

Análisis de conectividad espacial entre las áreas protegidas del sistema nacional SINAP de una región del sistema Kárstico en el flanco oriental de la Cordillera Central, en el Magdalena Medio Colombiano.

Caso de estudio como opción de grado

Elizabeth Cristina Sánchez Toro
elizabethsancheztoro@gmail.com

Tutor

Andrés Melo, Rita González

Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ingenierías

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Resumen

Las áreas protegidas en Colombia representan un componente vital para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, es por esto que se hace necesario mantener la dispersión, el movimiento y el flujo genético entre las áreas naturales, con la meta de garantizar la permanencia en el tiempo de los recursos naturales que son esenciales para la permanencia de la vida en la tierra. En este orden de ideas, el presente estudio tiene el objetivo de establecer el estado de la conectividad de las áreas naturales del sistema Kárstico ubicado en el flanco oriental del Magdalena Medio Colombiano, a partir de estimaciones utilizando los programas “Conefor” y *ArcGis* 10.2. Este permitió observar que las áreas protegidas con diferentes figuras de conservación juegan un papel crucial para mantener la conectividad entre las áreas naturales estableciendo la ruta de menor costo para la dispersión, movimiento y flujo de las especies.

Abstract

Protected areas in Colombia represent a strategic component for the maintenance of ecosystem services, therefore it is necessary to maintain dispersion, movement and genetic flow between natural areas, with the goal of guaranteeing the permanence over time of the essential natural resources for the permanence of life on earth. Consequently, the present study aims to establish the status of the connectivity of the natural areas of the Karstic system located on the eastern flank of the Magdalena Medio Colombiano, based on estimates using the “Conefor” and *ArcGis* 10.2. programs. This analysis shows that protected areas with different conservation figures are

crucial to maintain connectivity between natural áreas by establishing the least cost route for dispersal, movement and genetic flow of species in general.

1. Introducción

La conectividad en términos ecológicos y del paisaje se puede definir como las capacidades físicas y biogeográficas que tiene una región para permitir el movimiento e intercambio de las especies, en relación con su distribución en un paisaje determinado (*Bergsten et al., 2013*), el cual varía de acuerdo a la biología o al flujo genético que impulsa la diversidad, la variación genética y la especiación. En este sentido la conectividad entre áreas naturales resulta fundamental para garantizar la persistencia de las especies, la variabilidad genética de estas y los servicios ecosistémicos asociados a los objetivos de conservación que fundamentan la razón de ser de las áreas protegidas.

En Colombia, a través de las políticas gubernamentales se han logrado importantes acuerdos para la conservación de áreas claves para la permanencia y supervivencia de las especies (*Minambiente, 2016*); generando un programa nacional de áreas protegidas, con el objetivo de proteger y mantener la diversidad de las especies más representativas de la flora y de la fauna propias de cada hábitat y los servicios ecosistémicos asociados. Sin embargo, esto ha sido todo un reto, pues si bien al interior de las áreas protegidas persisten tensionantes que amenazan las especies, uno de los factores que afecta de manera crítica a estas áreas de conservación y sus respectivos beneficios ecosistémicos es la fragmentación.

Al hacer referencia a las áreas protegidas del sistema nacional, nos encontramos con un mosaico de áreas aisladas entre sí, que cuentan con registros de especies que tienen unos requerimientos de hábitat mucho mayores al tamaño de las áreas protegidas, lo que conlleva a una fuerte preocupación sobre la efectividad de las áreas protegidas y a una continua búsqueda de nuevas estrategias de conservación. En conclusión, la política de declarar áreas protegidas por sí sola no es eficaz (*Saura et al., 2019*), es necesario pensar en los procesos ecológicos, tales como los patrones de desplazamiento de las especies, el flujo genético de los organismos, la continuidad de los hábitats y las áreas de transición donde se da el intercambio de materia y energía (*Saura et al., 2018*), entre otros procesos que son esenciales para la supervivencia de las especies con

requerimientos específicos de hábitat, que generalmente resultan ser muy sensibles a los procesos de fragmentación y son una clave para la persistencia de los servicios ecosistémicos que obtenemos a partir de estas áreas naturales.

En este contexto, el presente estudio de caso tiene como fin hacer un análisis de conectividad entre las áreas protegidas del SINAP (sistema nacional de áreas protegidas) que incluyan tanto las áreas públicas del sistema nacional, regional y municipal, como las iniciativas privadas tales como las reservas de la sociedad civil, con el objetivo de entender como es el aporte a la conectividad de los ecosistemas y como es su contribución a la biodiversidad en la región del sistema Karstico que constituye un ecosistema conspicuo formado en su mayoría por rocas metamórficas (Fischer, *et al.*, 2018) y que particularmente está conformado por cavernas que ofrecen condiciones climáticas particulares para el desarrollo de especies endémicas.

2. Justificación

Las áreas protegidas son producto de la gestión política y científica, que durante varios años ha tenido como objetivo preservar los atributos únicos de la diversidad del trópico y la región andina y preservar los beneficios ecosistémicos asociados. Estas áreas se han ido creando de manera progresiva, llegando así a 14'268.224 millones de hectáreas de áreas de conservación al año 2019 en Colombia (PNN, 2019). Sin embargo, el gran problema de estas áreas es que al momento de su creación, fueron más un esfuerzo para conservar los relictos de áreas únicas naturales que ya se encontraban embebidos en una matriz fragmentada y en muchos casos aisladas; situación que afecta de manera crítica a la biodiversidad, en términos de la dispersión de las especies, la desaparición de poblaciones que son sensibles a procesos de perturbación, la interrupción del flujo genético con el aislamiento de los ensamblajes faunísticos.

La cordillera de los andes es el territorio más fragmentado e impactado de Colombia, ya que allí se concentra la mayor población del país y se llevan a cabo procesos constantes de urbanización, agrícolas, pecuarios, industriales y minero-energéticos; razón por la cual es imperativo conocer si las áreas naturales con alguna figura de conservación bien sea regional o municipal se encuentran conectadas entre sí, sobre todo en aquellas regiones con particularidades ambientales que representan un foco de endemismos y albergan una muy alta biodiversidad; y así establecer como algunos grupos representativos de la biodiversidad utilizan estas fuentes de

conectividad para favorecer el desplazamiento, la dispersión, el flujo genético y el sostenimiento de los servicios ecosistémicos.

3. Metodología.

El presente análisis se realizará a partir de datos y registros disponibles en los geoportales oficiales de Colombia de donde se extrae la siguiente información:

- Datos geográficos de la página del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas RUNAP <http://runap.parquesnacionales.gov.co/>
- Información Cartografía base del Instituto Colombiano Agustín Codazzi IGAC <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Información oficial áreas de bosque no bosque del IDEAM <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/tramites-servicios>

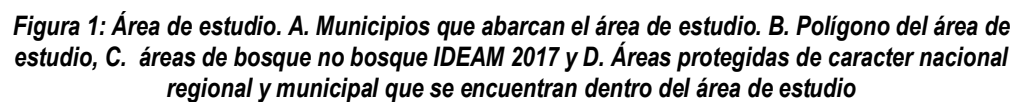
Se identificarán las áreas protegidas de carácter, nacional regional y municipal que están ubicadas dentro de la zona de estudio, y se cruzarán con la capa ráster más reciente disponible de “bosque no bosque” del IDEAM que está para el año 2017; adicionalmente se utilizarán las capas vectoriales de vías, drenajes y centros poblados como variables que permitan establecer el mejor modelo de conectividad espacial entre los ecosistemas naturales.

3.1 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco oriental de la cordillera central en el Magdalena medio colombiano, bajo jurisdicción de los departamentos de Antioquia y Caldas y abarca alrededor de 20 municipios entre los que se encuentran Sonsón, Samaná, Pensilvania, Argelia, Alejandría, Carmen de Viboral, Cocorná, Concepción, Granada, Guatapé, La Ceja, La Unión, Marinilla, Nariño, el Peñol, San Carlos, san francisco, San Luis, San Rafael y Santuario (figura 1).

Esta zona tiene un área de 700.905 ha y al interior de esta hay una gran influencia geomorfológica del sistema Kárstico, que constituye un sistema bastante conspicuo dado que la composición del suelo de la región está conformada predominantemente por formaciones de rocas calcáreas (mármol y caliza) y representan un valor además de ecosistémico, dado que en el área se

encuentran especies endémicas, también cuenta con un valor patrimonial y arqueológico para la región.



3.2 Análisis de conectividad

El presente análisis se realizará a través del software libre “Conefor” un programa que se puede anclar a *ArcGis* y optimizar la funcionalidad de ambas herramientas; lo que permite cuantificar de manera eficiente la importancia de las áreas de hábitat e identificar puntos clave para el mantenimiento o la mejora de la conectividad, también sirve para evaluar los impactos en la conectividad del hábitat y los cambios en el paisaje.

“Conefor” se concibe como una herramienta para el análisis de ecología espacial que sirve de apoyo para la toma de decisiones en la planificación de la conservación, a través de la identificación y priorización de sitios críticos para la conectividad del hábitat y el paisaje. El software incluye índices de conectividad (índice integral de conectividad, probabilidad de conectividad) que han demostrado un rendimiento mejorado en comparación con otros índices existentes y que son particularmente adecuados para aplicaciones de planificación de conservación del paisaje y monitoreo de cambios (Pascual-Hortal & Saura 2006, Saura y Pascual-Hortal 2007, Saura y Rubio 2010, Saura et al.2011).

El resultado es una capa raster que refleja el costo energético, dificultad, o riesgo de moverse de una especie a través de cada pixel. Estos valores se determinan de acuerdo a las características de cada pixel, tales como la cobertura del suelo, la densidad de población y la cercanía a drenajes y vías combinado con las necesidades específicas de hábitat de las especies (McRae & Darren, 2011) ver figura 2. Sin embargo, para este caso no se trabajará con alguna especie en particular, sino que se realizará con un grupo de variables que favorezcan la conectividad estructural:

- **Distancia entre áreas protegidas:** Entre más cerca se encuentre de los bosques actuales se hay una mayor probabilidad de conectividad.
- **Distancia centros poblados:** Entre más cerca están las áreas naturales de los centros poblados la probabilidad de conectividad en más bajo.
- **Distancia a vías:** Al alejarse de las vías los valores la probabilidad de conectividad aumenta.
- **Distancia a drenajes:** La probabilidad de conectividad es mayor al estar cerca de un drenaje o río.

- **Coberturas:** Las coberturas boscosas y naturales tienen un valor de conectividad igual a 100 y las coberturas de no bosque tienen un valor de conectividad de 0.
- Las variables anteriormente mencionadas se procesarán mediante una suma ponderada de acuerdo a la siguiente tabla:

Variable	Valor ponderado
Distancia entre áreas protegidas	20%
Distancia a centros poblados	15%
Distancia a vías	5%
Distancia a drenajes	40%
Coberturas	20%

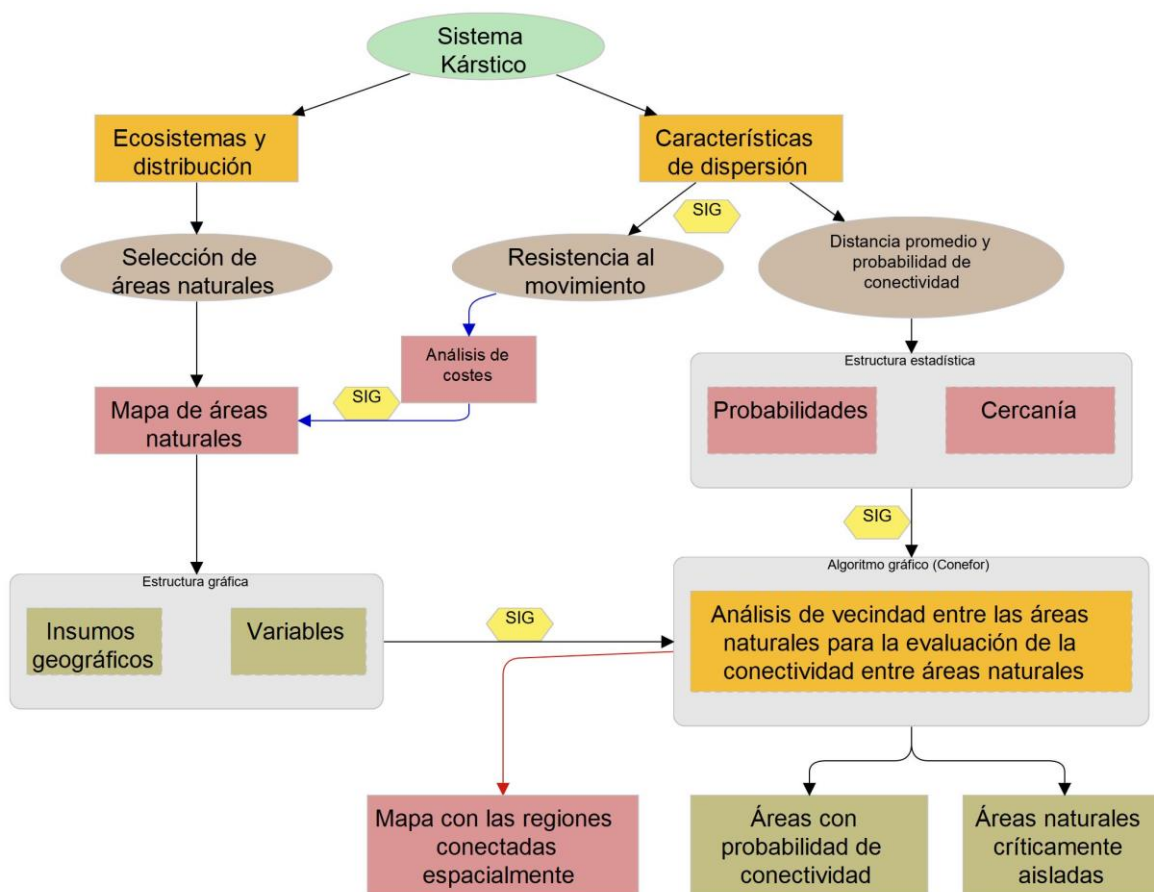


Figura 2: Esquema metodológico para el análisis de conectividad en el sistema Karstico. Adaptado de Conefor 2012

La figura 2 muestra la ruta metodológica con la que se llevará a cabo en el proceso de análisis de conectividad en el área de estudio, para esto se tendrán en cuenta factores espaciales y numéricos que permitirán establecer las conexiones directas entre áreas naturales y determinan aquellas áreas que si bien no están conectadas dado que la cobertura del corredor ha sido removida, tienen una gran probabilidad de conectarse funcionalmente, y finalmente también permitirá visualizar cuales de las áreas naturales del sistema están completamente aisladas y su probabilidad de conectividad espacial y funcional es muy baja.

4. Resultados y Discusión.

En términos generales, se obtuvo de acuerdo a la escala 1:100.000, en la que se encuentra el último reporte de coberturas para Colombia en el geoportal del IDEAM año 2017, que la conectividad en el área de estudio, correspondiente al sistema Karstico en el Magdalena Medio Colombiano, se da principalmente por los núcleos de bosque, que son aportados en su mayoría por las coberturas naturales bajo figuras de conservación de cualquier tipo y estas a su vez dependen directamente y en gran medida de la permanencia de los remanentes de bosque que están a su alrededor y que no están bajo alguna iniciativa de conservación (Figura 3).

Esto se fundamenta en los resultados obtenidos con el cálculo del índice de conectividad espacial mediante la extensión “Conefor” para Arcgis y la herramienta “Cost Path” de Arcgis por medio del cual se logró estimar la distancia entre los parches o núcleos de bosque y la probabilidad de conectividad de estos, teniendo en cuenta el menor costo del borde de un nucleo con el otro (tabla 1) en función de la presencia de bosque, la distancia a centros poblados, vías y drenajes. Esto permite identificar una agrupación de celdas con menor resistencia al flujo de biodiversidad en general entre los núcleos de bosque, no obstante, cabe resaltar que este tipo de análisis es más riguroso cuando se trabaja dirigido a una población biológica en particular, donde se tienen en cuenta variables muy específicas como el hábitat, las características de desplazamiento y el flujo genético de las especies.

Además es importante partir de la base que la conectividad entre áreas naturales decrece en la medida en la que se incrementa la fragmentación y las superficies arboladas disminuyen aumentando las distancias entre parches de bosque (Saura, et al., 2017), ya que esto reduce la continuidad natural del paisaje e incrementa el grado de aislamiento espacial y funcional de las

Análisis de conectividad espacial entre las áreas protegidas del sistema nacional de áreas protegidas SINAP de una región del sistema Kárstico en el flanco oriental de la Cordillera Central, en el Magdalena Medio Colombiano.

especies que interactúan en el ecosistema. Garantizar la conectividad entre áreas de bosque posibilita el movimiento y dispersión de las especies manteniendo así los servicios ecosistémicos asociados.

Tabla 1: Interpretación de los Indices y el costo de conectividad

Índice de conectividad	Costo conectividad	Interpretación
0.81 - 1	0 - 0.09	Conectividad muy alta
0.603 - 0.80	0.091 - 0.27	Conectividad alta
0.468- 0.602	0.28 - 0.41	Conectividad media
0.21 - 0.467	0.45 - 0.59	Conectividad baja
0 -0.2	0.6 - 0.69	Conectividad muy Baja

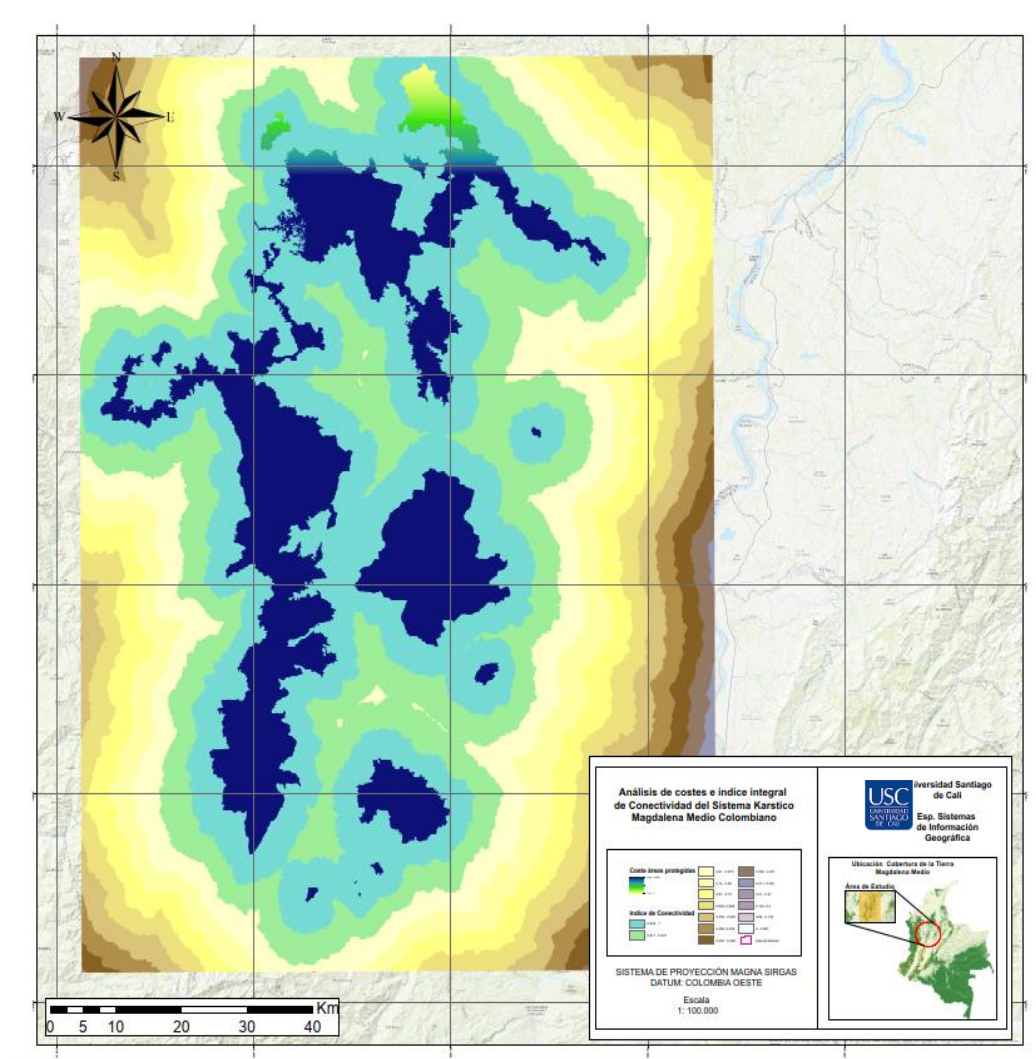


Figura 3: Mapa de análisis de costes e índices de conectividad

Análisis de conectividad espacial entre las áreas protegidas del sistema nacional de áreas protegidas SINAP de una región del sistema Kárstico en el flanco oriental de la Cordillera Central, en el Magdalena Medio Colombiano.

Adicionalmente, se detectó que de acuerdo a las coberturas bosque no bosque de la región del sistema karstico en el Magdalena medio Colombiano, hay un buen estado de conectividad con base en los índices de integridad y probabilidad de conectividad estimados a partir de “Conefor”, lo cual permite visualizar de manera gráfica los pixeles que reflejan la menor resistencia y las rutas de menor costo de acuerdo a las variables planteadas inicialmente, que muestran que a pesar de la pérdida de cobertura boscosa al interior y adyacente a las áreas protegidas, aún se puede considerar que los remanentes de bosque a esta escala de trabajo brindan un corredor y garantizan características de conectividad espacial en el área de trabajo (Figura 4).

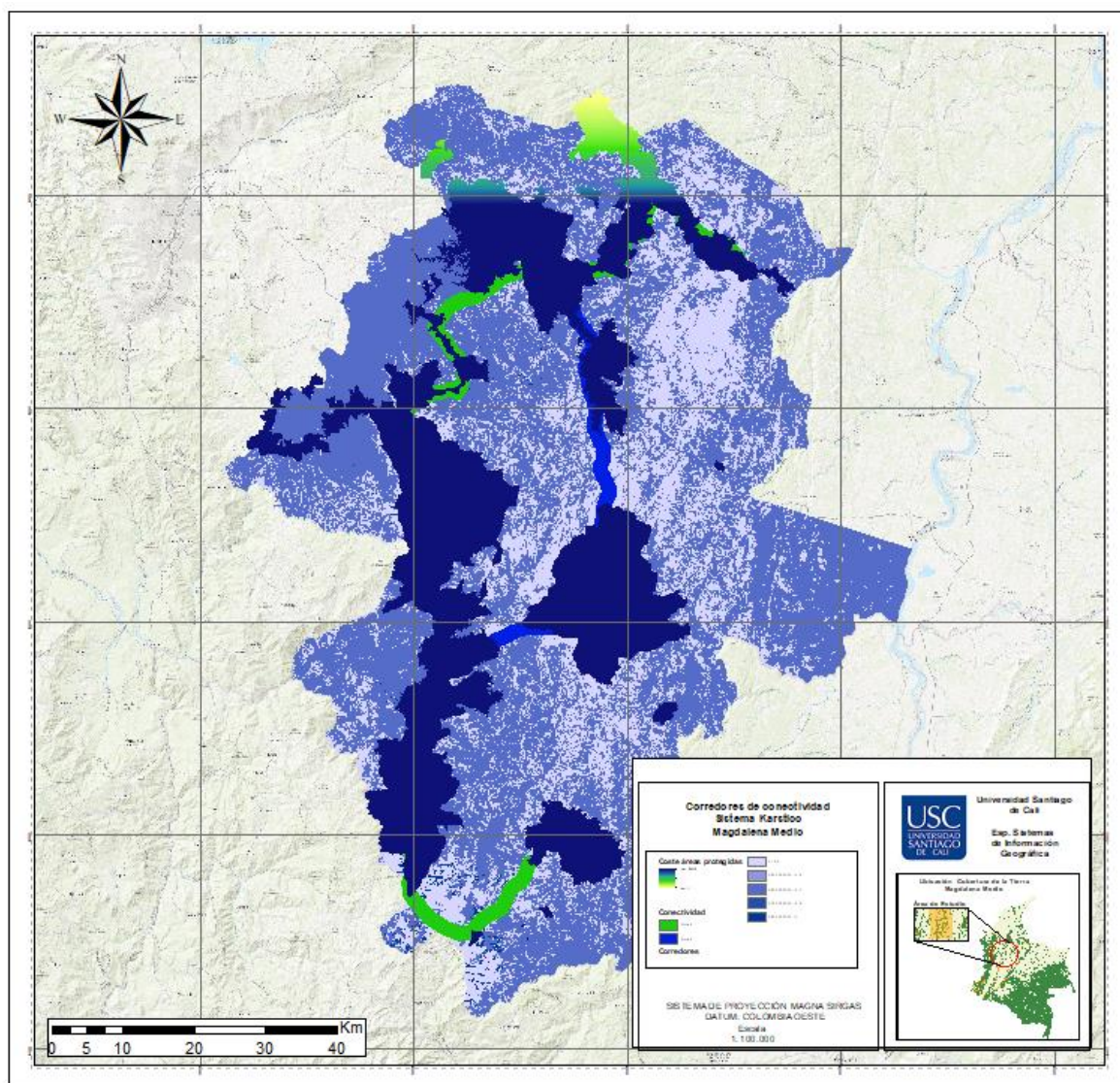


Figura 4: Corredores de conectividad entre áreas protegidas

Cabe resaltar que en el presente análisis se detectaron algunas áreas de conservación aisladas que no presentan una conectividad espacial óptima ya que a pesar de que el índice de conectividad fue cercano a 1 (Figura 3), el análisis de resistencia que establece las rutas de menor coste, las dejó por fuera, esto se debe a que si bien son áreas que tienen una buena probabilidad de conectividad (Tabla 2), distan de ser parte del núcleo de conectividad del área de estudio, estas áreas son: La Reserva Forestal Protectora (RFPR) La Linda, Las Reservas de la Sociedad Civil (RNSC) Fuenteviva, Las Gaviotas y El Guayabo y Los Distritos Regionales de Manejo Integrado (DRMI) San Pedro, El Capiro y Cuervos (Figura 5); estas pueden considerarse como áreas con un mayor coste de conectividad espacial dado al estado de la cobertura boscosa al interior y en las áreas de influencia.

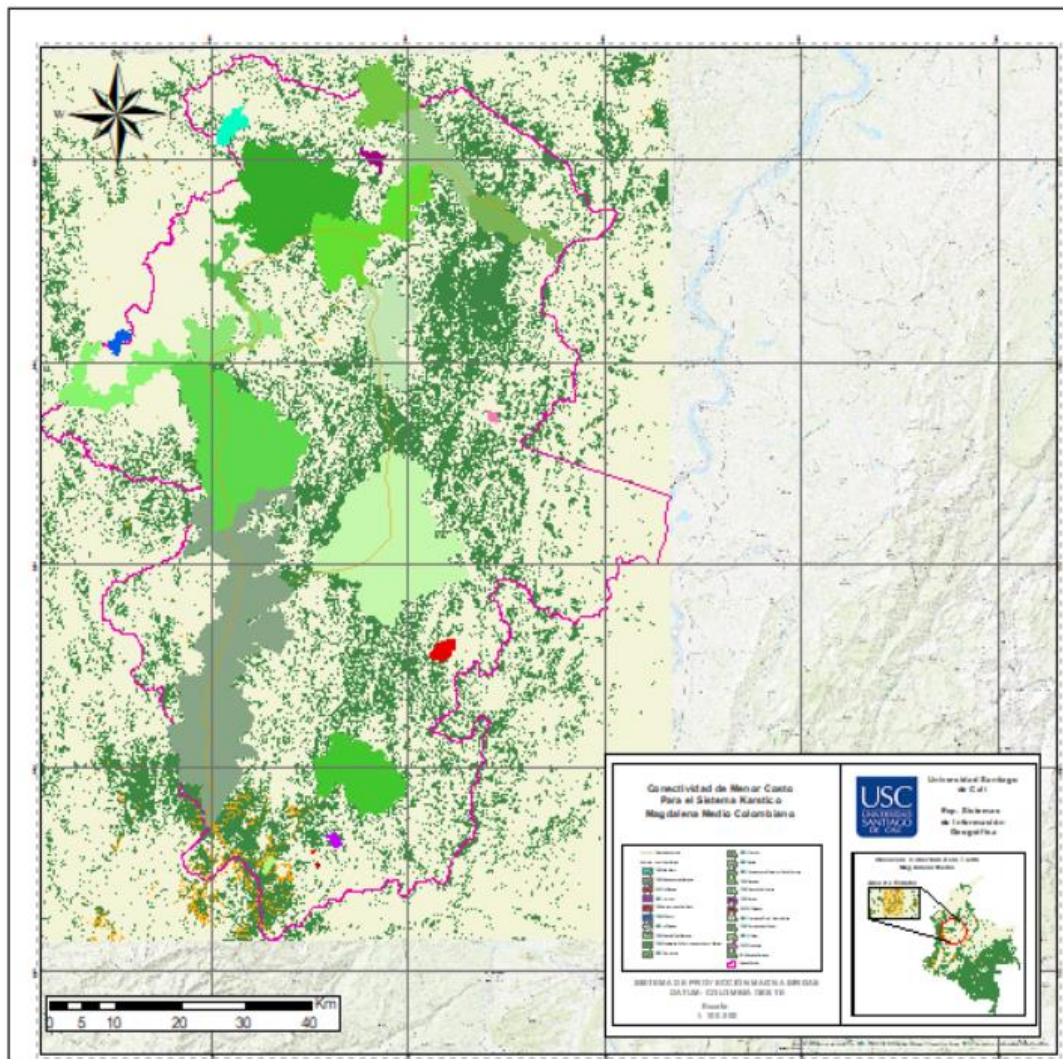


Figura 5: Áreas protegidas conectadas entre sí de acuerdo al índice de conectividad y áreas con un coste mayor de conectividad en el sistema

Tabla 2: Áreas protegidas con mayor coste de conectividad

Áreas protegidas núcleo	Promedio de Coste de Conectividad
DRMI San Pedro	0.49
DRMI El Capiro	0.42
DRMI Los Cuervos	0.42
RFPR La Linda	0.53
RNSC Fuenteviva	0.45
RNSC Las Gaviotas	0.44
RNSC El Guayabo	0.42

De acuerdo a la tabla 2 se puede observar que el promedio de coste de conectividad para cada una de las áreas protegidas que presentan mayor resistencia es muy cercano al rango medio, esto muestra que, si bien la conectividad espacial es factible para todas las áreas protegidas del sistema kárstico, este grupo presenta un mayor coste de conectividad puesto que son núcleos que están un poco más aisladas en comparación con los demás, esto se puede evidenciar a simple vista, dado que son áreas cuyos alrededores se encuentran desprovistos de coberturas boscosas.

5. Conclusiones

El estado de la conectividad espacial en el sistema Karstico en el magdalena medio colombiano evaluado a escala 1:100.000 muestra que hay un alto grado de conexión entre las áreas boscosas y esto está determinado ampliamente por la existencia de áreas con diferentes figuras de conservación, dichos núcleos de bosque proveen espacios naturales que logran a simple vista, establecer corredores biológicos; no obstante, hay una gran preocupación puesto que al interior de dichas áreas hay porciones importantes de áreas sin bosque, así que a pesar de que espacialmente son áreas con características de conectividad, es importante anotar que el ejercicio planteado se basa específicamente en la conectividad espacial y en general aborda la probabilidad de que la biodiversidad en general pueda hacer uso o no de las rutas de menor costo obtenidas, sin embargo este tipo de estudios se pueden complementar de manera óptima cuando se conjuga con la conectividad ecológica en función de una especie, esto hace que el estudio sea mucho más específico y que se acerque mucho más a la realidad de la dinámica espacial, estructural y funcional de los sistemas naturales.

Lo anterior se ajusta al supuesto de que las áreas bajo alguna figura de conservación brindan entre otros múltiples servicios ecosistémicos, un corredor biológico que conectan por múltiples vías las áreas naturales del sistema kárstico lo que además de obtener un flujo espacial, contribuyen a la permanencia de los servicios ecosistémicos. Esto constituye una aproximación hacia el desarrollo de novedosas herramientas para el análisis y modelamiento espacial, que brinden soporte técnico y científico para el diseño de estrategias de conservación integrales que faciliten una mejor toma de decisiones.

Adicionalmente, los resultados obtenidos pueden contribuir a la planificación de futuras áreas protegidas y a entender las diferentes áreas de conservación como una red espacial y estructural, que provee un reservorio de biodiversidad y garantiza la supervivencia en el tiempo de los elementos naturales que los componen y los servicios ecosistémicos. Por otra parte, es de resaltar que además de identificar los elementos de conectividad espacial y funcional, el presente análisis también permite identificar aquellas regiones críticas en las que la probabilidad de conectividad es muy baja o el costo de conectarlas a través de una matriz de bosque es muy alto, ya que se encuentran inmersas y aisladas en una matriz fragmentada.

Finalmente, se debe anotar que la escala del presente estudio no es la ideal, y es necesario trabajar mediante el uso de herramientas SIG con insumos que permitan tener mejor detalle, ya que lo registrado en las páginas oficiales como el IDEAM proveen una información con un nivel de detalle muy bajo y a una escala tan alta, que muy probablemente los resultados del presente ejercicio cambien drásticamente al disminuir la escala y clasificar con mayor detalle las coberturas de la tierra para la región.

6. Referencias bibliográficas

- Bergsten, A., Bodin, Örjan, & Ecke, F. (2013). Protected areas in a landscape dominated by logging - A connectivity analysis that integrates varying protection levels with competition-colonization tradeoffs. *Biological Conservation*.
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Salicrup, D. R. P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: A review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography*.
- De la Fuente, B., Mateo-Sánchez, M. C., Rodríguez, G., Gastón, A., Pérez de Ayala, R., Colomina-Pérez, D., ... Saura, S. (2018). Natura 2000 sites, public forests and riparian corridors: The connectivity backbone of forest green infrastructure. *Land Use Policy*.
- Fischer, P., Jardani, A., Jourde, H., Cardiff, M., Wang, X., Chedeville, S., & Lecoq, N. (2018). Harmonic pumping tomography applied to image the hydraulic properties and interpret the connectivity of a karstic and fractured aquifer (Lez aquifer, France). *Advances in Water Resources*.
-
- He, J., Huang, J., Liu, D., Wang, H., & Li, C. (2018). Updating the habitat conservation institution by prioritizing important connectivity and resilience providers outside. *Ecological Indicators*.
- Hofman, M. P. G., Hayward, M. W., Kelly, M. J., & Balkenhol, N. (2018). Enhancing conservation network design with graph-theory and a measure of protected area effectiveness: Refining wildlife corridors in Belize, Central America. *Landscape and Urban Planning*.
- Karnatak, H. C., Saran, S., Bhatia, K., & Roy, P. S. (2007). Multicriteria spatial decision analysis in web GIS environment. *GeoInformatica*.
- McRae, B. H., & Kavanagh, D. M. (2011). Linkage Mapper Connectivity Analysis Software. Seattle, WA: The Nature Conservancy. *Computer Software Program Produced by the Nature Conservancy in Seattle, WA, USA*.
- Pereira, J., & Jordán, F. (2017). Multi-node selection of patches for protecting habitat connectivity: Fragmentation versus reachability. *Ecological Indicators*.
- Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators*.
- Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2019). Global trends in protected area connectivity from 2010 to 2018. *Biological Conservation*.
- Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2018). Protected area connectivity: Shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biological Conservation*.

Análisis de conectividad espacial entre las áreas protegidas del sistema nacional de áreas protegidas SINAP de una región del sistema Kárstico en el flanco oriental de la Cordillera Central, en el Magdalena Medio Colombiano.

- Saura, S., Bertzky, B., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., & Dubois, G. (2018). Protected area connectivity: Shortfalls in global targets and country-level priorities. *Biological Conservation*.
- Tognelli, M. F., De Arellano, P. I. R., & Marquet, P. A. (2008). How well do the existing and proposed reserve networks represent vertebrate species in Chile? *Diversity and Distributions*.