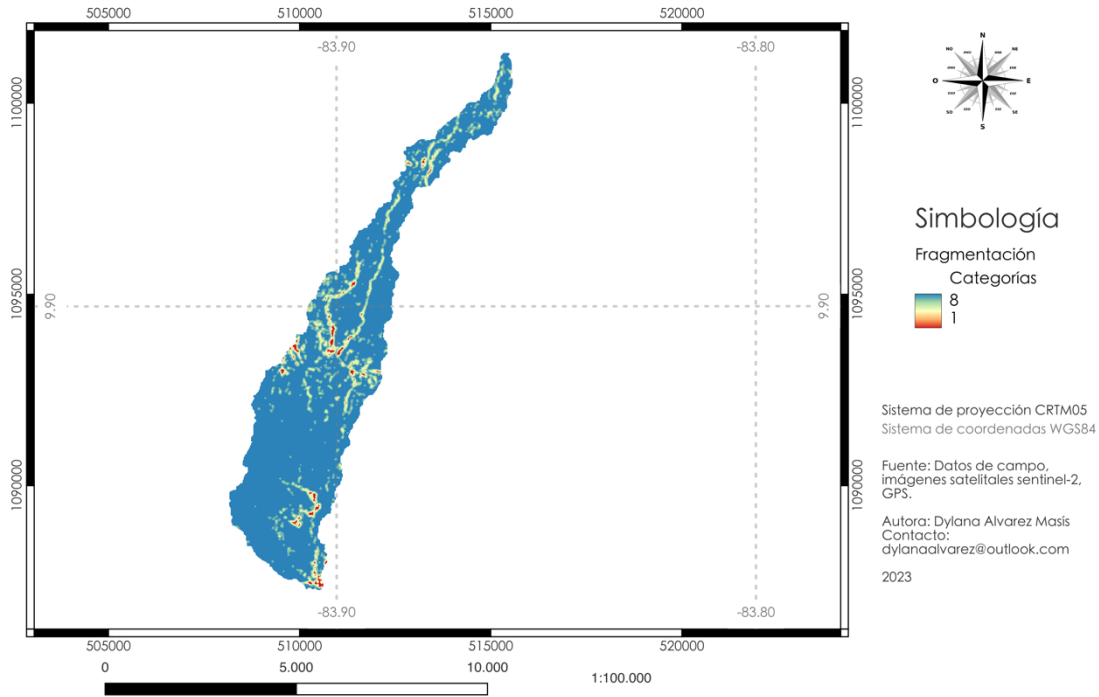


Figura 3. Mapa de fragmentación de la microcuenca río Toyogres.

Según el mapa de fragmentación (Figura 3), los sitios con mayor concentración de áreas con cobertura boscosa se presentan en la parte norte con la cobertura arrabal de la microcuenca del río Toyogres y la microcuenca del río Chinchilla, en los distritos de Tierra Blanca y Potrero Cerrado, donde se ubican los principales poblados de Tierra Blanca y San Juan de Chicué. Ambas microcuencas se desconectan en la zona media donde se encuentran los distritos del Carmen, San Rafael y Oriental, distritos con gran desarrollo urbano. Posteriormente, la microcuenca del río Toyogres se logra conectar mediante los corredores biológicos del ITCR, que albergan el parche más grande en la categoría de Conservación y manejo de bosques, conectando con la subcuenca del río Reventado, al sur de la provincia de Cartago, distrito Dulce Nombre.

El análisis realizado sobre conectividad del paisaje, utilizando una escala de 0 a 100, donde 0 indica que no existe conectividad y 100 que existe conectividad (Figura 4), se centró en la identificación de la continuidad espacial de un ecosistema en términos de su estructura. Esto se refiere a los componentes físicos que constituyen el paisaje, definida también por el número de enlaces funcionales entre parches del mismo tipo. El método

aplicado por SAGA implicó la medición de la cantidad de píxeles adyacentes a las áreas cubiertas de árboles, lo que permitió determinar el grado de fragmentación.

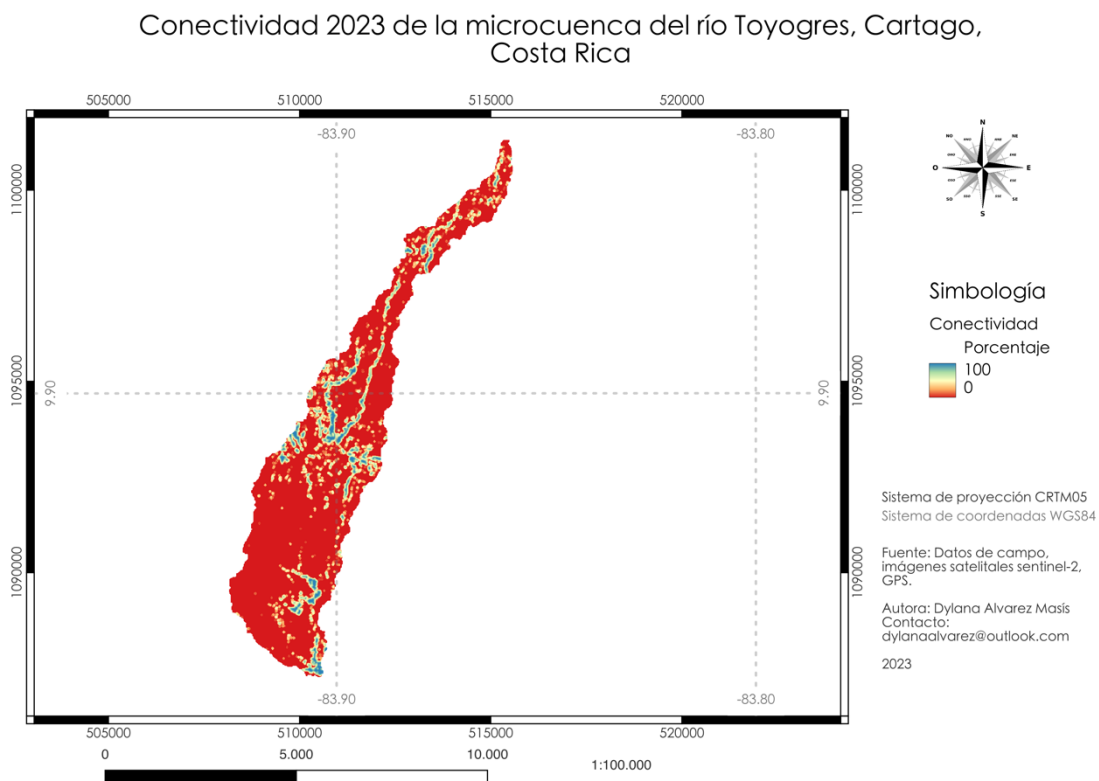


Figura 4. Mapa de conectividad de la microcuenca del río Toyogres.

El estudio de conectividad sugiere un paisaje altamente fragmentado, principalmente en la parte media de la microcuenca donde se presentan mayormente valores de 0. Adicionalmente, se realizó el cálculo del índice Shannon, para determinar la homogeneidad de los valores de importancia en los fragmentos de la muestra, este generó un valor de 1,32 lo que sugiere un paisaje diverso, en el cual la conectividad se ve interrumpida por la coexistencia de diversos usos.

5.3 Recomendaciones para la conservación de la microcuenca

Para abordar los desafíos de la conservación de la biodiversidad y la mejora de la conectividad en el paisaje fragmentado de la microcuenca del río Toyogres, se conformó una serie de recomendaciones generadas a partir de los resultados de este estudio, englobadas en tres componentes clave: Ecológico, Investigación y Educación. En el

componente Ecológico, el enfoque se centró en la restauración de hábitats, fortalecimiento de corredores ecológicos y promoción de la agricultura sostenible, incluidas acciones como la restauración de áreas críticas, el control de especies invasoras y la integración de procesos biológicos en la producción agrícola. El componente de Investigación se desarrolló con la intención de comprender la biodiversidad presente en la microcuenca a través de estudios de campo, análisis genéticos, poblacionales y la investigación de patrones de movimiento de la fauna. Finalmente, el componente de Educación se elaboró para destacar la importancia de la concientización pública, la capacitación de la comunidad en conservación-restauración y la participación activa de las comunidades locales tanto en proyectos de restauración como en la gestión sostenible de los recursos locales. Este enfoque integral busca promover la sostenibilidad ambiental y la salud del ecosistema en la microcuenca, a través de una combinación de acciones estratégicas y la participación activa de la comunidad (Cuadro 6).

Cuadro 6. Recomendaciones de conservación y mejoramiento de la conectividad en el paisaje fragmentado de la microcuenca del río Toyogres según componentes, objetivos y acciones a desarrollar.

Componente	Objetivos	Acciones a desarrollar
Ecológico	1. Restauración de hábitats	Restaurar hábitats clave para el restablecimiento de la conectividad entre los fragmentos de bosque.
	2. Fortalecimiento de corredores ecológicos	Fortalecer la conectividad estructural y funcional de los corredores biológicos existentes.
	3. Promoción de la agricultura sostenible	Promover el desarrollo de una agricultura sostenible en las áreas productivas del paisaje.
		<ol style="list-style-type: none"> 1. Restaurar las áreas críticas identificadas. 2. Controlar especies invasoras en zonas vulnerables. 3. Reverdecer los espacios públicos e introducir zonas verdes en zonas urbanizadas. <ol style="list-style-type: none"> 1. Restaurar y mantener los corredores existentes mediante la revegetación de zonas prioritarias. 2. Fomentar la cooperación con propietarios de tierras. 3. Promover prácticas sostenibles y de bajo impacto ambiental en las tierras privadas. <ol style="list-style-type: none"> 1. Promoción de insumos renovables en la actividad agrícola. 2. Integración de procesos biológicos y ecológicos en la producción agrícola.

Investigación	4. Investigación de la biodiversidad	Generar conocimiento para la comprensión de la biodiversidad presente en el paisaje de la microcuenca.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar estudios de campo y monitoreos de especies de fauna presentes en los fragmentos de bosque. 2. Analizar datos genéticos y poblacionales de la diversidad de las especies de fauna que utilizan los fragmentos. 3. Investigar los patrones de movimiento de las especies de fauna. 4. Generar investigaciones complementarias sobre diversidad de flora e interacciones planta-animal.
	5. Evaluación de la eficacia de las acciones	Evaluar continuamente las acciones realizadas y su efectividad, para la identificación de las necesidades de adaptación o cambios requeridos.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer indicadores de éxito y monitoreo. 2. Realizar evaluaciones periódicas de la conectividad funcional. 3. Fomentar la colaboración con universidades y centros educativos.
Educación	6. Concientización pública	Informar a la comunidad sobre la relevancia de la conservación de biodiversidad.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desarrollar campañas de educación ambiental. 2. Promover la participación ciudadana en la restauración. 3. Divulgar los resultados de los estudios realizados y la efectividad de las acciones de conservación desarrolladas.
	7. Capacitación	Capacitar a la comunidad en temas de conservación y restauración de ecosistemas naturales vulnerables.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ofrecer programas de capacitación en ecología y restauración de ecosistemas. 2. Facilitar prácticas y pasantías en proyectos de campo sobre restauración. 3. Identificar necesidades e intereses de capacitación en las comunidades del área de influencia de la microcuenca.
	8. Participación comunitaria	Involucrar a las comunidades locales en la conservación del paisaje de la microcuenca.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Involucrar a las comunidades en los proyectos de restauración. 2. Promover la gestión sostenible de los recursos locales. 3. Valorar el conocimiento local en la toma de decisiones.

Cabe destacar que la mejora de la conectividad en un paisaje fragmentado es un desafío que requiere una acción coordinada. Más allá de las acciones detalladas en el cuadro anterior, es fundamental reconocer la importancia de la colaboración y la divulgación de estas iniciativas para lograr resultados efectivos. La creación de alianzas estratégicas es esencial para aprovechar los recursos, conocimientos y experiencias de diversos actores. La participación de municipalidades, ONGs, instituciones gubernamentales como AyA e ICE, la empresa privada, el Comité Local del COBRI SURAC, el SINAC y áreas protegidas es clave para el éxito de las acciones. Estos actores pueden aportar recursos financieros, logísticos y técnicos, así como influencia en la toma de decisiones y la implementación de políticas. En el corto plazo, es imperativo organizar a estos actores de manera efectiva. Esto implica asignar responsables y plazos específicos para cada acción, establecer roles y responsabilidades claros garantiza que las metas se cumplan de manera oportuna y eficiente. La coordinación entre los diferentes actores también ayuda a evitar la duplicación de esfuerzos y a optimizar los recursos disponibles. Además, es fundamental realizar una valoración de costos y presupuestos para la ejecución de las acciones propuestas. Esto permite tener una visión realista de los recursos financieros necesarios y asegura la viabilidad de los proyectos a largo plazo.

5.3.1 Rutas de conectividad

Según el análisis del paisaje y el gran desarrollo urbano en la zona de estudio, una de las alternativas para mejorar la conectividad es la revegetación de las zonas de protección de los ríos. Según lo estipulado en el plan regulador del cantón de Cartago, en el inciso 58.1.14.- Zona de protección de ríos y quebradas (ZPRQ), se tiene como objetivo recuperar, regenerar, disfrutar y proteger todos los bordes y riberas de ríos y quebradas. Las rutas de conectividad propuestas tienen como objetivo reducir la fragmentación entre los parches de cobertura boscosa, realizando la revegetación de la ribera de los ríos Quebrada Seca, río Toyogres y río Chinchilla. Para la revegetación de la ribera de los ríos se recomienda lo estipulado por el inciso 33 de la Ley Forestal donde se debe crear una franja de 15 metros en zonas rurales y 10 metros en zonas urbanas, si el terreno es plano, y de 50 horizontales si el terreno es quebrado.

Rutas de conectividad microcuenca del Río Toyogres, Cartago, Costa Rica

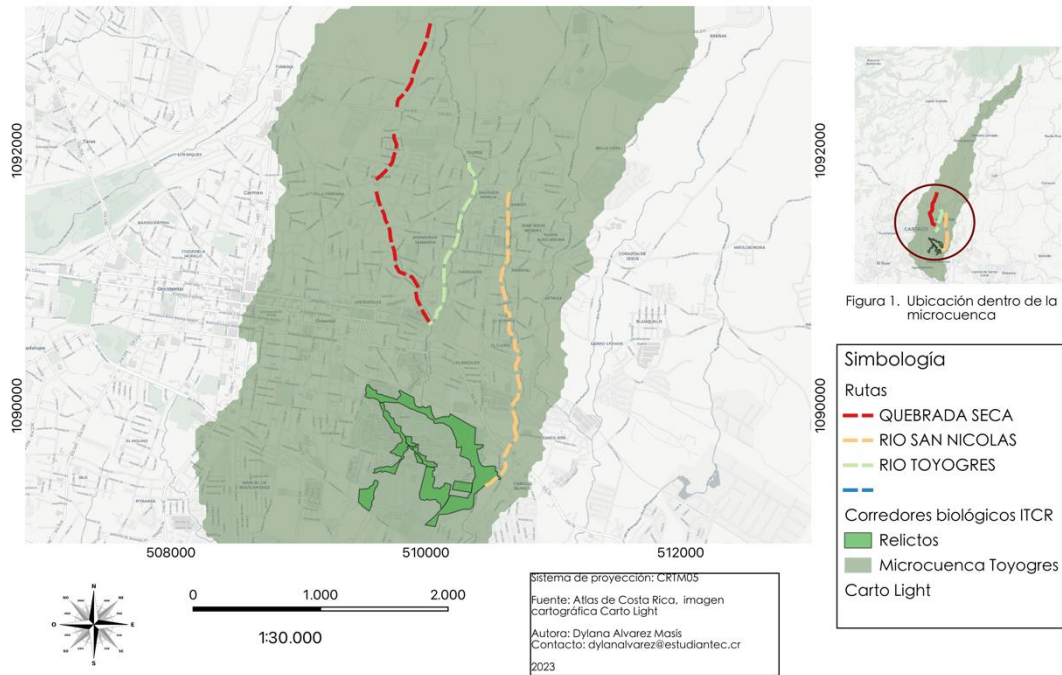


Figura 5. Propuesta de rutas de conectividad en la microcuenca del río Toyogres.

En la Figura 5 se muestran tres rutas de conectividad propuestas para disminuir la fragmentación en la microcuenca. La Ruta 1, cuenta con una longitud de 1,36 km y va desde el polideportivo INVU Los Ángeles hasta cerca del Salón Comunal Sagrada Familia en Oreamuno de Cartago. La Ruta 2, cuenta con una longitud de 2,98 km desde la planta de tratamiento de aguas en el ITCR hasta panificadora Irazú en Oreamuno y la Ruta 3 tiene 2,65 km de longitud y va desde el polideportivo INVU Los Ángeles hasta cuadras La Trinidad en San Blas. Como parte de la retroalimentación obtenida, se acordó realizar enlaces con el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), ya que uno de sus proyectos es la rearborización urbana que tiene como objetivo el reverdecimiento de los espacios en la ciudad así como alianzas estratégicas entre entes públicos y privados.

6 DISCUSIÓN

Mediante la aplicación de técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG), se calculó los principales índices de fragmentación en la microcuenca del río Toyogres. Según los resultados de la clasificación, en las zonas altas se destaca la actividad agrícola centrada en hortalizas y la presencia de ganadería, mientras que la zona media y sur donde se encuentran los distritos del Carmen, San Rafael, Oriental y Agua Caliente se caracteriza por un desarrollo urbano continuo y una infraestructura diversificada que incluye sectores industriales y educativos, además se muestra una clara desconexión de áreas boscosas. Según el índice de división de paisaje = 34,42, obtenido para la clase de agricultura, a pesar de ser el segundo uso de tierra con mayor cobertura dentro de la microcuenca, representa un valor bastante bajo de división. Este valor demuestra las amplias zonas que están cohesionadas y destinadas a la misma actividad, principalmente en las zonas altas. Por tanto, se revela un claro dominio de infraestructuras y actividades agrícolas, planteando desafíos para la conservación del paisaje y la biodiversidad.

De acuerdo con las métricas del paisaje, los patrones de distribución de la cobertura boscosa se encuentran a lo largo de la red hídrica de la microcuenca, ya que las áreas con cobertura boscosa se encuentran principalmente en las riberas de los ríos Toyogres y Chinchilla y en los corredores biológicos dentro del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), los cuales representan los parches más grandes para esta categoría según los resultados. Sin embargo, la poca existencia de áreas núcleo dificulta el desplazamiento de especies con requerimientos específicos, ya que estas áreas son elegidas por animales y plantas en función de factores como su forma, longitud, amplitud y la variedad de hábitats que ofrecen, entre otros (Morera-Beita, Sandoval-Murillo & Alfaro-Alvarado, 2021).

La clasificación del uso del suelo muestra la coexistencia de áreas destinadas a la conservación de bosques, agricultura y expansión urbana. Además, la densidad de población de los cantones de Cartago y Oreamuno agrega una dimensión demográfica relevante, esto se refleja en los datos de censo del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), para el año 2022, donde el cantón de Cartago estuvo entre los más densamente poblados, con un total de 165 417 habitantes, mientras que el cantón Oreamuno contó con un total de 50 874 habitantes (INEC, 2022).

Según el "Mapa de bosques y otras tierras de Costa Rica" elaborado por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) en 2022, la microcuenca del río Toyogres abarca una extensión de 22 839 440,06 m² clasificada como "Otras tierras". Esta categoría engloba actividades como agricultura, ganadería, infraestructura y zonas húmedas. Por otro lado, la clasificación realizada con el programa SNAP en el presente trabajo, arrojó una cifra ligeramente inferior, registrando un total de 21 879 100 m². En general, se observa una correspondencia significativa entre ambas clasificaciones. En lo que respecta a la cobertura boscosa, el mapa del SINAC indica una extensión de 846 118,07 m², mientras que la clasificación mediante el programa SNAP arrojó un valor de 2 314 000 m². Esta disparidad se atribuye a que las coberturas a lo largo de las riberas de los ríos no quedan reflejadas en la capa del SINAC (SINAC, 2022).

Según los resultados de fragmentación obtenidos, estos tienen un valor de $F = 0.11$, lo que refleja una zona altamente fragmentada. Entre las principales causas de la fragmentación de la microcuenca están la actividad agrícola y el desarrollo urbano. Según Beita y Sandoval, en el 2015, el índice de fragmentación para los cantones de Cartago y Oreamuno se categorizó como moderado lo que conlleva procesos medios de fragmentación y conectividad (Morera-Beita & Sandoval-Murillo, 2018), sin embargo, una de las diferencias entre ambos estudios es que las imágenes utilizadas para el 2015 presentaban una resolución espacial de 30 metros, lo cual puede influir en la determinación de la fragmentación.

Un estudio realizado por Foley et al. (2005), enfatiza que la conversión de hábitats naturales en tierras agrícolas y urbanas constituye una de las causas primordiales de la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas. La expansión de la agricultura y la urbanización implican la disminución de hábitats naturales, lo que a su vez provoca la pérdida de especies y la reducción de la conectividad del paisaje. Sin embargo, la región norte de la provincia de Cartago aporta significativamente a la economía nacional, siendo responsable del 80% de la producción de hortalizas y comunidades cercanas como Llano Grande y Tierra Blanca tienen una clara vocación agrícola, dado que aproximadamente el 80% de su superficie se destina a actividades agrícolas (Ramírez, McHugh, & Alvarado, 2008).

En lo que respecta a la conectividad, esta se evalúa teniendo en cuenta la densidad y fragmentación de los parches de bosque. Los resultados revelan una marcada fragmentación desde los corredores biológicos del ITCR hacia la zona media de la microcuenca, donde se evidencia la expansión territorial ya que esta área forma parte del

núcleo central de la provincia de Cartago. Es esencial destacar la importancia de los corredores biológicos implementados por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), ya que permiten conectar la microcuenca del río Toyogres hasta la parte sur.

Respecto a las recomendaciones para la conservación, desde el ámbito ecológico, el reforzar las zonas de protección es fundamental para la conservación de la biodiversidad ya que los ríos han desempeñado un papel fundamental como corredores biológicos y en el contexto urbano, su función se amplía para convertirse en corredores interurbanos, lo que permite proporcionar hábitats, refugio y recursos necesarios para una amplia variedad de fauna desde mamíferos grandes como el coyote (*Canis latrans*), hasta especies de aves residentes y migratorias (Alvarado-Brenes, 2022). Además del reverdecimiento de las áreas de protección, dentro de la microcuenca se encuentran los parques urbanos como Plaza Mayor, Parque Intergeracional, Skate park de Tierra Blanca, Parque de Tierra Blanca, Parque San Rafael de Oreamuno y Parque de Dulce Nombre. Los parques urbanos desempeñan un papel fundamental en la salud ecológica de los entornos urbanos, dado que cumplen funciones cruciales, como la regulación de la temperatura, la reducción de la contaminación y la contribución al control y la purificación de la escorrentía de aguas pluviales (Barrantes-Sotela, 2020). El objetivo de la propuesta es transformar los espacios públicos urbanos en entornos más sostenibles y saludables a través de la plantación y mantenimiento de árboles, la creación de áreas verdes y la implementación de prácticas de diseño ecológico, para aumentar la calidad del aire, promover la biodiversidad, y ofrecer a la comunidad entornos atractivos y accesibles que fomenten la interacción social y el bienestar humano (Hartig, Mitchell, de Vries & Frumkin, 2014).

Respecto a la propuesta de agricultura sostenible, producto de esta actividad agrícola intensa, en algunos cantones de la microcuenca, como Tierra Blanca, Oreamuno y Pacayas, se evidencian problemas de salud notables, que abarcan desde afecciones respiratorias hasta la presencia de tumores malignos y diversos tipos de cáncer (Ramírez, McHugh, & Alvarado, 2008). La zona norte de Cartago se distingue en el país por el extenso uso de plaguicidas, que se debe a una combinación de factores, como la intensa actividad agrícola, las condiciones climáticas y una cultura arraigada de aplicar estos productos químicos en los cultivos (Pomareda, 2023). Estudios realizados en quebradas de la zona han identificado niveles de contaminación por fertilizantes, sedimentos y plaguicidas con concentraciones que ejercen además un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad circundante. Además, otros estudios han reportado un grado de vulnerabilidad en las fuentes de agua potable de la microcuenca

debido a la presencia de nitratos y plaguicidas (Fournier, Ramírez, Ruepert, Vargas, & Echeverría, 2010).

Como lo planteó Morera (2006), la propuesta de agricultura sostenible debe mantener y enlazar tanto la productividad biológica como la económica. La agricultura sostenible implica la integración de procesos biológicos y ecológicos y prácticas integrales como fundamento para promover una agricultura agroecológica, que involucre prácticas como la reducción de la labranza, la gestión de los usos de la tierra, la utilización de fertilizantes orgánicos y medidas de conservación del suelo a largo plazo (Riverol & Aguilar, 2015). También fomenta la colaboración colectiva para abordar desafíos comunes en la agricultura y la gestión de recursos naturales, como el control de plagas, la gestión de cuencas, el riego y la conservación de bosques (Pretty, 2008). El enlace directo con los agricultores sobre la gestión de recursos naturales busca concienciar a los agricultores sobre la importancia de la sostenibilidad ambiental en sus prácticas agrícolas y proporcionarles las herramientas y el conocimiento necesario para implementar acciones que beneficien tanto al entorno como a su propio sustento y la salud humana.

Por otra parte, la implementación del programa de sensibilización ambiental en escuelas y colegios consiste en motivar una acción proactiva entre estudiantes y personal docente con respecto a los desafíos ambientales (Pedrozo, 2017), tanto a nivel global como local. Esta propuesta propone la incorporación de la educación ambiental en el plan de estudios y la ejecución de actividades prácticas orientadas a la conservación.

Es importante resaltar que la restauración ecológica de la microcuenca del río Toyogres debe ser abordada de manera integral, teniendo en cuenta el desarrollo urbano, el desarrollo económico y la promoción de la agricultura sostenible, tanto en beneficio de las comunidades como de los ecosistemas presentes. La evaluación de los problemas que afectan a la zona de estudio es esencial para involucrar a los actores clave y desarrollar estrategias que aborden las necesidades de manera conjunta.

7 CONCLUSIONES

La microcuenca del río Toyogres se distingue por la predominancia de áreas urbanas y agrícolas.

La clase de Conservación y manejo de bosques sólo aporta el 11,26 % de cobertura a la microcuenca.

La fragmentación es uno de los principales problemas en la microcuenca del río Toyogres, debido a la frontera agrícola y el desarrollo urbano.

Los resultados de la clasificación muestran a la zona media de la microcuenca como una zona desconectada.

La intervención a corto plazo en las rutas de conectividad propuestas para la microcuenca incrementa la conectividad estructural en la zona que presenta mayor fragmentación.

Las acciones propuestas en el plan de conservación y mejoramiento de la conectividad promueven una sólida base para la conservación y la gestión sostenible del paisaje en la microcuenca.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de conectividad funcional de la microcuenca ya que esto permite determinar si las áreas están interconectadas de manera efectiva.
- Incorporar tecnología avanzada, como sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG), para un monitoreo en tiempo real y un análisis más eficiente de los datos de la microcuenca.
- Llevar a cabo las recomendaciones sugeridas para combatir los desafíos de conservación.
- Establecer alianzas con organizaciones gubernamentales, no gubernamentales y la participación activa de la comunidad.
- La obtención de recursos financieros emerge como un elemento crucial para materializar las variadas iniciativas propuestas en el plan de conservación, asegurando su viabilidad y sostenibilidad a lo largo del tiempo.
- La asignación clara de responsabilidades a diferentes actores involucrados en la ejecución de las recomendaciones de conservación asegurará una coordinación efectiva y la no duplicación de acciones.
- Desarrollar programas de capacitación dirigidos a los agricultores con el propósito de instruirles en la adopción de prácticas agrícolas sostenibles.

9 REFERENCIAS

- Acuña Caro, C. A. (2010). Identificación de áreas prioritarias de conservación enfocadas hacia la conectividad estructural del corredor Encenillo (municipios de la Calera, Guasca, Sopo, Sesquilé, Guatavita), Cundinamarca.
- Adriaensen, F., Chardon, J. P., De Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Gulinck, H., & Matthysen, E. (2003). The application of “least-cost” modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 64(4), 233-247.
- Alberti, M., Correa, C., Marzluff, J., Hendry, A., Palkovacs, E., Gotanda, K., & Katti, M. (2017). Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8951-8956.
- Alonso, A. M., Finegan, B., Brenes, C., Günter, S., & Palomeque, X. (2017). Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia*, 39(1), 140-156.
- Alvarado Espinoza, J. (2020). Conectividad ecológica estructural de la microcuenca del río Tibás para la ampliación del Corredor Biológico Interurbano Pará-Toyopán.
- Alvarado-Brenes, R. (2022). Diversidad de aves, mamíferos terrestres y vegetación en los corredores biológicos del campus tecnológico central Cartago, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Arroyo-Rodríguez, V., Moreno, C. E., & Galán-Acedo, C. (2017). La ecología del paisaje en México: logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 42–51. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.rmb.2017.10.004>
- Baguette, M., Blanchet, S., Legrand, D., Stevens, V. M., & Turlure, C. (2013). Individual dispersal, landscape connectivity and ecological networks. *Biological Reviews*, 88(2), 310-326.
- Barrantes-Sotela, O. (2020). Aportes desde la conservación genética al mejoramiento de las áreas verdes en la ciudad. *Revista Geográfica de América Central*, (64), 26-40.

- Beita, C. M., Murillo, L. F. S., & Alvarado, L. D. A. (2021). Ecological corridors in Costa Rica: An evaluation applying landscape structure, fragmentation-connectivity process, and climate adaptation. *Conservation Science and Practice*, 3(8), e475.
- Berkes, F. (2004). Rethinking community-based conservation. *Conservation Biology*, 18(3), 621-630.
- Brandon, K. (2014). Ecosystem services from tropical forests: review of current science. *Center for Global Development Working Paper*, (380).
- Calvo-Obando, A. J. (2009). Determinación de índices de fragmentación y modelamiento de la conectividad en los corredores biológicos de Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica.
- CENIGA. (2020). Descripción del Sistema de Clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra propuesto para el SIMOCUTE. *Ambientico*. 23-34
- Chinchilla, N. (2022). Las aves son el grupo más diverso y numeroso de la fauna que habita en el Campus TEC Cartago. Hoy en el TEC.
- Cubero, L. (2022). Lanzan mapa de bosques y otras tierras del país. Recuperado el 22 de noviembre de 2023, de UNA Comunica website: <https://www.unacomunica.una.ac.cr/index.php/noviembre-2022/4328-lanzan-mapa-de-bosques-y-otras-tierras-del-pais>
- De Angelo, C. D., Paviolo, A., Ferraz, K. M., Di Bitetti, M. S., & De Angelo, J. A. (2014). Implementing landscape ecology in conservation: from corridors to strategic planning. *Journal for Nature Conservation*, 22(3), 201-209.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H., Agard, J., Arneth, A., & Zayas, C. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100.
- Dudley, N. (2008). Guidelines for applying protected area management categories. Gland, Switzerland: IUCN.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 34(1), 487-515.

- Fahrig, L., Arroyo-Rodríguez, V., Bennett, J. R., Boucher-Lalonde, V., Cazetta, E., Currie, D. J., ... & Pfeifer, M. (2019). Is habitat fragmentation bad for biodiversity? *Biological conservation*, 230, 179-186.
- Feoli, S. (2013). Corredor Biológico Interurbano del Río Torres y corredores biológicos en general. *Ambientico*.
- Foley, J., DeFries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., & Snyder, P. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574.
- Fournier M., Ramírez, M., Ruepert, C., Vargas, S. & Echeverría, S. (2010). Diagnóstico sobre contaminación de aguas, suelos y productos hortícolas por el uso de agroquímicos en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica. *Informe Final del Diagnóstico sobre uso y residuos de agroquímicos en Pacayas-Plantón- IRET/UNA*
- Fragoso-Campón, L., & Quirós, E. (2019). Sentinel Toolbox Application (SNAP) aplicado a la clasificación supervisada de imágenes PNOA. In *VXIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*.
- Galván-Guevara, S., Ballut-Dajud , G., & De La Ossa-V., J. (2015). Determinación de la fragmentación del bosque seco del arroyo Pechelín, Montes de María, Caribe, Colombia. *Biota Colombiana*, 16(2),149-157.[fecha de Consulta 29 de Noviembre de 2023]. ISSN: 0124-5376. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49144024007>
- Guillera-Arroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., Elith, J., Gordon, A., Kujala, H., Lentini, P. E., ... & McCarthy, M. A. (2018). Is my species distribution model fit for purpose? Matching data and models to applications. *Global Ecology and Biogeography*, 27(3), 276-292.
- Gustafson, E. J., & Parker, G. R. (1994). Using an index of habitat patch proximity for landscape design. *Landscape and urban planning*, 29(2-3), 117-130.
- Guzmán, M. (2019, diciembre 12). Tecnológico implementa corredores biológicos en sus Campus. Recuperado el 28 de noviembre de 2023, de Hoy en el TEC website: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2019/12/12/tecnologico-implementa-corredores-biologicos-sus-campus>

- Haddad, N., Brudvig, L., Clobert, J., Davies, K., Gonzalez, A., Holt, R., & Levey, D. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science advances*, 1(2).
- Hanski, I. (1998). Metapopulation dynamics. *Nature*, 396(6706), 41-49.
- Hartig, T., Mitchell, R., de Vries, S., & Frumkin, H. (2014). Nature and health. *Annual Review of Public Health*, 35(1), 207–228. doi:10.1146/annurev-publhealth-032013-182443
- Hernández Rodríguez, M. (2020). Genética del paisaje: una disciplina joven pero bien consolidada. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 41, 1–13.
- Hernández, A., Ortega-Argueta, A., Campillo, L., Bello-Baltazar, E., & Nieto, R. (2022). Effectiveness of management of the Mesoamerican Biological Corridor in Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104504.
- Hilty, J. A., Keeley, A. T., Merenlender, A. M., & Lidicker Jr, W. Z. (2019). Corridor ecology: linking landscapes for biodiversity conservation and climate adaptation. *Island Press*.
- INDER. (2016). Caracterización del territorio Cartago, Oreamuno, El. Guarco, La Unión. Región Central. Recuperado de Inder.go.cr website: <https://www.inder.go.cr/correque/Caracterizacion-territorio-Cartago-Oreamuno-El-Guarco-La-Union.pdf>
- INEC (2022). Estimación de Población y Vivienda 2022. Costa Rica.
- Jones, C., & Schmitz, O. (2009). Rapid recovery of damaged ecosystems. *PLoS Biology*, 7(6), e1000169
- Kattan, G. (2002). Fragmentación: patrones y mecanismos de extinción de especies. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. (pp. 561-590). <https://ebooks-tec-ac-cr.ezproxy.itcr.ac.cr/pdfreader/ecologa-y-conservacin-de-bosques-neotropicales>
- Laurance, W., Nascimento, H., Laurance, S., Andrade, A., Ewers, R., Harms, K. & Lovejoy, T. (2002). Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis. *PNAS*, 99(3), 12903-12906.

- Ley 4240 de 1968 de Planificación Urbana, Diario Oficial La Gaceta, n.º 274 del 30 de noviembre de 1968, Costa Rica.
- Lindenmayer, D. & Fischer, J. (2006). *Habitat Fragmentation and Landscape Change : An Ecological and Conservation Synthesis*. *Island Press*.
- López, F. N. (2016). Analisis de Conectividad Espacial y Fragmentacion de la Ecorregión Ciénaga Grande de Santa Marta. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/15692>.
- MacArthur, R., & Wilson, E. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton University Press.
- Méndez-Morales, M. (2013). Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), pág. 20–31. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1400>
- Morera, J. A. (2006). Agriculture, natural resources, environment and sustainable development in Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 11(1), 179–185. <https://doi.org/10.15517/am.v11i1.17453>
- Morera-Beita, C., & Sandoval-Murillo, L. (2018). Fragmentación y conectividad de la cobertura natural a nivel cantonal en Costa Rica durante los años 2000 y 2015. *Revista Geográfica de América Central*, 4(61E), 37-61.
- Morera-Beita, C., Sandoval-Murillo, L. F., & Alfaro-Alvarado, L. D. (2021). Evaluación de corredores biológicos en Costa Rica: estructura de paisaje y procesos de conectividad-fragmentación. *Revista Geográfica de América Central*, (66), 106-132.
- Nielsen, A., Van den Bosch, M., & Maruthaveeran, S. (2014). Species richness in urban parks and its drivers: a review of empirical evidence. *Urban ecosystems*, 17(1), 305-327.
- Obando, A. C., & Malavasi, E. O. (2012). Fragmentación de la cobertura forestal en Costa Rica durante los períodos 1997 – 2000 y 2000-2005. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9(22), 10–21. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123341&info=resumen&idioma=ENG>
- Ortiz-Malavasi, E. (2014). *Atlas de Costa Rica 2014*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- Osman, K. T., & Osman, K. T. (2013). Forest soils (pp. 229-251). *Springer Netherlands*.
- Pedrozo, H. C. (2017). Estrategias metodológicas para la implementación de una cultura ambiental en el Colegio San Paulo Tocancipa. Cundinamarca. Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Pickett, S., Cadenasso, M., Grove, J., Nilon, C., Pouyat, R., Zipperer, W., & Costanza, R. (2007). Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 32(1), 127-157.
- Pomareda, F. (2023). Zona norte de Cartago con alto uso de plaguicidas muestra aumento en incidencia de cáncer. Recuperado el 8 de noviembre de 2023, de Semanario Universidad website: <https://semanariouniversidad.com/pais/zona-norte-de-cartago-con-alto-uso-de-plaguicidas-muestra-aumento-en-incidencia-de-cancer/>
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 363(1491), 447–465. doi:10.1098/rstb.2007.2163
- Ramírez, L., McHugh, A., & Alvarado, A. (2008). Evolución histórica y caracterización socioeconómica de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6756>
- Rico, Y. (2017). La conectividad del paisaje y su importancia para la biodiversidad. *Research Gate*, 34, 28-30.
- Riverol, M., & Aguilar, Y. (2015). Alternativas para reducir la degradación de los suelos en Cuba y el enfrentamiento al cambio climático. *Sembrando en tierra viva. Manual de agroecología*, La Habana, Cuba, 117-132.
- Rojas-Guerrero, C. (2010). Propuesta para restauración de la zona de los diques, reserva nacional río Reventado, Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Sancho, J. (2021). Corredores biológicos de Costa Rica: estrategia de conservación participativa. *Ambientico*. Recuperado de Una.ac.cr website: <https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/37027/004-Sancho.pdf>

- Sharon K. Collinge. (2009). *Ecology of Fragmented Landscapes*. Johns Hopkins University Press.
- SINAC, 2022. "Mapa de bosques y otras tierras de Costa Rica ". (En impresión). Disponible en www.sinac.go.cr.
- SINAC. (2006). Programa Nacional de Corredores Biológicos. Costa Rica.
- Toledo, D., Arzuaga, S., Galantini, J., & Vazquez, S. (2018). Indicadores E Indices Biologicos De Calidad De Suelo en Sistemas Forestales. *Ciencia Del Suelo*, 36(2), 1–12.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Wanger, T. C., Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., & Whitbread, A. (2012). Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological conservation*, 151(1), 53-59
- Varela, A. (2013). Generalidades Del Parque Nacional Volcán Irazú. *Revista Geológica de América Central*, (48), 189-195. Retrieved November 10, 2023, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000100012&lng=en&tlng=es.
- Vargas Ríos, O. (2011). Restauración Ecológica: Biodiversidad Y Conservación. *Acta biológica colombiana*, 16(2), 221-246.
- Wang, Y., Qu, Z., Zhong, Q., Zhang, Q., Zhang, L., Zhang, R., Yi, Y., Zhang, G., Li, X., Liu, J. (2022). Delimitation of ecological corridors in a highly urbanizing region based on circuit theory and MSPA. *Ecological Indicators*, 142, 109258.
- Wood, M. A., Sheridan, R., Feagin, R. A., Castro, J. P., & Lacher Jr, T. E. (2017). Comparison of land use change in payments for environmental services and National Biological Corridor Programs. *Land Use Policy*, 63, 440-449.
- Wu, J. (2013). *Landscape Ecology*. In: Leemans, R. (eds) *Ecological Systems*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5755-8_11