



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Selección de áreas estratégicas para la conservación en proyectos de desarrollo

Lorena Tatiana Cortés Izquierdo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Área curricular de Medio Ambiente y Desarrollo
Medellín, Colombia
2018

Selección de áreas estratégicas para la conservación o restauración en proyectos de desarrollo

Lorena Tatiana Cortés Izquierdo

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

IC. M. SC. Enrique Ángel Sanint

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Área curricular Medio Ambiente y Desarrollo
Medellín, Colombia

2018

Agradecimientos

Inicialmente, agradezco a mi director Enrique Ángel por haber sido a lo largo de estos años mi guía, apoyo y amigo; por haber creído en mí como estudiante y profesional.

Así mismo, le agradezco por haberme incluido como parte del grupo de investigación “Poleka Kassue”, de la Universidad EIA, en donde conté con asesorías y acompañamientos de profesionales de gran experticia, a los cuales hoy considero parte importante de mi vida, por sus aportes a la presente investigación y a mi vida profesional y personal.

También, doy gracias al Ingeniero Daniel González Duque por colaborar en el desarrollo del algoritmo de solución, en lenguaje Python. Agradezco también a mis padres y familiares por haberme incentivado a tomar la decisión de desarrollar esta maestría, la cual implicó desarrollos personales que han sido invaluable.

Finalmente, mis amigos que a lo largo de este proceso han sido mi compañía y apoyo fundamental, a Paula Vera por haberme acompañado en las largas noches de investigación y escritura, a Catalina Caro por incluirme en su familia y acompañarme en mis días solitarios, a Alejandra Baena por recordarme mis capacidades y brindarme su amistad incondicional, y finalmente a mis compañeros de trabajo de EnergEIA por brindarme su apoyo y tiempo, haciendo posible la culminación de este proceso.

Resumen

La selección de áreas estratégicas para la conservación en proyectos de desarrollo se realizó a partir de la formulación de una metodología que permite escoger zonas aptas para este fin, teniendo en cuenta sus localizaciones geográficas, condiciones ambientales y los costos de la tierra.

Inicialmente, fue necesario definir aquellos criterios que como parte de las dimensiones ambientales tienen parámetros y variables que permiten identificar el estado actual de la zona que se desea analizar, en este caso la zona de estudio definida para llevar a cabo esta investigación académica es el área de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados, en donde se analizaron aspectos como el almacenamiento de carbono, el rendimiento hídrico y hábitat a partir de las coberturas de la tierra, previamente identificadas.

El almacenamiento de carbono fue calculado teniendo en cuenta la información de biomasa de las coberturas de suelo de 1982 y 2016, por su parte el rendimiento hídrico fue estimado con base en la escorrentía obtenida de la relación de evapotranspiración real, la precipitación y la temperatura; finalmente el hábitat se definió a partir de la ponderación dada por expertos en temas ambientales coberturas y su importancia para la conservación.

Adicionalmente, se estableció el costo por hectárea en la zona de estudio, relacionando el tipo de cobertura con la pendiente en la que se encuentra ubicada la misma, los precios de predios fueron establecidos mediante entrevistas realizadas a personas que viven o trabajan en el área.

Finalmente, fue desarrollado un algoritmo que permite establecer el aporte a la conservación de cada hectárea, realizando un análisis multiobjetivo entre los criterios antes descritos y la conectividad, determinada por la proximidad entre píxeles en un radio de estudio previamente establecido, obteniendo como resultado la selección de tierras con importancia para la conservación, usando de este modo los recursos financieros de manera óptima.

Palabras clave: Conservación, proyectos de desarrollo, conectividad, inversión en la conservación

Abstract

The selection of strategic areas for conservation in development projects was made from the formulation of a methodology that allows to choose suitable areas for this purpose, taking into account their geographical locations, environmental conditions and land costs.

Initially, it was necessary to define those criteria that, as part of the environmental dimensions, have parameters and variables that allow us to identify the current state of the area that we want to analyze, in this case the study area defined to carry out this academic research is the buffer area of the Los Nevados National Natural Park, where aspects such as carbon storage, water yield and habitat from land cover, previously identified, were analyzed.

The carbon storage was calculated taking into account the biomass information of the soil cover of 1982 and 2016; the water yield was estimated based on the runoff obtained from the ratio of real evapotranspiration, precipitation and temperature; Finally, the habitat was defined based on the weights given by experts in environmental issues, land coverage and its importance for conservation.

Additionally, the cost per hectare was established in the study area, relating the type of coverage with the slope in which it is located; properties prices were established through interviews with people who live or work in the area.

Finally, an algorithm was developed that allows establishing the contribution to the conservation of each hectare, performing a multiobjective analysis among the previously described criteria and connectivity, determined by pixel proximity in a previously established study radius, obtaining as a result the purchase of lands of importance for conservation, using financial resources in an optimal way.

Keywords: Conservation, development projects, connectivity, investment in conservation.

Contenido

1.	Revisión de literatura.....	14
1.1	Selección de áreas de conservación.....	14
1.2	Conectividad.....	15
1.3	Criterios ambientales.....	18
1.3.1	Almacenamiento de carbono	18
1.3.2	Rendimiento hídrico	18
	Hábitat	19
2.	Metodología y Algoritmo.....	22
2.1	Planteamiento general	22
2.2	Algoritmo de solución	37
2.2.1	Valores de Alfa.....	39
2.2.2	Mapas de entrada	40
2.2.3	Resultados esperados	42
2.3	Ensayo preliminar.....	43
2.3.1	Mapas de entrada	43
2.3.2	Resultados preliminares.....	45
3.	Caso de estudio.....	50
3.1	Parque Nacional Natural Los Nevados	50
3.1.1	Historia del Parque Nacional Natural los Nevados	51
3.2	Cuenca del Río Claro y PNN Los Nevados.....	52
3.2.1	Análisis de coberturas y áreas protegidas	53
3.3	Aplicación del algoritmo de análisis en la Cuenca del Río Claro del Parque Nacional Natural Los Nevados.....	54
4.	Resultados.....	61
4.1	Descripción de casos de análisis	61
4.2	Resultados caso a caso	62
4.3	Análisis de sensibilidad	71
4.3.1	Sensibilidad a cambios en el radio.....	72
4.3.2	Sensibilidad a cambios en la ponderación de las variables que conforman el VEP	73
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	76
5.1	Conclusiones.....	76
5.2	Cumplimiento de objetivos	77

5.2.1	Objetivos específicos	77
5.2.2	Objetivo General	78
5.3	Recomendaciones.....	78

Lista de figuras

Figura 2-1: Model builder mapas de entrada.....	25
Figura 2-2: Model builder mapas de entrada (Continuación)	26
Figura 2-3: Cobertura del suelo para la cuenca del río Claro	27
Figura 2-4: Almacenamiento de carbono, cuenca de río Claro 2010	31
Figura 2-5: Modelo de Elevación Digital de Parque Nacional Natural Los Nevados	33
Figura 2-6: Precipitación media anual Parque Nacional Natural Los Nevados	34
Figura 2-7: Evapotranspiración potencial Parque Nacional Natural Los Nevados	35
Figura 2-8: Escorrentía Superficial Parque Nacional Natural Los Nevados	36
Figura 2-9: Algoritmo de Aporte a la Conservación.....	39
Figura 2-10: Ponderación de parámetros del Valor ecológico de pixel (VEP).....	41
Figura 2-11: Valor ecológico por pixel, ensayo preliminar.....	44
Figura 2-12: Mapa de costos, ensayo preliminar.....	44
Figura 2-13: Estado actual, ensayo preliminar	45
Figura 2-14: Mapa de búsqueda, ensayo preliminar	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2-15: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 1 con $\alpha=1$, ensayo preliminar	46
Figura 2-16: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 2 con $\alpha=0$, ensayo preliminar	47
Figura 2-17: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 3 con $\alpha=0.5$, ensayo preliminar	48
Figura 2-18: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 4 con $\alpha=0.5$ y $r=15$, ensayo preliminar	48
Figura 2-19: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 5 con $\alpha=0.6$ y $r=15$, ensayo preliminar	49
Figura 3-1: Ubicación del Parque Nacional Natural Los Nevados.....	51
Figura 3-2: Variable Hábitat, de la cuenca del río Claro	55
Figura 3-3: Variable rendimiento hídrico, cuenca del río Claro	56
Figura 3-4: Mapa de Búsqueda cuenca del río Claro	57
Figura 3-5: Mapa de estado actual cuenca del río Claro.....	57
Figura 3-6: Mapa de pendientes de la cuenca del río Claro	58
Figura 3-7: Mapa de pendientes reclasificado de la cuenca del río Claro.....	59
Figura 3-8: Mapa de costos de la tierra en la cuenca del río Claro	60
Figura 4-1: Resultados obtenidos con $\alpha=0.5$	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-2: Evolución de la selección de áreas de conservación según variación de α desde 0 hasta 1.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-3: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en el radio de estudio. ..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-4: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones de almacenamiento de carbono	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4-5: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones de rendimiento hídrico	¡Error! Marcador no definido.

Figura 4-6: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones del Hábitat **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 5-1: Relación entre el carbono en el suelo estimado con el modelo y el observado en los estudios (Tomado de investigación en proceso de Álvarez-Dávila)83

Lista de tablas

Tabla 1-1: Problemáticas y retos de la gestión ambiental de la selección de áreas para la conservación en Colombia	21
Tabla 2-1: Jerarquización de coberturas de la tierra para la conservación	28
Tabla 2-2: Precios de la tierra Parque Nacional Natural Los Nevados	30
Tabla 2-3: Datos de las variables de entrada de las corridas, ensayo preliminar.....	46
Tabla 4-1: Determinación de fondos disponibles	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4-2: Iteraciones iniciales de la cuenca del río Claro... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4-3: Casos de estudio del análisis de sensibilidad..... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 5-1: Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa (Alvarez, et al., 2012).....	82

1.Introducción

La gestión ambiental se desprende del análisis de un proyecto de desarrollo que planifica transformaciones del entorno natural y humano, a partir de la inversión de capital económico, cultural y tecnológico, por esta razón contempla aspectos del medio humano y natural, así como sus interacciones antes, durante y después del proyecto. “La identificación, evaluación y definición de planes y programas de manejo de los impactos es producto del estudio de dichas interacciones” (Ángel, 2004).

El manejo de impactos ambientales está direccionado hacia prevenir o mitigar los impactos negativos dados sobre el medio natural, cultural o social por la ejecución de un proyecto de desarrollo, por lo que las medidas de compensación son fundamentales; entre ellas se encuentran las que buscan retribuir, mediante aportes financieros que estén encaminados hacia la adquisición, restauración y/o mantenimiento de áreas de conservación, los impactos remanentes dados por el proyecto en cuestión (Sarmiento & López, 2014).

En Colombia, en la ley 99 de 1993, el artículo 43, referido a la fijación de tasas de utilización del agua, define que el cobro de estas se destinará a los gastos de recuperación y preservación de cuencas hidrográficas que alimenten los proyectos de desarrollo, exigiendo una inversión del propietario no menor al 1% en obras y acciones de recuperación, preservación y conservación de la cuenca. (Ministerio del Medio Ambiente, 1993)

Por lo anterior, es necesario indagar bajo qué parámetros son elegidas las áreas a conservar en los proyectos de desarrollo, partiendo de que a nivel global las áreas de conservación son designadas según lo dictaminen los programas de investigación, por medio de estrategias biogeográficas que usan zonificaciones ambientales para reconocer áreas con componentes de biodiversidad importantes, con el fin de conservar las mismas.(Morrone, 2006)

En principio, en Colombia se determinó como prioridad conservar áreas cuyas cuencas hidrográficas aseguraran la provisión de agua para el desarrollo de actividades agrícolas y urbanas, tal como lo expresa Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013), mediante el decreto 095; por su parte Mendel & Kirkpatrick (2016), expresan que las primeras reservas enfocaron su elección de zonas en la calidad estética y atractivo turístico, es decir, “tierras sin valor”, dado que se localizan en elevaciones altas y suelos poco fértiles.

Actualmente, la determinación y selección de áreas protegidas se basa en su importancia, evaluada desde la biología de la conservación; se realiza mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica, y busca la representatividad y complementariedad que puede ofrecer la reserva respecto a biodiversidad, siendo estudiada desde diversos enfoques basados mayormente en especies indicadoras, sombrillas o focales (Castaño-Villa, 2006).

Según Souls (2000) la selección de áreas a proteger se basa en la presencia de una o más especies amenazadas, o de regiones con un alta diversidad de especies como es el caso de los bosques tropicales, sin embargo, teniendo en cuenta la sobrepoblación mundial junto con las limitaciones de recursos naturales y financieros, deben replantarse las prioridades de conservación, por lo que el desafío de conocimiento en el que esta investigación se enfoca, apuntan a mejorar la inversión ambiental, teniendo en cuenta los recursos financieros disponibles para este fin.

La formulación de una metodología que permita seleccionar áreas de conservación a partir de localizaciones geográficas, condiciones ambientales y costos de la tierra, requiere de la identificación de parámetros y variables que permitan conocer el estado actual ambiental de un sitio de estudio, que una vez georreferenciado, posibilite el desarrollo de algoritmos, cuya finalidad corresponde a determinar el aporte a la conservación, relacionándolo posteriormente con los costos de los predios, para conseguir adquirir tierras con óptimos valores ecológicos y precio asequible, preservando los recursos financieros y las tierras con mayor aporte a la conservación.

El Decreto 2372 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo (2010), determinó que, dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, la categoría de conservación hace referencia a “la preservación, restauración, uso sostenible y conocimiento de la biodiversidad de hábitats y ecosistemas en mantenimiento o recuperación, estudiando la diversidad biológica a diferentes niveles como gen, población, especie, comunidad, ecosistema, paisaje, composición, estructura o función”. La presente investigación busca tener en cuenta atributos de la biodiversidad de ecosistemas tales como la composición y la estructura, a partir de la determinación de parámetros que permitan valorar ecológicamente una zona, para la que posteriormente será estimada su conectividad.

Sabiendo que para el establecimiento de áreas dedicadas a la conservación es necesaria la comprar tierras por parte del Estado, Czech (2002) establece que este proceso debe

tener en cuenta fundamentos económicos y ecológicos que aseguren la representatividad y complementariedad de las áreas a conservar.

La presente investigación busca involucrar ambos conceptos en un algoritmo que requiere como información de entrada mapas de criterios ambientales que permiten precisar el valor ecológico del pixel (VEP) y mapas de costos de la tierra, hallados a partir de las herramientas disponibles en Sistemas de Información Geográfica (SIG), contempla el precio del predio como factor a tener en cuenta para determinar la cantidad de tierra a comprar.

El algoritmo se basa en un análisis multiobjetivo en el que se complementan el VEP y la conectividad, para definir el aporte a la conservación por pixel; paralelamente se revisa el precio de este, para que, al ser adquirido, su costo sea restado de los fondos disponibles, con lo que la toma de decisiones se ejecuta, teniendo en cuenta los fondos financieros actuales y los pixeles adquiridos según su ubicación, proximidad y valor ecológico.

Knight & Cowling (2007) plantean que es insuficiente mapear las áreas con prioridad de conservación teniendo en cuenta solo medidas del valor definidas por índices de vulnerabilidad ecológica en diversos niveles de biodiversidad, por esto, es necesario mapear y analizar, de forma adicional, el rango en el que los factores sociales, económicos y políticos influyen en la implementación de acciones de conservación; tal como busca desarrollarlo esta investigación en la que la toma de decisiones de compra de tierras destinadas a la conservación se ve influenciada por la relación costo versus aporte a la conservación.

El caso de estudio de esta tesis se desarrolló en la cuenca del Río Claro, ubicada en el área de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados, allí se definieron como parámetros ambientales de estudio, para esta tesis, el almacenamiento de carbono, el rendimiento hídrico y las condiciones del hábitat, teniendo en cuenta las investigaciones previas desarrolladas por el Grupo de Investigación "Poleka Kassue" de la Universidad EIA, así mismo los precios de la tierra fueron obtenidos mediante entrevistas realizadas en la zona de análisis; completando el material cartográfico de entrada que permite calcular el aporte a la conservación de cada hectárea en la zona de estudio.

1. Revisión de literatura

En el presente capítulo se muestra el marco teórico que explora las formas en las que se realiza la selección de áreas de conservación en proyectos de desarrollo, así mismo, se explica cómo debería ser evaluada la conectividad en estas selecciones, y finalmente se revisa bibliografía que permita identificar la importancia de cada uno de los criterios ambientales que fueron tenidos en cuenta para la aplicación del algoritmo en el área seleccionada como caso de estudio, la cual corresponde a la cuenca del río Claro, ubicada en la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados.

1.1 Selección de áreas de conservación

A pesar de que entre las principales prioridades de conservación esta la biodiversidad mundial, se destina una gran cantidad de recursos a la compra de áreas de conservación que no siempre atribuyen un valor importante a la misma; por esto Brooks et al. (2006), determina que para disminuir significativamente la velocidad de pérdida de la biodiversidad es necesario desarrollar de estrategias que mejoren la localización global de los recursos de conservación.

Así mismo, Brooks et al. (2006) identifica como causa de que las áreas conservadas a nivel mundial no superen un décimo del área superficial de la tierra, que estas no son definidas de forma holística, considerando que actualmente la irremplazabilidad de un ecosistema, especie, comunidad o gen es el principal criterio a tener en cuenta en esta selección, omitiendo de este modo relaciones de conectividad y factores económicos en este tipo de decisiones.

A pesar de que el objetivo de la conservación es la biodiversidad, los métodos actuales buscan el valor ecológico a nivel de especie. Nicholson et al. (2006) sugieren considerar el impacto de la configuración del paisaje en los procesos de población y la viabilidad de las especies.

Según Knight & Cowling (2007) en la historia del establecimiento de áreas para la conservación, se evidencia que su selección ha sido ejecutada por razones diferentes a la conservación biológica, por lo que en la actualidad se ubican redes de áreas protegidas sesgadas por linderos de paisajes infértiles con bajo valor económico; que no contribuyen a la conservación de la biodiversidad, generando un crecimiento de la crisis ambiental, cuya solución se enfoca en la evaluación de nuevas técnicas sistemáticas para selección de áreas prioritarias para la conservación.

Otro problema de importancia corresponde a cómo distribuir recursos limitados entre las regiones identificadas como prioritarias para la conservación de la biodiversidad. Para esto, Wilson et al. (2006) incluyen el rendimiento de la inversión y su transformación en el tiempo dentro de la investigación, realizando análisis que incluyeron datos de biodiversidad,

amenaza y costos, a partir de los que se generó una estrategia por medio de un algoritmo para determinar cuánto dinero se va a asignar a cada región cada año, dependiendo de la riqueza de especies endémicas, las velocidades de conversión de bosque y su incertidumbre, el costo de la tierra y las condiciones iniciales.

Dentro de los métodos para la definición de áreas de conservación, también se destaca Valente & Vettorazzi (2008) cuyo estudio buscaba estructurar el problema de decisión antes descrito, teniendo en cuenta como criterio la proximidad a los parches de bosques; la proximidad entre parches de bosque con mayor área núcleo; la proximidad a las aguas superficiales; la distancia de carreteras; la distancia desde las zonas urbanas; y la vulnerabilidad a la erosión; la integración de estos factores fue tratada utilizando sistemas de información geográfica (SIG), aplicando el estudio de caso en una cuenca fluvial de Brasil, en donde se concluyó, a partir de análisis de sensibilidad de resultados, que sólo la proximidad a la superficie del agua no es un criterio importante para identificar áreas prioritarias para la conservación de los bosques por lo que se evidencia la necesidad de completar los criterios a tener en cuenta para la selección de áreas de conservación.

En Colombia se busca emplear algunas de las herramientas antes descritas para construir e implementar un modelo de desarrollo regional sostenible en el Macizo Colombiano, ubicado sobre la cordillera de los Andes; allí según el Departamento Nacional de Planeación (2018) se encuentran tres importantes parques nacionales naturales La Cueva de los Guacharos, Puracé y Nevados; que por sus funciones de regulación hídrica, control de erosión, captura de carbono y biodiversidad, deben ser preservados teniendo en cuenta su funcionalidad.

Para esto el Departamento Nacional de Planeación et al. (2018) propone un plan de acción que busca el desarrollo sostenible de esta ecoregión con base en la implementación de estrategias de protección, recuperación y manejo de ecosistemas y zonas de importancia estratégica del Macizo Colombiano.

En el documento Conpes titulado “Lineamientos de política y estrategias para el desarrollo regional sostenible del macizo colombiano” el Departamento Nacional de Planeación et al. (2018) determina que en “La declaración, manejo y conectividad de áreas de importancia ambiental” se basa la consolidación de áreas de conservación que favorezcan el modelo de gestión territorial de esta ecoregión.

Por lo anterior, es evidente la importancia de la presente investigación para ubicar, conservar y conectar áreas de importancia ecológica, a partir de factores ambientales, ecológicos y de conectividad descritos a continuación.

1.2 Conectividad

Sabiendo que la conectividad se define como todos aquellos factores que permitan el flujo de organismos, materiales y energía principalmente de un sistema a otro. Según Correa Ayram et al. (2016) esta característica es clave dado que por medio de su estudio es posible conocer los efectos ecológicos del cambio de coberturas y suelos, por lo que la elección de áreas a ser conectadas es de gran importancia en los estudios de conservación.

La relevancia de la conectividad se relaciona con la identificación de diferentes clases de hábitats, clasificadas a partir de su idoneidad para generar conexiones entre ellas; Correa Ayram et al. (2016), plantea que este factor depende de qué tanta intervención humana tiene el paisaje, y en qué proporción se afecta la movilidad de especies dentro de un ecosistema.

Un gran reto para las evaluaciones referidas a la selección de áreas de conservación, corresponde a la identificación de áreas prioritarias que incorporan patrones y procesos biológicos de gran importancia; para este fin Rouget, Cowling, Lombard, Knight, & Kerley (2006) proponen el diseño de corredores de escala regional que determinen una planificación sistemática de la conservación, con base en principios tales como la representación y persistencia, combinado el análisis de la ruta de menor costo, con el de gradientes ambientales clave; a partir del reconocimiento de las limitaciones y oportunidades de la zona de estudio, mediante el reconocimiento de las coberturas y su transformaciones en el tiempo, identificando transformaciones de hábitats, degradación de bosques, vida silvestre, tipos de vegetación, redes de áreas protegidas cercanas y presiones futuras sobre el uso del suelo, en la zona de análisis, ubicada en un matorral subtropical en Sudáfrica.

Por su parte, Nicholson et al. (2006) combina métodos de metapoblaciones, tal como se expresó anteriormente, con la configuración del paisaje por lo que tiene en cuenta la conectividad del mismo, la novedad de esta técnica radica en que al compararlo con métodos de selección de reservas más tradicionales basados en áreas y sus condiciones de tamaño y forma, hallaron que la pérdida esperada de especies se reduce 20 veces, si se revisa de forma integrada, tal como lo sugieren los autores, dado que de este modo, se evita designar ponderaciones arbitrarias entre el tamaño de la reserva y su configuración.

La red europea Natura 2000, designa un conjuntos de reservas cuya persistencia requiere de la agregación de territorio no protegido que aporte conectividad, por esto, Gurrutxaga, Lozano, & del Barrio (2010) desarrollan una metodología de modelado espacial para completar la red Natura 2000, a partir de elementos de conectividad ecológica; su análisis se basa en coberturas de costos construidas según las especies y las hábitats dominantes de la región; buscando los caminos de menor costo que permitieran identificar las zonas de conexión probable, entre las reservas. La red final se compone de áreas centrales, corredores de enlace, áreas de enlace y zonas de amortiguamiento, incorporadas a esta red ecológica como referencia para la evaluación de los planes de desarrollo regional en 2005.

Correa Ayram et al. (2016) identifican las aplicaciones de la conectividad dentro de la selección de áreas de conservación, se analizaron 162 artículos entre el periodo del año 2000 al 2013 con el fin de identificar estudios donde se aplicó la conectividad como criterio para la priorización y planificación de áreas de la conservación.

Entre los enfoques analíticos de conectividad analizados por Correa Ayram et al. (2016), el funcional fue el predominante, sin embargo también destacaron los referidos a la estructura de conectividad genética, conectividad de ríos y conectividad de mar abierto. Así mismo,

para medir la conectividad se resaltan métodos como el análisis de menor costo, la teoría de grafos y los índices de conectividad funcional y modelos de idoneidad de hábitat, llevados a cabo usando herramientas como arcGIS. La estrategia general consiste en seleccionar áreas cuya prioridad ecológica es alta, para aplicar métodos que evalúen su conectividad funcional con el fin de identificar posibles corredores de conexión entre áreas de alta idoneidad de hábitat, facilitando la recolonización, aumentando la migración y dispersión genética y promoviendo la persistencia de los procesos ecológicos a nivel paisaje.

La conectividad puede emplearse como una herramienta que contribuye a la mitigación de fragmentación de hábitats y cambio climático, por lo que según Correa Ayram et al. (2016) el desarrollo de métodos y herramientas que integren diversos tipos de análisis con los sistemas de información geográfica, contribuirán a mejorar esta gestión de las áreas de conservación.

En busca del mejoramiento de la selección de áreas de conservación a partir del estudio de la conectividad entre diferentes fragmentos, Marzluff, et al. (1997) buscaron aumentar el hábitat de las águilas doradas en el Área Nacional de Conservación de aves de caza en el río Snake, Estados Unidos; a partir de la identificación de parches de anidación y alimentación que fueran posiblemente conectables. Para esto usaron un sistema de información geográfica que permitió la generación de mapas de la zona de estudio teniendo en cuenta el sitio de nidificación para los análisis de rango de hogar y las distancias máximas de desplazamiento observadas para las aves, hallando un radio mediante técnicas de telemetría que permitió delimitar los parches con posibilidad de conectarse en un radio de 5 kilómetros.

De igual modo, Soons, Messelink, Jongejans, & Heil (2005) realizan cálculos espaciales usando SIG y utilizan una medida de conectividad espacialmente determinada por una distancia r , la cual define si es posible o no combinar los parches de hábitat analizados. Esta medida se relaciona con la probabilidad de dispersión de una semilla con respecto a la distancia r en un hábitat, teniendo en cuenta que en este estudio pretendía comparar la distribución de dos especies de herbáceas (*Cirsium dissectum* y *Succisa pratensis*) incluyendo en el análisis, la dispersión del viento y su relación con la fragmentación y conectividad de la zona de estudio; concluyéndose que esta relación es lineal, por lo que la posibilidad de colonización es baja.

1.3 Criterios ambientales

1.3.1 Almacenamiento de carbono

La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) (CAC), constituyen un proceso importante en la separación del CO₂ emitido por la industria y fuentes relacionadas con la energía, su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. (Bert, Ogunlade, Coninck, Loos, & Meyer, 2005)

Otras opciones de mitigación, según Bert et al. (2005) comprenden la mejora de la eficiencia energética, la preferencia de combustibles que dependan menos intensivamente del carbono, la energía nuclear, las fuentes de energía renovables, el perfeccionamiento de los sumideros biológicos y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero diferentes del CO₂.

Por lo anterior, la CAC tiene la capacidad potencial de reducir los costos generales de la mitigación del cambio climático y lograr la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Dado que según Bert et al. (2005) dentro de los métodos técnicos de almacenamiento se resaltan el almacenamiento geológico en yacimientos de petróleo y gas; las capas de carbón inexplorables, las formaciones salinas profundas correspondientes al almacenamiento oceánico y la fijación industrial de CO₂ en carbonatos inorgánicos.

De acuerdo con IPCC (2014) los esfuerzos dirigidos a la mitigación del cambio climático van de la mano con las interacciones entre la energía, el uso del suelo y la biodiversidad, destacando entre las medidas beneficiosas para este fin, la protección de ecosistemas que proporcionen servicios de almacenamiento de carbono. Por su parte, la FAO Organización para las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (2018) determina que los niveles de carbono atmosférico se pueden reducir a partir su remoción por parte de las reservas terrestres y los ecosistemas acuáticos, por lo que es fundamental rehabilitar suelos degradados y ampliar las prácticas de conservación, tal como lo propone la presente investigación.

1.3.2 Rendimiento hídrico

El rendimiento hídrico como la cantidad de agua superficial por unidad de superficie de una cuenca, en un intervalo de tiempo, tal como definen Sánchez, García, Jaramillo, & Verdugo (2010) en el Estudio Nacional del agua, en donde en referencia a la escorrentía superficial determinan que cuantifica la oferta hídrica superficial, estimando valores en unidades hidrográficas no instrumentadas con el fin de establecer comparaciones en diferentes unidades de análisis.

Colombia se clasifica como uno de los países con mayor oferta hídrica natural del mundo, y según Sánchez et al. (2010) el rendimiento hídrico promedio del país corresponde 63 l/s-

km², que con respecto al rendimiento mundial, 10 l/s-km², lo supera 6 veces, así como al correspondiente a Latinoamérica 21 l/s-km², lo sobrepasa 3 veces.

Por otro lado, del volumen total anual de precipitación en Colombia, 3.700 km³, el 61% se convierte en escorrentía superficial, que equivale a un caudal medio de 71.800 m³ /s, el cual fluye por las cinco áreas hidrográficas en las que se ha dividido el territorio nacional continental. La cuenca de interés para esta investigación es la del Magdalena-Cauca, que contribuye 9.500 m³ /s, el 13%, del caudal total antes dicho. (Sánchez et al., 2010)

Para calcular los datos antes descritos es necesario llevar a cabo el balance hidrológico de largo plazo, el cual según Veléz, Poveda, & Mesa (2000) corresponde a una “formulación de ecuaciones de conservación de masa para volúmenes de control y columnas de suelo, atmosfera o la combinación de ambas” tal como lo expresa la ecuación 2.1, conocida como “ecuación de balance de agua”

La ecuación de balance de agua, mostrada en la ecuación 2.1 en la presente investigación es según Veléz et al. (2000) “ una aproximación que supone un cambio en la cantidad de agua almacenada en el suelo o la atmosfera, que en el largo plazo es despreciable respecto a los demás términos” que hacen parte del balance hidrológico de largo plazo.

Cabe resaltar que los términos que hacen parte de este balance, según Veléz et al. (2000) son el almacenamiento de agua en la atmosfera o volúmenes de agua por unidad de área, la precipitación, la evaporación que incluye la transpiración, el caudal y la escorrentía superficial, siendo esta ultima la de interés para el desarrollo de esta investigación.

1.3.3 Hábitat

Según Delfín-Alfonso, Gallina-Tessaro, & López-González (2014) el hábitat se puede concebir como el espacio que reúne las condiciones y características físicas y biológicas necesarias para la supervivencia y reproducción de una especie, perpetuando su persistencia sin perder sus rasgos ecológicos, definidos a escala espacial.

La clasificación y evaluación de las unidades de paisaje, hábitats, permite medir de forma precisa su potencialidad de mantener una especie a largo plazo, y nos proporciona un panorama claro para el establecimiento de áreas que puedan ser potencialmente aprovechadas de manera sustentable. Para lograr esto, Delfín-Alfonso et al. (2014) sugieren realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa, así como una caracterización de los atributos del hábitat; con fines de planificar y gestionar el manejo de la biodiversidad allí presente, sin embargo determinan que no existen métodos y técnicas exclusivos para este fin.

Para Colombia el concepto de hábitat es requerido según Sarmiento & López (2014) para realizar compensaciones ambientales enmarcadas en cuatro instrumentos: la licencia ambiental, la sustracción de áreas de reserva forestal, el aprovechamiento forestal y la compensación por aprovechamiento de especies amenazadas, definiendo también los tipos de compensaciones dictaminados por ley en el país, entre estos lineamientos se destacan que por cada hectárea de vegetación secundaria intervenida, se compensan entre

2 y 4 hectáreas y por cada hectárea de ecosistemas naturales se compensan entre 4 y 10 hectáreas, tal como lo dispone el ANLA para las licencias ambientales.

Dichas hectáreas, pueden ser compensadas a través de la implementación de medidas de conservación, restauración, rehabilitación, recuperación, herramientas de manejo especial o saneamiento, tal como lo expresa la Resolución 1517 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012).

Teniendo en cuenta que los lineamientos de Ley son amplios y la implementación de las compensaciones hasta la actualidad, según Sarmiento & López (2014) demuestran que la gestión de las compensaciones ambientales no están logrando resarcir y retribuir los impactos generados al medio ambiente, porque quienes reciben la licencia ambiental no cuenta con la experticia ni asesoría adecuada para definir áreas de conservación, usando conceptos ecológicos y ambientales, fueron definidas las problemáticas y retos de la gestión ambiental referida a la selección de áreas de conservación en proyectos de desarrollo en Colombia, en la tabla 1-1.

Dentro de las problemáticas allí dichas, fue posible identificar aquellas a las que el desarrollo de la presente investigación aportará, entre las que se destacan las referidas a trazabilidad y calidad, dado que el algoritmo aquí planteado permite ubicar las zonas cuyos aportes a la conservación son significativos, a partir de la revisión de factores ecológicos y sus posibilidades de conexión por proximidad con zonas previamente protegidas, generándose una vinculación que potencie los sistemas agregados de áreas protegidas en el país.

Tabla 1-1: Problemáticas y retos de la gestión ambiental de la selección de áreas para la conservación en Colombia

Aspecto	Problemática	Reto
Trazabilidad	Existe incertidumbre respecto a la efectividad de las acciones, dado que no hay información sobre su ubicación ni sobre su existencia o permanencia. Dificultades para realizar monitoreo y seguimiento.	Fortalecer el control y la vigilancia de las compensaciones ambientales y establecer un sistema de consulta y registro.
Calidad	Quienes reciben la licencia ambiental por lo general no cuentan con experiencia en restauración y conservación ambiental. Hay una atomización de iniciativas de compensación, en las que cada licenciataria realiza su compensación de manera aislada e independiente, lo cual no maximiza los beneficios ambientales.	Vincular a expertos de la conservación y la restauración en los procesos de compensación ambiental. Potenciar los beneficios de las compensaciones ambientales facilitando esquemas agregados.
Eficiencia	No hay ningún tipo de orientaciones que definan cuándo deben implementarse las compensaciones ambientales. Lo anterior genera un incentivo perverso para los licenciataria de dilatar las inversiones lo más posible.	Reducir los tiempos entre los impactos y las compensaciones, con el fin de disminuir las pérdidas temporales de biodiversidad y servicios ecosistémicos.
Coherencia	La exigencia con relación a la duración de la compensación (promedio tres años), no es proporcional a la duración de los impactos que se están generando y por tanto no se garantiza una "no pérdida neta" de biodiversidad.	Extender la obligatoriedad de las compensaciones ambientales a los tiempos de duración de los impactos generados y permitir esquemas de transferencia de responsabilidad
Consistencia	No existen lineamientos uniformes para desarrollar los planes de compensación ambiental y establecer las obligaciones de compensación ambiental.	Establecer unas orientaciones para la formulación de los planes de compensación ambiental que garanticen rigurosidad técnica, financiera y legal.
Sostenibilidad	En ningún caso se está considerando la sostenibilidad financiera o ambiental de las áreas de compensación en el mediano y largo plazos.	Eliminar los conflictos de intereses que puedan generarse cuando las áreas de compensación ambiental son de propiedad de las autoridades ambientales. Establecer criterios de sostenibilidad ambiental y financiera de las compensaciones.
Flexibilidad	Quienes reciben la licencia ambiental muchas veces no encuentran los predios para realizar las compensaciones o no logran establecer los acuerdos de compensación, y en algunos casos, esto se utiliza como excusa para no realizarla.	Generar incentivos para que terceros puedan ofrecer sus predios como áreas para realizar proyectos de compensación ambiental.

Fuente: Sarmiento & López (2014)

2. Metodología y Algoritmo

En este capítulo se explica la metodología que se siguió en la investigación, para desarrollar el algoritmo que permite la selección de áreas de conservación teniendo en cuenta localizaciones geográficas, condiciones ambientales y costos de la tierra.

2.1 Planteamiento general

La determinación de áreas destinadas a la conservación o restauración debe contemplar fundamentos económicos y ecológicos que aseguren la representatividad y complementariedad de estas.

La finalidad que se busca con el algoritmo propuesto es contribuir a la toma de decisiones en temas de conservación en presencia de proyectos de desarrollo, en los que se disponga de una suma previamente definida para invertir en conservación, tal como es el caso de algunos proyectos de desarrollo por efecto de la normatividad vigente en Colombia.

Al momento de decidir cuáles áreas destinar a la conservación, se tienen dos criterios principales para tomar la decisión: de un lado, favorecer las áreas que tengan una conectividad mayor, es decir que, al ser incorporadas al área conservada, garanticen que la conectividad entre el pixel seleccionado y los ya existentes, es mayor. Este punto ha sido remarcado por Correa Ayram et al. (2016) “mejorar la funcionalidad de áreas de conservación en riesgo (o, para el caso, de cualquier área de conservación), depende en gran medida de su conectividad con otras áreas “

De otro lado, existe la tendencia a seleccionar áreas que presenten un alto valor ecológico, es decir, que tengan características propias de alto valor, independientemente de su conectividad con otras áreas. Rudnick et al (2012), citados por Correa Ayram et al. (2016) manifiestan que: “el aislamiento estructural y funcional de áreas con altos valores de conservación limitan severamente la capacidad del sistema para mantener los procesos ecológicos”.

La relación entre valor ecológico del pixel y conectividad que desarrolla la presente investigación se enfoca en proponer un esquema que permita comparar e integrar el uso de ambos conceptos en la definición de áreas dedicadas a la conservación. Se considera un tercer elemento correspondiente al monto de recursos disponibles para las labores de conservación y el costo de realizarlas en cada pixel. Correa Ayram et al. (2016) plantean la necesidad de incorporar el costo de restauración/conservación al modelamiento espacial, en aras de cerrar la brecha entre modelos de conectividad y acciones reales de restauración.

La presente investigación busca involucrar ambos conceptos en un algoritmo que utilice como información de entrada mapas de criterios ambientales que permitan precisar el valor

ecológico del pixel (VEP) y mapas de costos de la tierra, hallados a partir de herramientas disponibles en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El algoritmo se basa en un análisis multiobjetivo desarrollado entre el VEP y la conectividad, para definir el aporte a la conservación por pixel; paralelamente se revisa el precio de este, para que, al ser adquirido su costo sea restado de los fondos disponibles, con lo que la toma de decisiones se ejecuta, teniendo en cuenta los fondos financieros actuales y los pixeles adquiridos según su ubicación, proximidad y valor ecológico.

El caso de estudio de estas tesis se desarrolló en la cuenca del río Claro, donde se ubica el área de amortiguación del Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados, allí se definieron como parámetros ambientales de estudio el almacenamiento de carbono, rendimiento hídrico y las condiciones de hábitat. Teniendo en cuenta que las investigaciones previamente desarrolladas por el grupo de investigación “Poleka Kassue”, de la Universidad EIA están relacionadas con el estudio e identificación de estas características fue posible usar sus resultados, ya sea como datos de entrada para el cálculo del factor VEP o como mapas cuya información permite calcular el balance hídrico a largo plazo o definir los tipos de cobertura encontrados en la zona de análisis.

La conectividad ecológica, a nivel de paisaje permite el desarrollo de redes a diversas escalas que contribuyen a la expansión y determinación de áreas destinadas a la conservación, aportando elementos fundamentales para la planeación ambiental, ya que al ser “*la medida en la que el paisaje impide o facilita movimientos entre los elementos de un ecosistema*” según Taylor, Fahrig, Henein, & Merriam (1993), define los flujos de energía e información entre los parches de área de estudio.

El análisis de la conectividad puede ser de dos tipos según Tischendorf & Fahrig (2000) funcional que considera las relaciones entre seres vivos y estructura espacial, o estructural, que se basa en la disposición espacial de los parches y corredores a partir de atributos físicos como distancia y longitud que dependen de índices geométricos fácilmente medibles.

En esta investigación se tendrá en cuenta la conectividad de paisaje estructural, mediante una operación muy sencilla que consiste en contar para cada pixel dado cuantos pixeles con una distancia menor o igual a cierto radio de influencia, están ya dedicados a la

conservación visualizando en el mapa final de aporte a la conservación, la conectividad potencial de cada pixel.

Se usa este enfoque basado en usos anteriores similares para delimitar movimientos de algunas especies de aves o reconocer las posibilidades de dispersión de especies de flora, tal como lo evidencian Marzluff, et al. (1997) y Soons, Messelink, Jongejans, & Heil (2005).

Para calcular del Valor Ecológico de pixel (VEP) es necesario generar los mapas de entrada usando el software ArcGIS 10.3.1, utilizando las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) presentadas en las figuras 2.1 y 2.2.

Figura 2-1: Model builder mapas de entrada

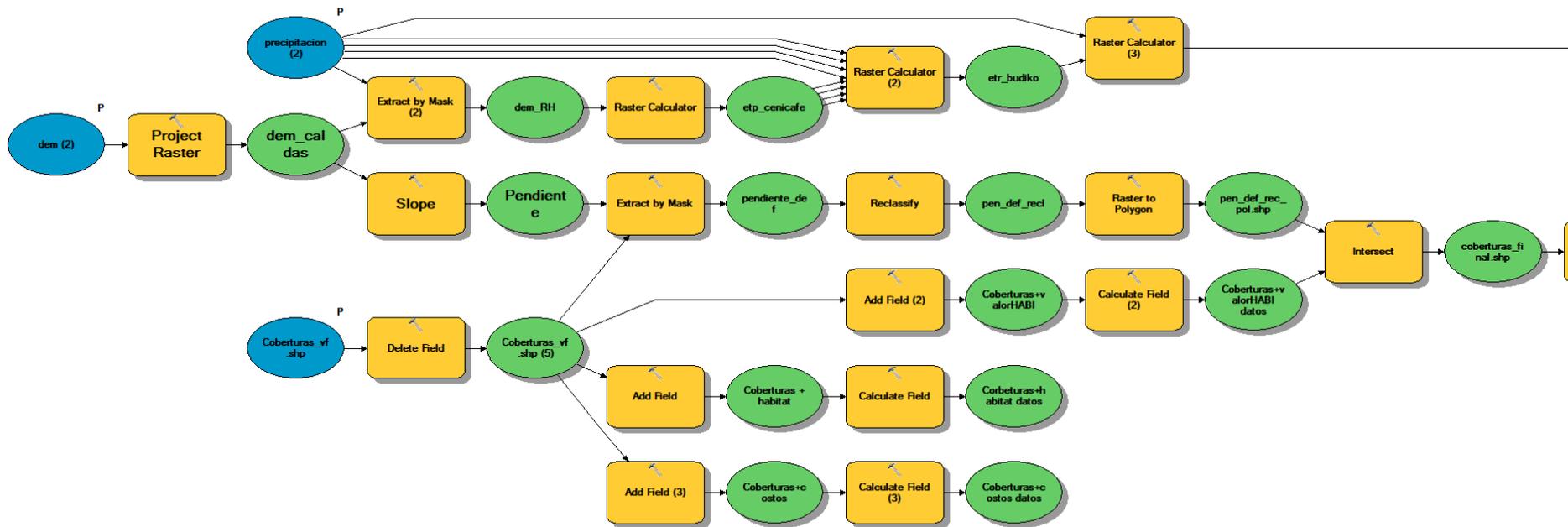
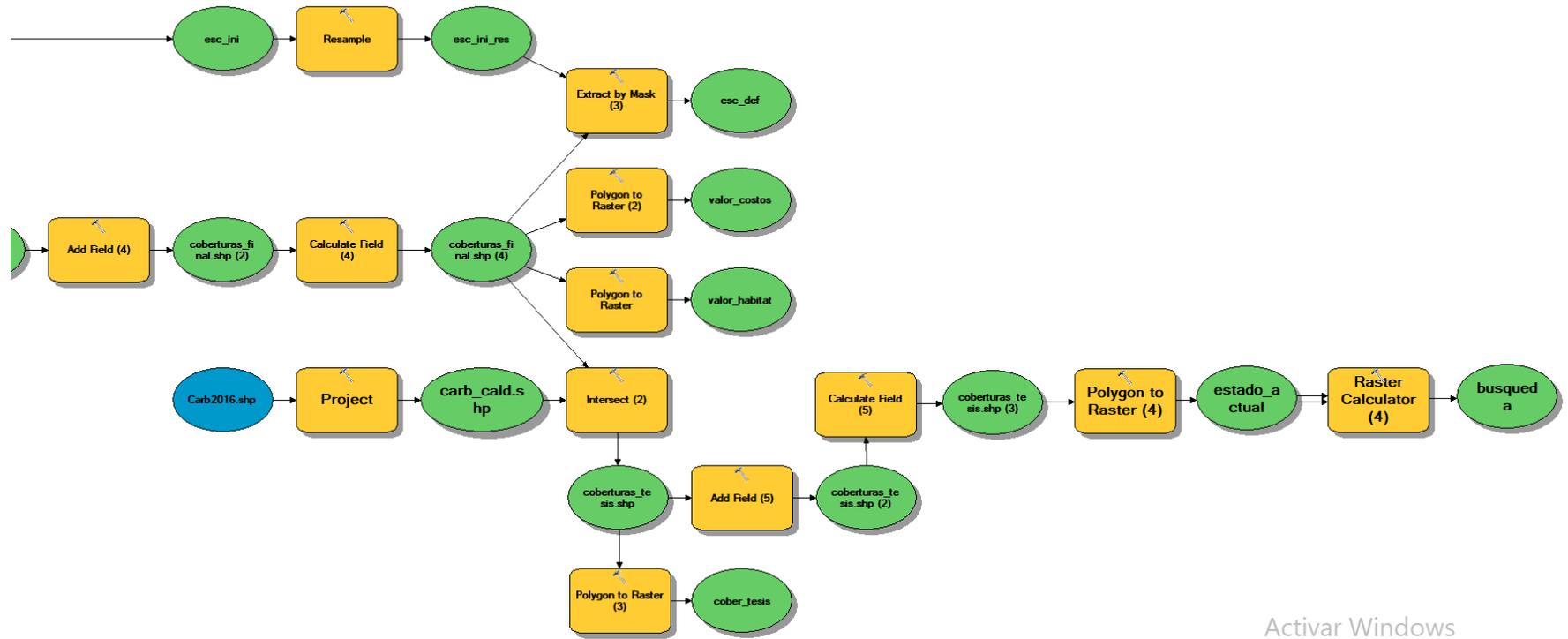


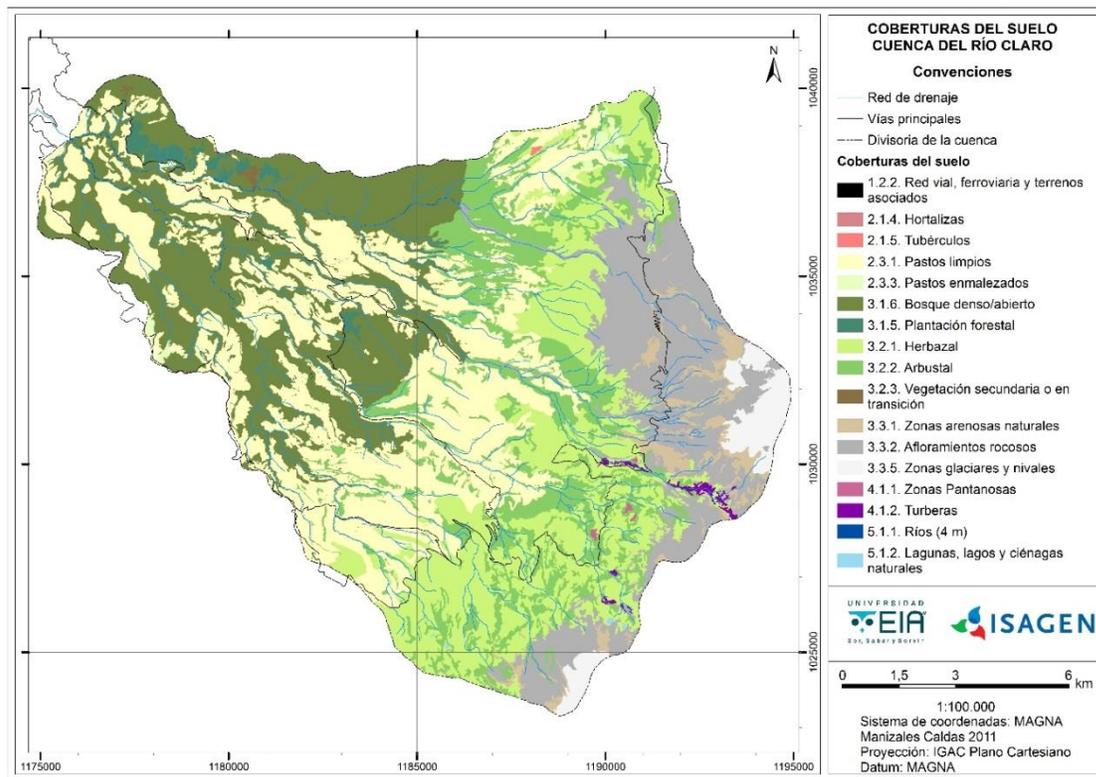
Figura 2-2: Model builder mapas de entrada (Continuación)



Activar Windows

El mapa inicial es el de “Coberturas_vf”, expuesto en la figura 2-3, desarrollado por Andrés Felipe Echandía Arbeláez, usando la metodología Corine Land Cover (CLC).

Figura 2-3: Cobertura del suelo para la cuenca del río Claro



Fuente: Echandía (2016)

A partir de este archivo de tipo polígono se procede a agregar en su tabla de atributos, columnas y atributos de interés para la investigación, en primera instancia se agrega la columna de “Hábitat” y “valor hábitat”, en las que se va a guardar la información obtenida al ponderar las coberturas de la tierra con respecto a su importancia para la selección de áreas de conservación, dicha ponderación se determinó con base en los resultados de la encuesta presentada en el (Anexo A), realizada a 6 expertos, en temas de biodiversidad y estudio de zonas de amortiguación de áreas protegidas, presentados en la (tabla 2-1), en la que se muestran los nombres y las jerarquizaciones aportadas por cada uno de los encuestados.

Tabla 2-1: Jerarquización de coberturas de la tierra para la conservación

Tipo de cobertura/Encuestado	Melissa Abud	Carlos Daniel Ruiz	Santiago Ortega	María Elena Gutiérrez	Fernando Cadena	Fabio Alarcón	Promedio	Normalizado
Cultivos Transitorios	7	2	1	1	5	1	2,83	0,3
Pastos	7	1	2	2	3	1	2,67	0,3
Bosques	10	10	10	10	8	10	9,67	1,0
Áreas con vegetación herbazál	10	5	5	8	4	6	6,33	0,6
Áreas con vegetación arbustal	10	8	7	9	6	8	8,00	0,8
Vegetación secundaria en transición	9	3	6	5	7	8	6,33	0,6
Áreas Húmedas continentales (Turberas y zonas pantanosas)	10	9	10	8	7	10	9,00	0,9
Plantación forestal de producción	7	2	6	4	3	1	3,83	0,4
Zonas abiertas con o sin vegetación (Zonas arenosas naturales, afloramientos rocosas y zonas glaciares y nivales)	10	6	2	3	2	10	5,50	0,6
Aguas continentales (Lagunas, lagos y ciénagas)	10	8	9	6	7	10	8,33	0,8

Fuente: Elaboración propia

- **Hábitat**

El componente hábitat hizo parte de la investigación teniendo en cuenta la relación existente entre las coberturas del suelo, previamente ponderada, la distribución geográfica de dichas coberturas y la abundancia de especies y comunidades, tal como lo demuestran Chen & Hui (2009) en el modelo de coexistencia de múltiples especies en áreas irregulares, en

donde concluye que la destrucción o fragmentación de hábitats se relaciona con la extinción demorada pero determinista de comunidades y especies.

Respecto a la afectación de la biodiversidad en hábitats fragmentados, también Tilman (1994) determina que la diversidad se podría ver limitada por factores como la competencia espacial entre especies, que ocasiona alteraciones en las tasas de reproducción y mortalidad dada la escasez de recursos y alteraciones en las cadenas tróficas. Por esto el componente hábitat hace parte fundamental del valor del pixel, teniendo en cuenta su capacidad de ser conservada a partir de los usos de suelo actual.

- **Costos de la tierra**

Por su parte, se crean las columnas “Costos” y “Valor costos” en la tabla de atributos de la capa tipo polígono “coberturas_vf”. Sus datos fueron asignados teniendo en cuenta la relación pendiente versus coberturas de suelo, porque los precios de los predios son determinados teniendo en cuenta la capacidad que poseen para el desarrollo de actividades económicas como la ganadería y la agricultura.

Según Sabatini (2000) los precios del suelo están determinados por el valor inicial que pagó el propietario por el área y las ganancias que este pretende tener por la venta, teniendo en cuenta el uso del suelo y escasez del mismo, por lo que el autor reconoce que el componente social juega un papel fundamental en la fijación de costos de mercado de predios, dado que si el uso del suelo es altamente demandado en la zona pero con pocas ofertas de venta su precio incrementa y en caso contrario, disminuye.

Teniendo en cuenta que las tierras en la zona de estudio son en su mayoría privadas y dedicadas a pastoreo con pocos cultivos y conociendo que el mapa catastral de la cuenca del río Claro no muestra las relaciones sociales que allí se desarrollan, para la presente investigación se estimaron los precios de mercado, que se muestran en la (tabla 2-2). determinados a través de entrevistas telefónicas y personales con los señores Albeiro Mayorga y Benigno Padilla, habitantes del área de estudio. Los valores allí mostrados están dados en millones de pesos.

Tabla 2-2: Precios de la tierra, en millones de pesos colombianos (COP), Parque Nacional Natural Los Nevados¹

Cobertura/Pendiente	Alta	Media	Baja
Bosque	2	3	3.5
Rastrojo	2.5	3	3.5
Pastizal	3	4	5
Cultivos	6	6	6
Plantación forestal	6	6	6

Fuente: Elaboración propia con base en las entrevistas con Albeiro Mayorga y Beningno Padilla

- **Almacenamiento de Carbono**

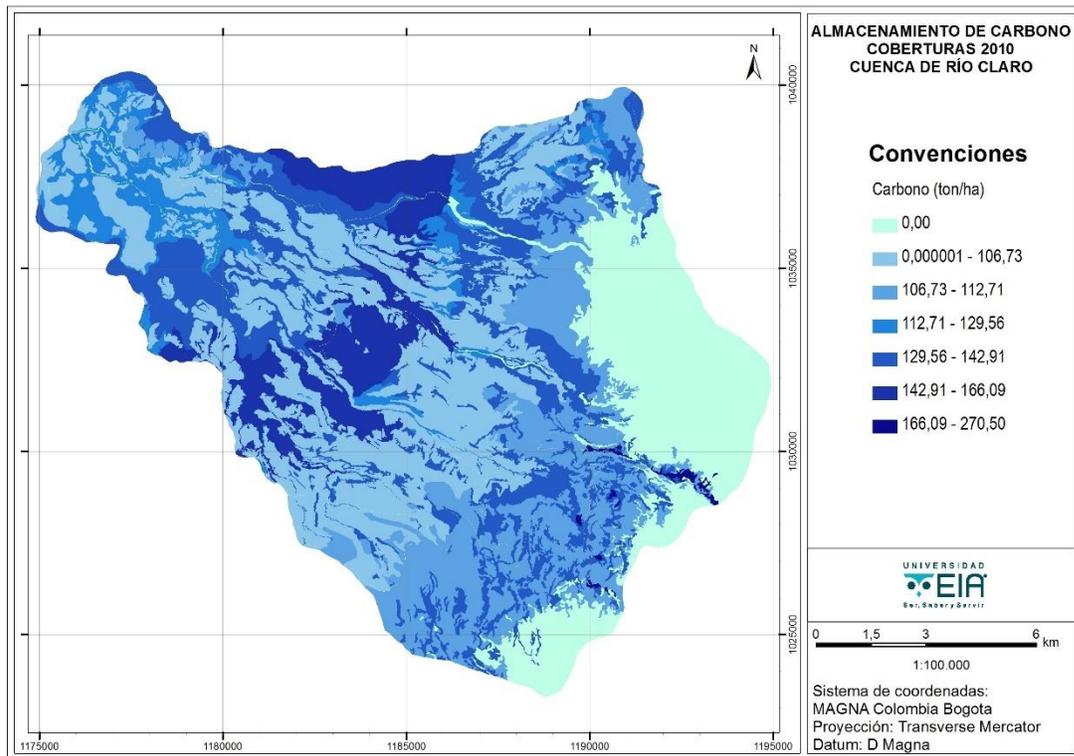
Dentro de VEP, también se encuentra el mapa referido al almacenamiento de carbono, este mapa se toma de los resultados hallados por Cárdenas (2016) a partir de la aplicación de modelo “Almacenamiento y secuestro de carbono” del software InvEST, permitió obtener el mapa de almacenamiento neto de carbono, mostrado en la figura 2-4, resultantes de la metodología descrita en el Anexo B.

Teniendo en cuenta que el material cartográfico de Cárdenas (2016) expresa las toneladas de carbono por pixel, no fue necesario adicionar ningún tipo de procesamiento de ráster dado que es considerada información de biomasa de las coberturas para estimar el carbono en la cuenca del río Claro obtenida a partir de datos de inventarios forestales, compilados por varios investigadores que estudian el carbono forestal en Colombia y datos provienen de 32 parcelas establecidas en diferentes altitudes de las cuencas de los ríos Quindío y Chinchiná, cercanas a la cuenca del río Claro (Restrepo et al. 2015; Álvarez et al. en revisión).

Para incluir los valores dentro de la tabla de atributos de la investigación se realizó una intersección con el mapa de “coberturas_vf”.

¹ Las pendientes bajas corresponden a porcentajes entre 0 y 12, las medias entre 12 y 50 y las altas entre 50 y 300, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Figura 2-4: Almacenamiento de carbono, cuenca de río Claro 2010



Fuente: Cárdenas (2016)

- **Rendimiento hídrico**

El rendimiento hídrico es un aspecto importante porque la zona de estudio correspondiente al área de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN) ubicada dentro de la cuenca hidrográfica del río Claro, presenta características físicas y biológicas que permiten filtrar y almacenar grandes cantidades de agua, tal como lo expresa Stelzenmüller et al. (2013) refiriéndose a ecosistemas de páramos.

Por su parte, Jobbágy, Acosta, & Noretto (2013) resalta la relación entre los cambios de las coberturas vegetales y el ciclo hidrológico, determinando que la magnitud y distribución del caudal de los cuerpos de agua puede verse afectado, por lo que está de acuerdo con Istedt, et al. (2007) quien determina que la forestación de cuencas que fueron en su pasado dedicadas a pastoreo y agricultura, favorece la infiltración de agua, los picos de caudal y el flujo subterránea.

En la presente investigación, se tienen en cuenta los valores de escorrentía hallados en la zona de estudio, con base en los mapas de precipitación, previamente desarrollados por el grupo de investigación "Poleka Kassue".

Para llevar a cabo esta estimación se tuvo en cuenta el balance hidrológico de largo plazo en el que se supone que los cambios en las cantidades almacenadas de agua en el suelo son despreciables en comparación con la magnitud de los flujos totales debidos a la precipitación, la evaporación y el caudal superficial o escorrentía (Velez et al., 1999).

Cuando la integración temporal se realiza sobre un intervalo de gran duración (del orden de décadas), los cambios en las cantidades de agua almacenadas en la atmosfera y suelo son despreciables. Se eligió esta escala temporal sabiendo que en la presente investigación no se incluyen análisis prospectivos referidos al cambio climático y sus efectos en la zona de análisis. La ecuación de balance de agua para la columna quedaría:

$$P - E = R \quad (2.1)$$

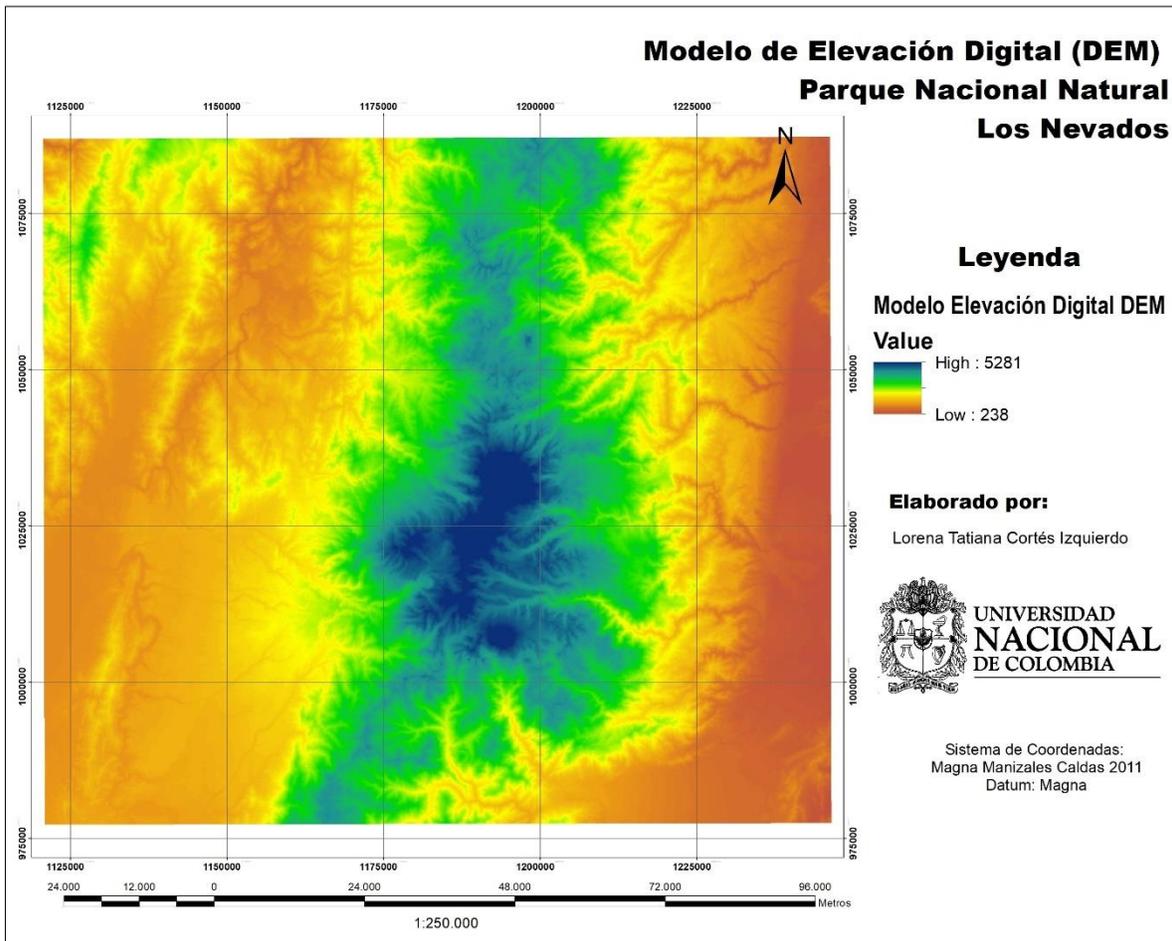
Donde P es precipitación media anual, E se refiere a la evapotranspiración real y R corresponde a la Escorrentía superficial.

Con esta aproximación es posible encontrar la escorrentía superficial sobre cada pixel realizando procedimientos en ArcGIS, en principio se usa la *calculadora ráster* para calcular el valor de la Evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y finalmente la escorrentía superficial.

En principio se usó la ecuación de Cenicafe (1989) para el caculo de la evapotranspiración potencial, requiriendo como único dato de entrada el Modelo de elevación digital (DEM), expresado como z en la (ecuación 2.2), visualizado en la figura 2-5.

$$ETP = 4.658 (-0.0002 * z) \quad (2.2)$$

Figura 2-5: Modelo de Elevación Digital de Parque Nacional Natural Los Nevados

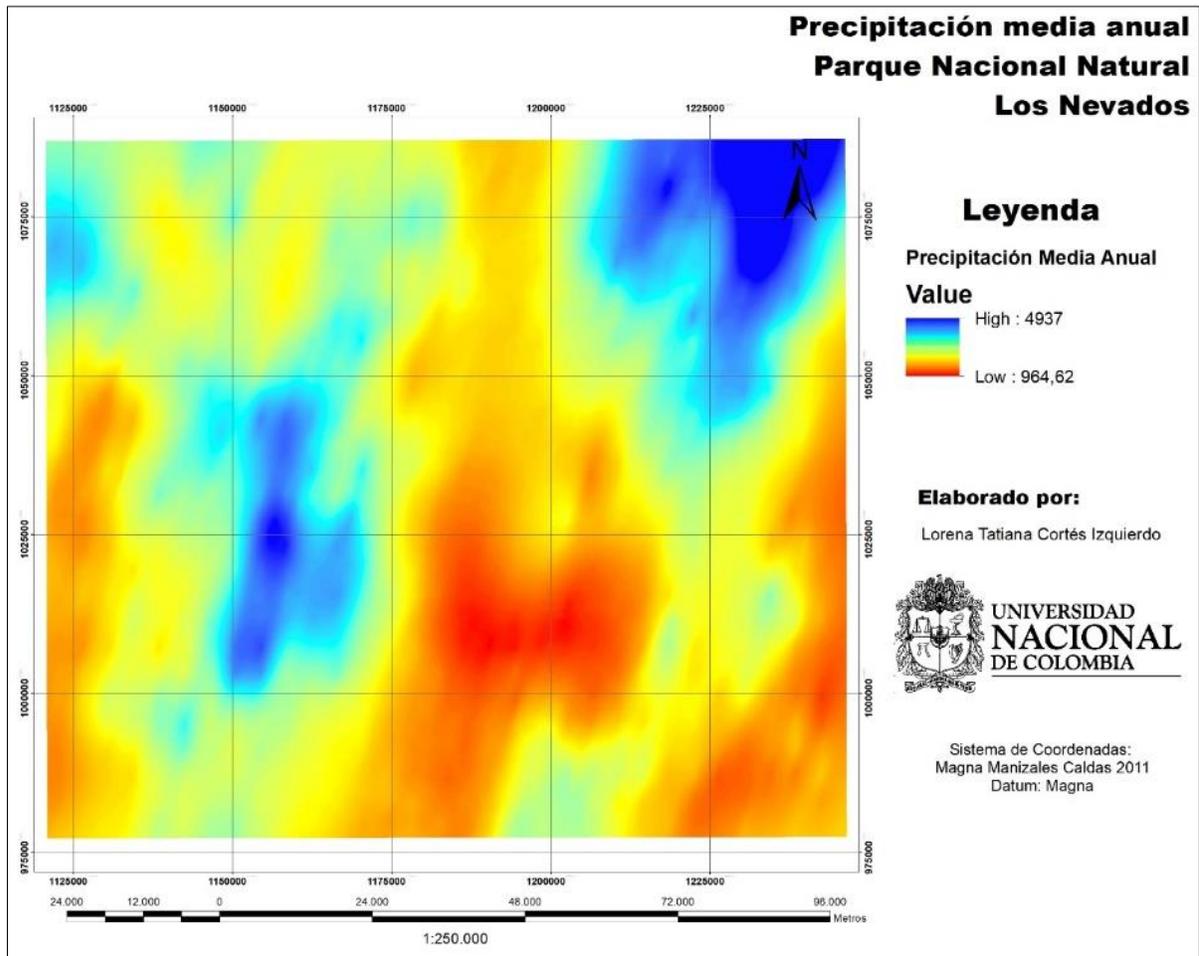


Fuente: Elaboración propia

Luego, se obtiene la evapotranspiración real, a partir de la ecuación de Budyko (1974), expuesta en la Ecuación 2.3, en la que como criterios de entrada se tiene en cuenta la precipitación y la ETP, mostradas en las figuras 2-6 y 2-7.

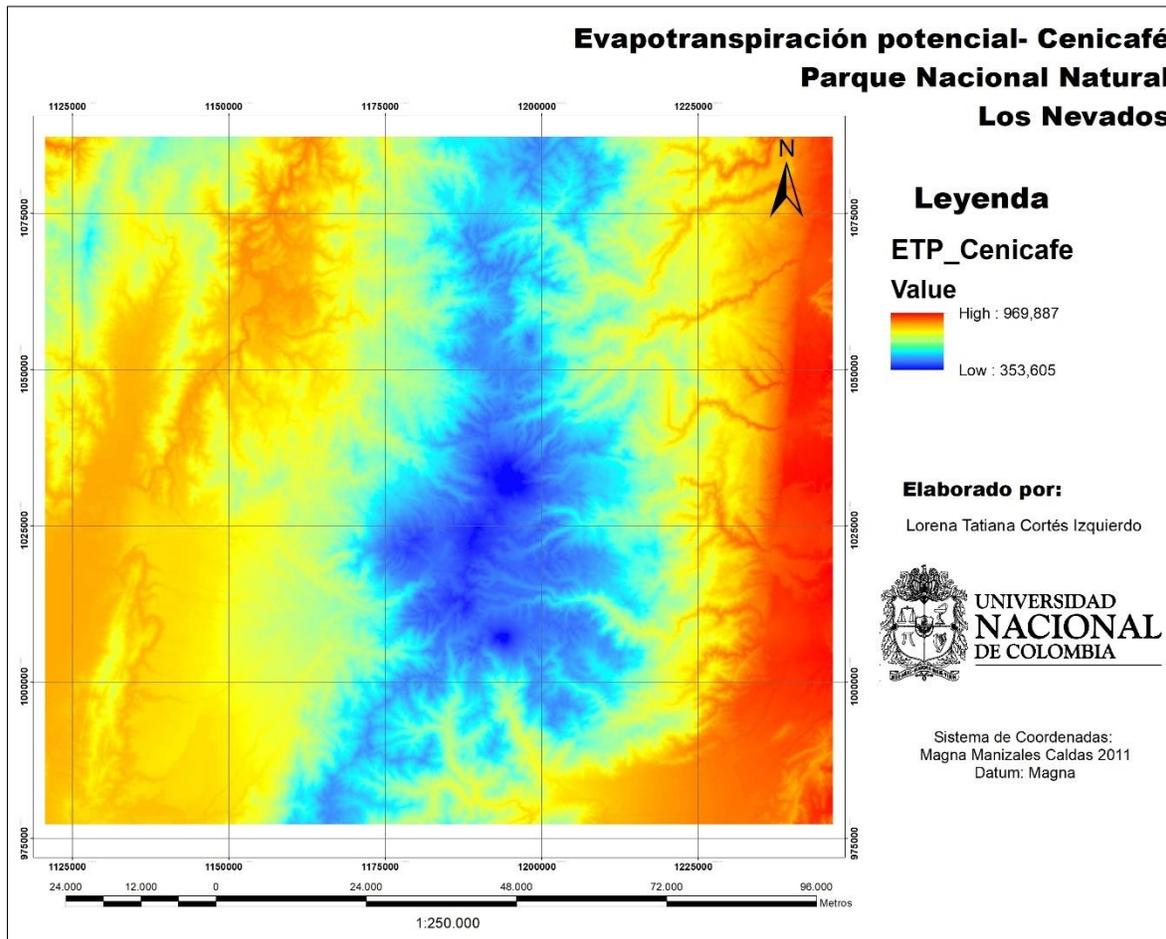
$$ETR = \left[ETP * P * \tanh \frac{P}{ETP} * \left(1 - \cosh \frac{ETP}{P} + \sinh \frac{ETP}{P} \right) \right]^{1/2} \quad (2.3)$$

Figura 2-6: Precipitación media anual Parque Nacional Natural Los Nevados



Fuente: Elaboración propia

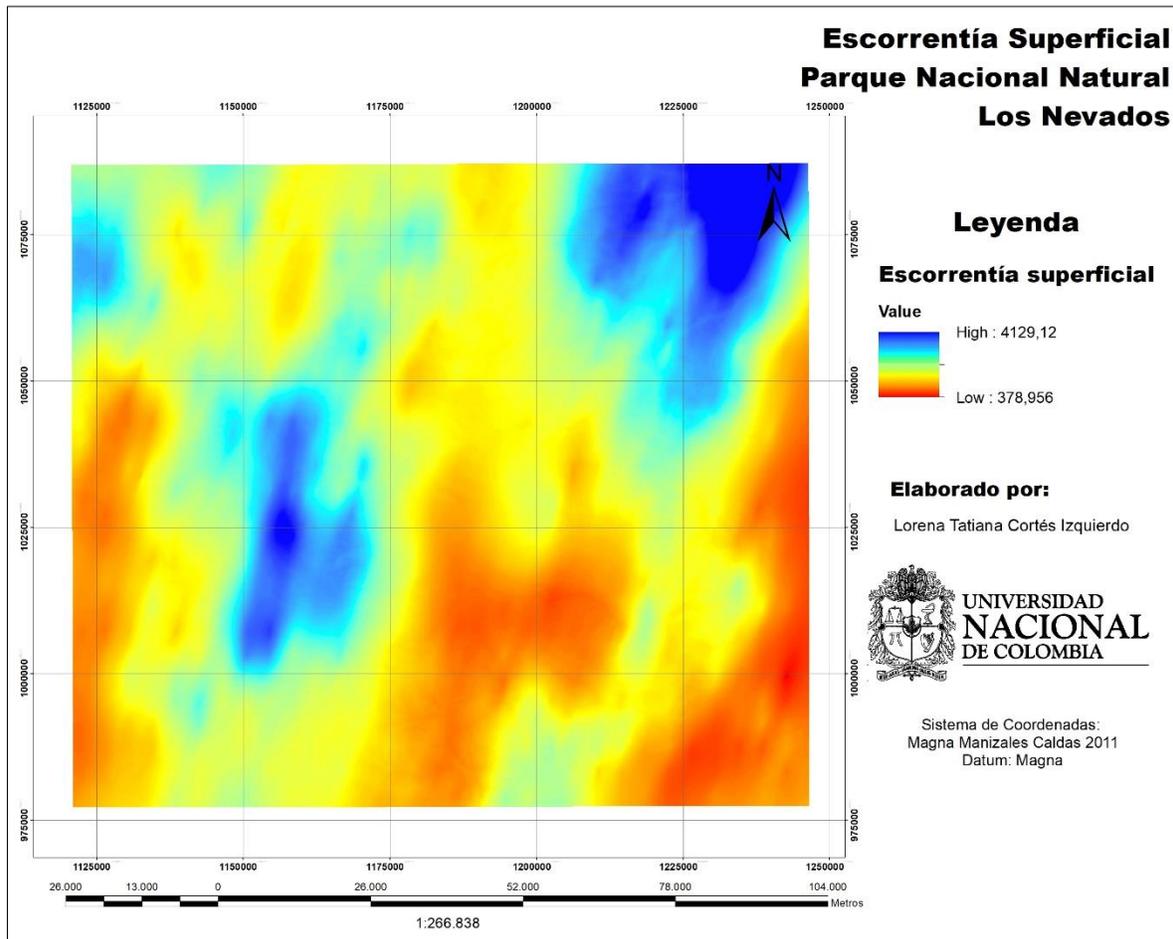
Figura 2-7: Evapotranspiración potencial Parque Nacional Natural Los Nevados



Fuente: Elaboración propia

Conociendo la Evapotranspiración real, mostrada en la Figura 2-8, es posible conocer la escorrentía superficial de la zona aplicando la ecuación 2.1, completando así, el material cartográfico referido al VEP.

Figura 2-8: Escorrentía Superficial Parque Nacional Natural Los Nevados



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Algoritmo de solución

Teniendo en cuenta que el análisis que requiere esta investigación estudia cada uno de los píxeles de la zona de análisis, fue necesario desarrollar un algoritmo cuyo lenguaje de programación es en Python, plataforma 3.5. realizado con apoyo del Ingeniero Ambiental Daniel González Duque, profesor e investigador de la Universidad EIA.

Python en la plataforma arcGIS, corresponde a un lenguaje de secuencia de comandos dirigido al geoprocesamiento, análisis de datos y automatización de mapas, ayudando a aumentar la productividad de los Sistemas de Información Geográfica. (ESRI, 2018)

A continuación, se describe las condiciones mediante las cuales el algoritmo de solución, presentado en el anexo C, realiza las iteraciones, por lo que, en principio, es fundamental dar a conocer la ecuación principal del estudio, la cual se muestra en la (ecuación 2.3) y se relaciona con la figura 2-1.

Una vez determinados los mapas de entrada (contenido de carbono, rendimiento hídrico y hábitat) y a partir de ellos el Valor Ecológico del Pixel (VEP) y definidas el área de búsqueda (mapa de búsqueda) y las áreas ya destinadas a la conservación (Mapa de Estado Actual), el algoritmo procede de la siguiente manera:

Se selecciona el primer píxel posible en el área de búsqueda y se le determina la conectividad mediante el procedimiento de encontrar el número de píxeles ya conservados a una distancia (r), esto se realiza de manera iterativa para todos los píxeles del área de búsqueda, con lo cual se conforma un mapa temporal de conectividad, para esa iteración en la toma de decisiones. Ese mapa de conectividad se combina con el de VEP, produciendo el mapa de AC para esa iteración, mediante el uso de la ecuación 2.3.

$$AP = (\alpha * C) + (1 - \alpha) * VEP \quad (2.3)$$

Donde AP corresponde al aporte a la conservación, C es conectividad y VEP es el valor ecológico por pixel previamente explicado; y los pesos α son definidos por el tomador de decisiones variando los mismos entre 0 y 1.

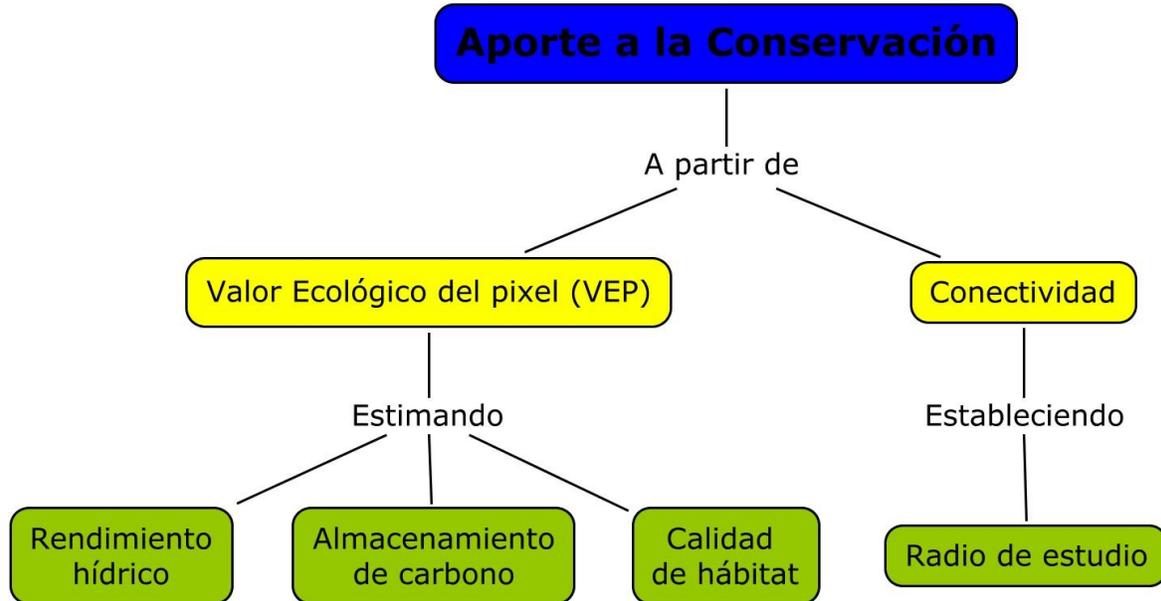
En el mapa de AP se realiza en principio la búsqueda del pixel con el mejor valor de AP y se selecciona para ser conservado; a continuación, se realizan dos operaciones adicionales: se marca ese pixel con uno (1) en el mapa de estado actual y de otro lado, se resta el valor correspondiente al costo de ese píxel en particular (tomado del mapa "costos de la tierra") de la cantidad disponible de recursos financieros. Una vez realizado esto se regresa al inicio del algoritmo, para continuar con la próxima iteración. Se continúa con esa secuencia hasta que se agoten los recursos financieros disponibles.

Es de anotar que el algoritmo genera un mapa de estado actual para cada iteración, pero almacenarlos todos sería poco eficiente en términos de espacio, por tanto, se tomó la decisión de almacenar dicho mapa de estado actual cada 100 iteraciones, parámetro que puede ser modificado a voluntad.

Este modelo que permite la toma de decisiones con base en juicios de valor, representados en α , parámetro que determina la importancia que otorgada a la conectividad, frente al valor $(1-\alpha)$ que representa la importancia concedida al valor ecológico del pixel (VEP), lo que posibilita cuantificar las preferencias del decisor, tal como lo expresa Ángel (2004) refiriéndose al Análisis Multiobjetivo como una técnica de optimización que permite escoger entre diferentes alternativas, con base en unas reglas de decisión.

Para conocer el aporte a la conservación de un área, se requiere relacionar tanto criterios ambientales como atributos estructurares de conectividad de los ecosistemas, tal como se desarrolla en la presente investigación, y se muestra en la figura 2-9.

Figura 2-9: Algoritmo de Aporte a la Conservación



Fuente: Elaboración propia

El decisor puede representar diversas reglas de decisión mediante la modificación de los parámetros de entrada del algoritmo.

La metodología propuesta hace uso de los conceptos de almacenamiento de carbono, rendimiento hídrico y hábitat, porque son relevantes para el caso que se está analizando y porque la información necesaria para considerarlos se encontraba disponible o se podía procesar con relativa facilidad.

En otros casos de aplicación es posible que otros fenómenos sean más relevantes para la determinación del Valor Ecológico del Pixel (VEP) y por tanto sean otras los criterios y ponderaciones asignadas.

En todo caso, se determinaría un mapa de VEP, con el cual se continuaría la aplicación del algoritmo desarrollado.

2.2.1 Valores de Alfa

Alfa (α) atribuye valores de importancia tanto a conectividad como a VEP, por lo que pueden darse en principio tres casos iniciales, que corresponden a $\alpha = 0$, $\alpha = 1$ y $\alpha = 0.5$ a partir

de los cuales se resta o aumenta importancia a ambos o alguno de los dos objetivos a revisar.

- **Alfa = 1**

Se le asigna todo el valor de aporte a la conservación a la posibilidad de un pixel de conectarse con el conjunto de los pixeles circundantes, establecidas tal como se había enunciado antes. En este caso no se concede importancia a los valores ecológicos de cada pixel, correspondientes a almacenamiento de carbono, rendimiento hídrico y hábitat, sumados en el VEP.

- **Alfa = 0**

Se reconocen únicamente los VEP de área de estudio, por lo que las posibilidades de conexión por proximidad con áreas de reserva o protección no son tenidas en cuenta. Los valores de cada uno de los factores englobados en VEP, dependen de las valoraciones que dieron los expertos previamente nombrados, en la segunda pregunta de la encuesta presente en el Anexo A. En la tabla 2-3 se muestran dichos resultados. Estos valores son pesos (W) que no se modifican dentro de esta investigación pero que para investigaciones posteriores pueden ser variados, para analizar el cambio en VEP.

- **Alfa = 0.5**

En este caso se le asigna un igual valor a la conectividad y al VEP, teniendo en cuenta de manera equilibrada su proximidad y su valor ecológico para la conservación. Lo anterior complejiza el funcionamiento del código dado que si el pixel previamente revisado presenta posibilidades de conexión con pixeles de áreas protegidas o con pixeles que por su VEP fueron previamente establecidos como conservados deben ser seleccionados para compra.

2.2.2 Mapas de entrada

El algoritmo recibe como material cartográfico de entrada todos los parámetros que hacen parte del VEP, el mapa de costos y dos mapas adicionales que permiten reconocer geográficamente qué pixeles son susceptibles de compra inicialmente y cuales se encuentran disponibles una vez ha comenzado a ejecutarse el algoritmo.

- **Mapas VEP**

El mapa de hábitat (H) se ingresa al algoritmo presentando valores entre 0 y 1, por lo que fue necesario realizar una normalización de los valores establecidos por los encuestados, presentes en la tabla 2-1. Por su parte, el mapa de almacenamiento de carbono (AC), se ingresa al algoritmo, tal como lo obtuvo Cárdenas (2016) en su trabajo de grado.

El mapa correspondiente al rendimiento hídrico (RH) es el previamente calculado como escorrentía superficial. Esta cartografía permite dentro del algoritmo evaluar el valor ecológico de cada pixel (VEP) tal como se expresa en la ecuación 2.3.

$$VEP = W_1 * AC + W_2 * RH + W_3 * H \quad (2.4)$$

Figura 2-10: Ponderación de parámetros del Valor ecológico de pixel (VEP)

Criterio Ambiental/Encuestado	Melissa Abud	Carlos Daniel Ruiz	Santiago Ortega	María Elena Gutiérrez	Fernando Cadena	Fabio Alarcón	Promedio
Almacenamiento de carbono	20	20	10	30	30	20	22
Rendimiento Hídrico	40	30	45	30	35	40	37
Biodiversidad	40	50	45	40	35	40	42

- **Mapa costos**

Este mapa dentro del algoritmo planteado en el código funciona como un tercer criterio en la evaluación del compra o no del pixel susceptible a ser conservado, por lo que en principio se evalúa el VEP, luego se tiene en cuenta la proximidad a los pixeles ya conservados, establecidos por el VEP y las áreas protegidas previamente, y finalmente se revisa el costo del pixel, en caso de empate en los criterios anteriores, con el fin de establecer la compra. A partir de la decisión de comprar o no, se disminuyen los fondos para la adquisición de áreas, sabiendo que estos son establecidos dentro de las variables de entrada.

- **Mapa de Estado Actual**

Este mapa tiene valores de 0 y 1 en los pixeles, dependiendo de si el pixel está disponible (0) o ya ha sido dedicado a la conservación (1), con el fin de que el algoritmo pueda reconocer que pixeles son susceptibles de compra en cada momento.

- **Mapa de Búsqueda**

Este mapa presenta valores de (0) en los píxeles que componen el área de búsqueda inicial.

- **Conectividad**

El esquema propuesto para seleccionar un píxel por su conectividad es el siguiente: alrededor de cada uno de los píxeles disponibles en cada iteración del algoritmo, se traza un círculo de radio (r) definible por el usuario y se encuentra la proporción de píxeles ya dedicados a la conservación frente al total de píxeles dentro de ese radio, realizándose una selección actualizada de áreas, en la que se tiene en cuenta proximidad y características ecológicas (VEP).

Este criterio de decisión garantiza que aquellos píxeles que están al borde de un área ya conservada tengan un alto valor de conectividad, pues será muy fácil realizar desplazamientos de especies animales, de polen, semillas, etc.

De otro lado, conforme el cálculo se realice para píxeles más y más distantes de las áreas ya dedicadas a la conservación, la conectividad así medida irá descendiendo hasta llegar al caso de píxeles aislados, cuya distancia al más cercano, ya dedicado a la conservación sea mayor al radio (r), caso que presentará una conectividad de cero.

Es de resaltar que el análisis que se realiza en esta investigación no se hace sobre parches de formas ya definidas, considerando cada uno como una unidad independiente a la que se le estiman parámetros tales como área, perímetro, distancias a los centros de los parches cercanos, etc, sino que se realiza una selección de píxeles uno a uno, considerando su conectividad con todos los que en ese momento del avance del algoritmo ya hayan sido dedicados a la conservación.

2.2.3 Resultados esperados

El algoritmo tiene como principal resultado un mapa final de terrenos a comprar dependiendo de la disponibilidad de recursos y teniendo en cuenta en cada momento el

aporte a la conservación que tienen los píxeles del área de estudio en el que se tienen en cuenta para la selección el VEP y la conectividad. Cabe resaltar que tanto los parámetros que componen el VEP, como los criterios que hacen parte la definición de aporte a la conservación son susceptibles de ser modificados conforme la disponibilidad de datos y condiciones del área de estudio lo permitan y requieran.

2.3 Ensayo preliminar

A continuación, serán mostrados los resultados obtenidos una vez fue elaborado el algoritmo de solución, con la finalidad de poner a prueba la funcionalidad del algoritmo. Para tal fin se implementó un espacio de prueba de 400 píxeles (20x20) y los mapas de entrada se definieron de manera sencilla para hacer más simple el ejercicio.

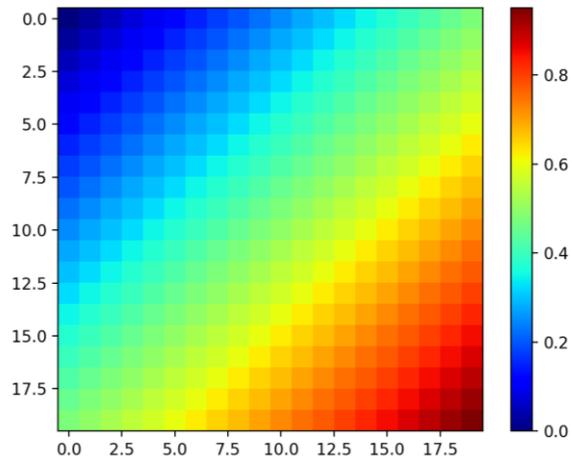
2.3.1 Mapas de entrada

La visualización de estos mapas permite al decisor reconocer como las relaciones dadas entre los criterios VEP y conectividad afectan la selección de áreas para la conservación.

- **Mapas VEP**

Teniendo en cuenta que estos mapas fueron generados por código y no usando herramientas de arcGIS, no fue necesario establecer ponderaciones de coberturas, para determinar la jerarquización de hábitats ni ponderar los tres parámetros medibles, que hacen parte de este criterio. En la figura 2-12 se muestra el mapa de valor ecológico por píxel.

Figura 2-11: Valor ecológico por pixel, ensayo preliminar

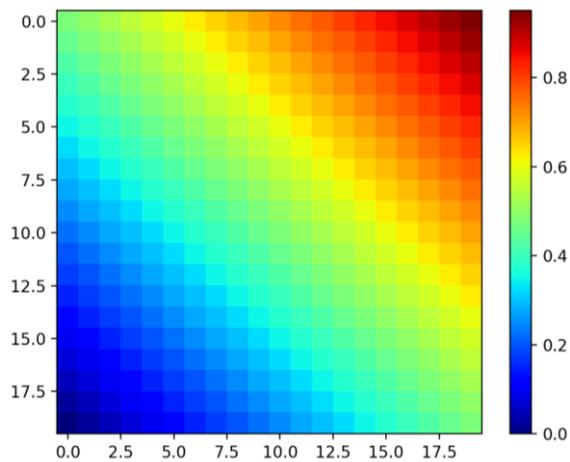


Fuente: Elaboración Propia

- **Mapa de costos**

Representa los costos de la tierra, establecidos por código. Este mapa muestra el valor de cada pixel y los fondos disponibles para la compra, en la figura 2-13.

Figura 2-12: Mapa de costos, ensayo preliminar

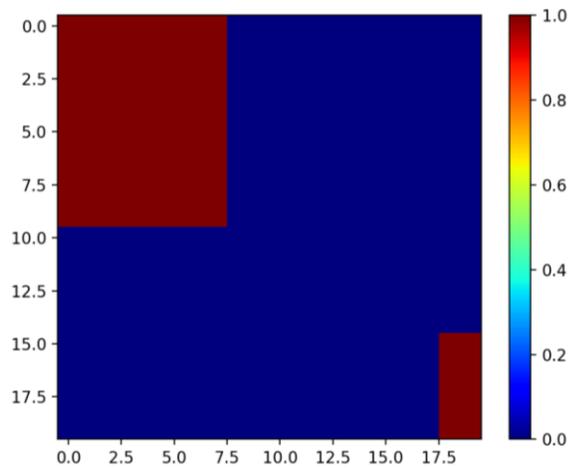


Fuente: Elaboración Propia

- **Mapa de estado Actual**

Este mapa pretende dar a conocer la cantidad de pixeles que ya se encuentran en conservación, antes de ejecutar el algoritmo, tal como se muestra en la figura 2-14 en donde se visualizan de color vinotinto, siendo los azules, no conservados.

Figura 2-13: Estado actual, ensayo preliminar



Fuente: Elaboración Propia

- **Mapa de búsqueda**

Este mapa presenta el área dentro de la cual se va a realizar la búsqueda de píxeles susceptibles de compra, corresponde al área en color azul en el mapa 2-13

2.3.2 Resultados preliminares

Este ensayo permitió mostrar los cambios evidenciados en los mapas de aporte a la conservación, conforme se modificaban las variables de entrada del código. A continuación, en la tabla 2-3 se muestran los casos de estas corridas de prueba y sus variables de entrada.

Tabla 2-3: Datos de las variables de entrada de las corridas, ensayo preliminar

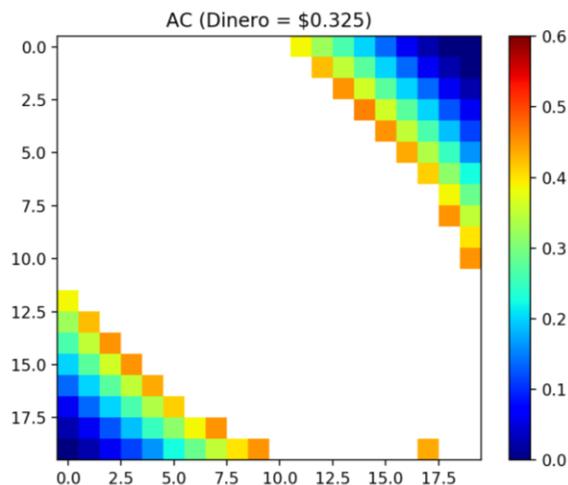
Número de caso / Variable	Radio	Alfa	Fondos financieros
1	5	1	100
2	5	0	100
3	5	0.5	100
4	15	0.5	100
5	15	0.6	100

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentarán los mapas de Aporte a la Conservación obtenidos en estas corridas.

En el caso 1 con $\alpha=1$, se obtuvo el mapa presente en la figura 2-16, en el que los fondos finales corresponden a 0,32 pesos colombianos significando que ya no se puede comprar otro pixel pues los fondos no son suficientes para ello. El resultado muestra que los píxeles seleccionados para compra se ubican en dos áreas diferentes, escogidos a partir de la proximidad con dos áreas de conservación previamente establecidas.

Figura 2-14: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 1 con $\alpha=1$, ensayo preliminar

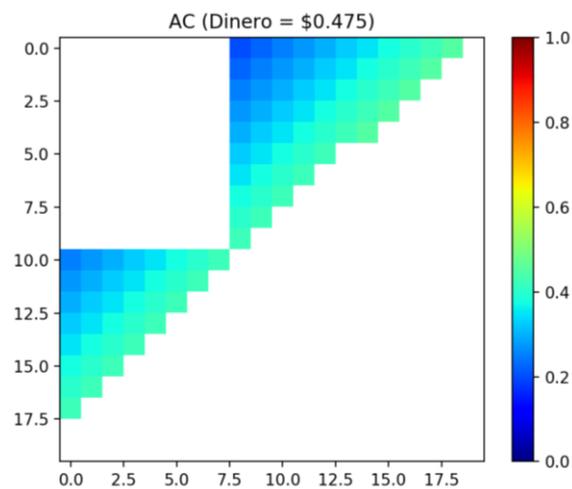


Fuente: Elaboración Propia

Por su parte en el caso 2 con $\alpha=0$, se hacen evidentes las compras por pixeles cuyo VEP es elevado, por lo que las compras avanzan desde la parte inferior del mapa, dirigidas hasta las zonas de conservación ubicadas en la parte superior, en donde se unen los pixeles comprados con el área de reserva.

Figura 2-15: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 2 con $\alpha=0$, ensayo preliminar

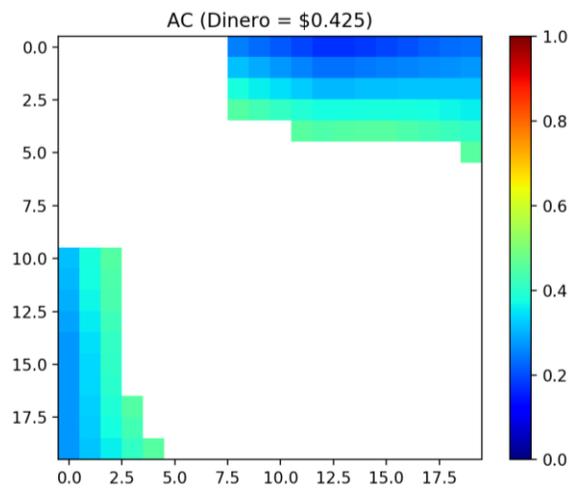
- **5. Calcular la escorrentía superficial del sitio de análisis.** Balance hídrico de largo plazo



Fuente: Elaboración Propia

En el caso 3 con $\alpha=0.5$, se presentan resultados similares a los del caso 2, con la diferencia de que al asignar el mismo valor a VEP y conectividad es posible alcanzar la conectividad a partir de la proximidad de pixeles, con casi los mismos recursos que si se le da toda la importancia a VEP. Tal como lo muestra la figura 2-18.

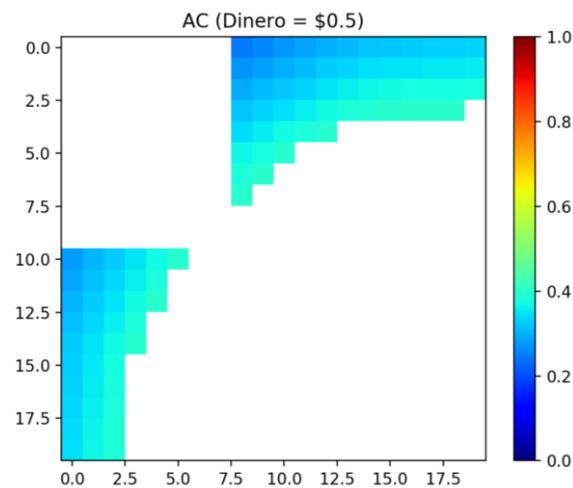
Figura 2-16: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 3 con $\alpha=0.5$, ensayo preliminar



Fuente: Elaboración Propia

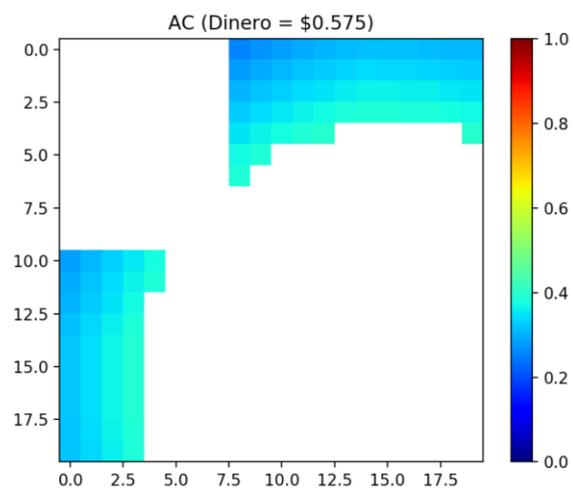
Para el caso 4 con $\alpha=0.5$ y 5 con $\alpha=0.6$ se presentan resultados similares al del caso 3, dado que el valor del alfa es el mismo, pero teniendo en cuenta que el radio de estudio es mayor, la cantidad de pixeles comprados en los extremos del corredor creado, conforme pasan las iteraciones es más grande. Así lo evidencian las figuras 2-19 y 2-20, presentadas a continuación.

Figura 2-17: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 4 con $\alpha=0.5$ y $r=15$, ensayo preliminar



Fuente: Elaboración Propia

Figura 2-18: Mapa final de aporte a la conservación del Caso 5 con $\alpha=0.6$ y $r=15$, ensayo preliminar



Fuente: Elaboración Propia

3. Caso de estudio

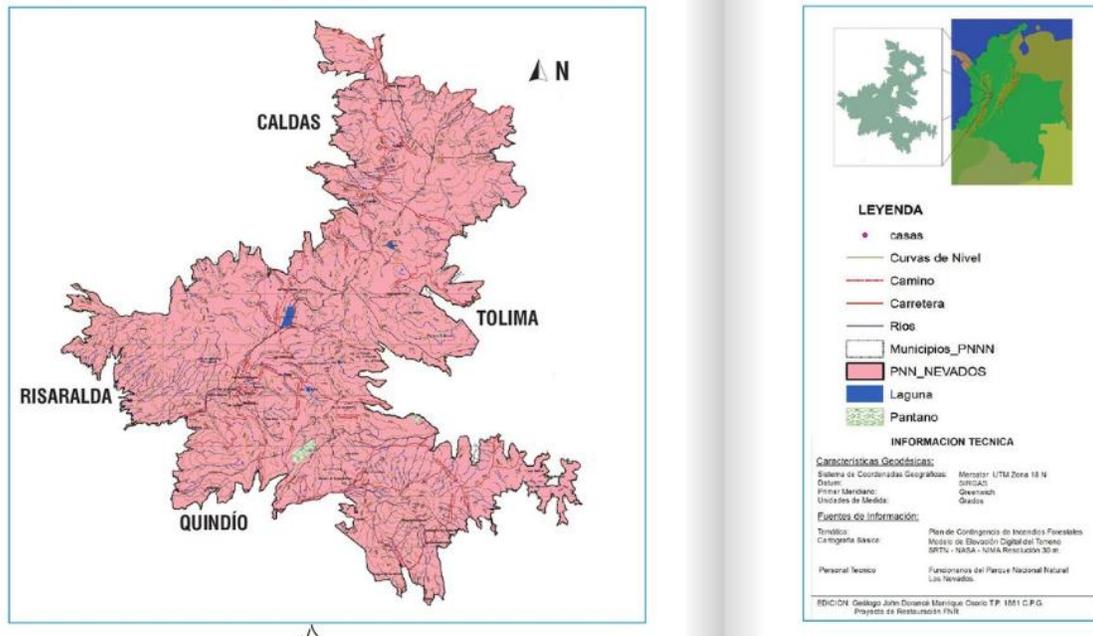
El caso de estudio seleccionada para la aplicación del algoritmo previamente explicado corresponde a la cuenca del río Claro en la que se ubica el área de amortiguación del Parque Nacional Natural los Nevados.

3.1 Parque Nacional Natural Los Nevados

Teniendo en cuenta que allí se ubican ecosistemas prioritarios para la conservación, como lo son los páramos, los cuales abarcan aproximadamente el 80% del territorio del PNN Los Nevados, y que en Colombia no se ha podido garantizar la sostenibilidad financiera o la representatividad ecosistémica del sistema de áreas protegidas según el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2013) es necesario llevar a cabo investigaciones que aporten formas de revisar factores ecológicos y su relación con los recursos financieros dentro de la selección de áreas dirigidas a la conservación.

El área protegida del Parque Nacional Natural-PNN Los Nevados comprende más de 58 mil hectáreas en jurisdicción de once municipios pertenecientes a cuatro departamentos, así: municipio de Villamaría (Departamento de Caldas), municipio de Salento (Departamento de Quindío), municipios de Santa Rosa de Cabal y Pereira (Departamento de Risaralda), y municipios de Murillo, Anzoátegui, Casablanca, Herveo, Villahermosa, Santa Isabel, Murillo e Ibagué (Departamento de Tolima), tal como se establecen Ángel, et, al. (2018) en la “Definición de la línea base de cambio y variabilidad climática, recursos hídricos y biodiversidad en el PNN Los Nevados y sus áreas circundantes”. En la figura 3-1, se muestra su ubicación.

Figura 3-1: Ubicación del Parque Nacional Natural Los Nevados



Fuente: Parques Nacionales Naturales de Colombia (2010)

Por su parte, Ángel et, al. (2018) determinan que este PNN y su zona de amortiguación, forman parte de las últimas zonas en donde es posible localizar poblaciones de grandes mamíferos suramericanos que están en peligro de extinción, como la danta de montaña, el oso de anteojos, el puma y los venados, por lo que concluyen, teniendo en cuenta que en los ecosistemas de páramo se ubican las mayores proporciones de especies “endémicas”; que este parque contienen la flora y fauna más auténticamente colombiana.

3.1.1 Historia del Parque Nacional Natural los Nevados

Inicialmente, el Ministerio de agricultura y ganadería (1978) determina las actividades de conservación que permitieron declarar aproximadamente 25.000 hectáreas ubicadas en las hoyas hidrográficas de los ríos Otún y San Eugenio como zona de reserva forestal.

Igualmente, El Congreso Nacional de Colombia (1951) calificó esta misma zona como área de utilidad pública, por lo que le cedió al Ministerio de Agricultura y Ganadería los terrenos baldíos que existían dentro de la zona seceptible a conservar, en el municipio de Pereira. Dentro de la ley 4 de 1951, también, se dispuso la compra y/o expropiación de los predios

privados, así como las mejoras a cultivos existentes en la zona, para ser igualmente adjudicados al mismo municipio.

Por por su parte la Ley 2 de 1959, del Congreso Nacional de Colombia se facultó al Instituto Colombiano de Reforma Agraria INCORA para declarar Parques Nacionales Naturales estableciendo legalmente los principios básicos para esto. En el artículo 13, se declara el PNN Los Nevados y las áreas que los circundan.

En el Decreto 2420 de 1968 de la Presidencia de la República de Colombia, se crea el INDERENA, anterior Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, al que se le adscriben las funciones relacionadas con la creación, administración y manejo de los Parques Nacionales Naturales del país.

Finalmente, mediante el acuerdo 15 de 1973, expedido por el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables - INDERENA se delimitó y reservó un área de 38.000 ha bajo el nombre de PNN Los Nevados. En 1974, el Ministerio de Agricultura ratifica esta delimitación. En 1985, según Ángel et al. (2018) se determinando que la superficie del parque en realidad corresponde a 58300 hectareas a partir de revisiones geograficas que tuvieron en cuenta los linderos estipulados por el INDERENA en 1973.

3.2 Cuenca del Río Claro y PNN Los Nevados

En dichas áreas, establecidas a nivel legal, se albergan recursos naturales que soportan el equilibrio ecológico, la biodiversidad de la región y el desarrollo de las actividades humanas tanto domésticas como agroindustriales, dado que el abastecimiento de agua actual y futuro destinado a mas de 2 millones de personas, depende de la conservación del páramo que allí se encuentra. (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2010).

Sabiendo que la cuenca del río Claro, ubicada en el PNN Los Nevados, que su vez se localiza en municipio de Villa María, departamento de Caldas, hace parte de las 11 corrientes principales de agua que hacen parte del PNN, según Molina et al. (2008), es necesario evaluar metodologías que permitan conseguir sostenibilidad tanto ecológica como financiera para el establecimiento de áreas a conservar que permitan la preservación de los recursos que allí se encuentran.

3.2.1 Análisis de coberturas y áreas protegidas

Aplicando la metodología CORINE Land Cover (CLC) que es una adaptación del Programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) desarrollado por la Comunidad Europea, fue posible obtener un inventario de coberturas de la tierra del PNN Los Nevados a partir del procesamiento de imágenes satelitales y fotografías aéreas y verificaciones en campo, realizadas en el marco de trabajo de Echandía (2016).

En dicho trabajo se cartografiaron áreas mayores o iguales a 0.5 hectáreas al interior de la cuenca del río Claro, obteniendo coberturas homogéneas en los tres niveles planteado por el programa CORINE, así como determinando los límites de las zonas protegidas que hacen parte de la cuenca.

Según los datos de Echandía (2016) el PNN Los Nevados localizado en la parte alta de la cubre 40,97% de la superficie y adicionalmente, en el costado norte de la cuenca se encuentra la Reserva Forestal Protectora Regional “Bosques de la CHEC”, establecida en el año 2002, con un área de 570 hectáreas, es decir un 2,98% de la cuenca por lo que el 56.05% restante, corresponde a áreas no protegidas.

Las zonas no protegidas en las que se encuentran el área de amortiguación del PNN Los Nevados, cuya area corresponde a 10692 hectáreas, son las que dentro del algoritmo de estudio representan el mapa de búsqueda, mientras que la totalidad de la cuenca del río Claro se ingresa como el mapa de estado actual, donde los 1 representan las zonas ya protegidas y conservadas y 0 las áreas inicialmente disponibles para la compra.

Se resalta un estudio de conectividad en el que se acoje el modelo de la ecología del paisaje propuesto por Forman (1995) donde el paisaje se analiza como un conjunto de parches inmersos en una matriz, conformada por diversas coberturas presentes en el paisaje estudiado. Los parches se clasifican en nodos o corredores según su forma.

Angel, et, al (2016) concluyen que existe alta fragmentación, donde los fragmentos de bosque son los que menores áreas representan, con áreas menores a 1,0 ha en 33 de los 71 parches de este tipo, por su parte las coberturas herbazal y arbustal en su gran mayoría ocupan áreas entre 1,0 y 10 ha.

Todas las coberturas naturales presentan fragmentos de formas bastante irregulares, lo que genera un efecto de borde en los fragmentos que puede afectar la funcionalidad ecológica

de estas áreas. Adicionalmente los fragmentos de cada una de las coberturas se encuentran aislados entre sí lo que no favorece los procesos de regeneración y sucesión natural.

Por lo anterior, la conectividad planteada en el presente proyecto toma el área de estudio con un todo, sin tener en cuenta formas ni áreas de parche, estimado a partir de su aporte a la conservación, por lo que se tiene en cuenta, la valoración ecológica de cada pixel y su capacidad de conectarse con los que lo rodean

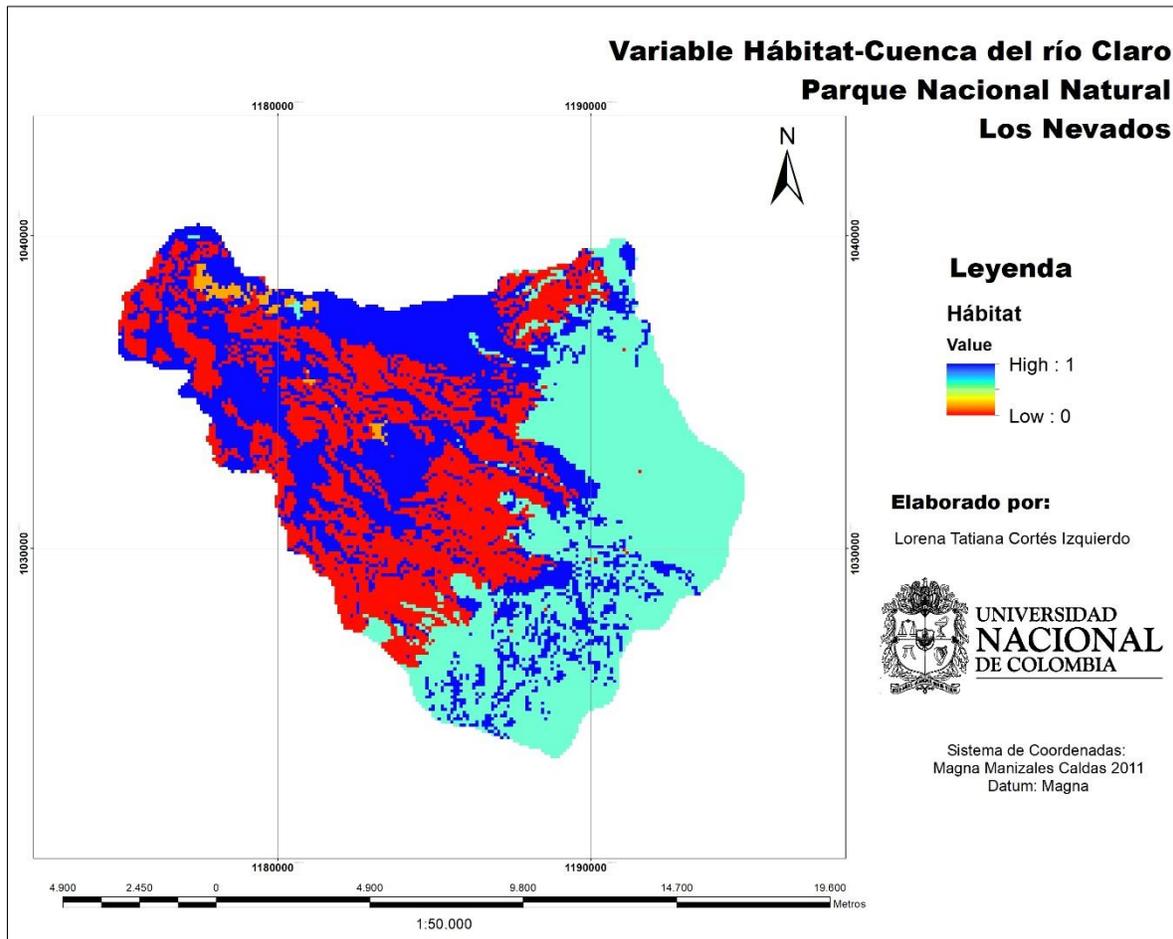
Dentro del marco de consultoría realizado para Isagen, en el PNN Los nevados, Angel, et, al (2016) realizaron una caracterización de la vegetación en la que también fueron identificadas especies endémicas, relacionando las mismas con las coberturas previamente identificadas.

3.3 Aplicación del algoritmo de análisis en la Cuenca del Río Claro del Parque Nacional Natural Los Nevados

El algoritmo desarrollado para la presente investigación, explicado en el capítulo 2, requiere los mapas ejecutados en Arcgis presentados a continuación para iniciar las iteraciones de análisis.

Para iniciar se presenta en la Figura 3-2, el mapa de hábitat definido a partir de la ponderación de coberturas, determinada con base en los resultados de la encuesta mostrados en la tabla 2-1. Tal como se expresó antes esta jerarquización se determinó mediante la calificación de expertos que les atribuyeron mayor o menor importancia a la conservación de a las diferentes coberturas del suelo halladas en la zona de análisis.

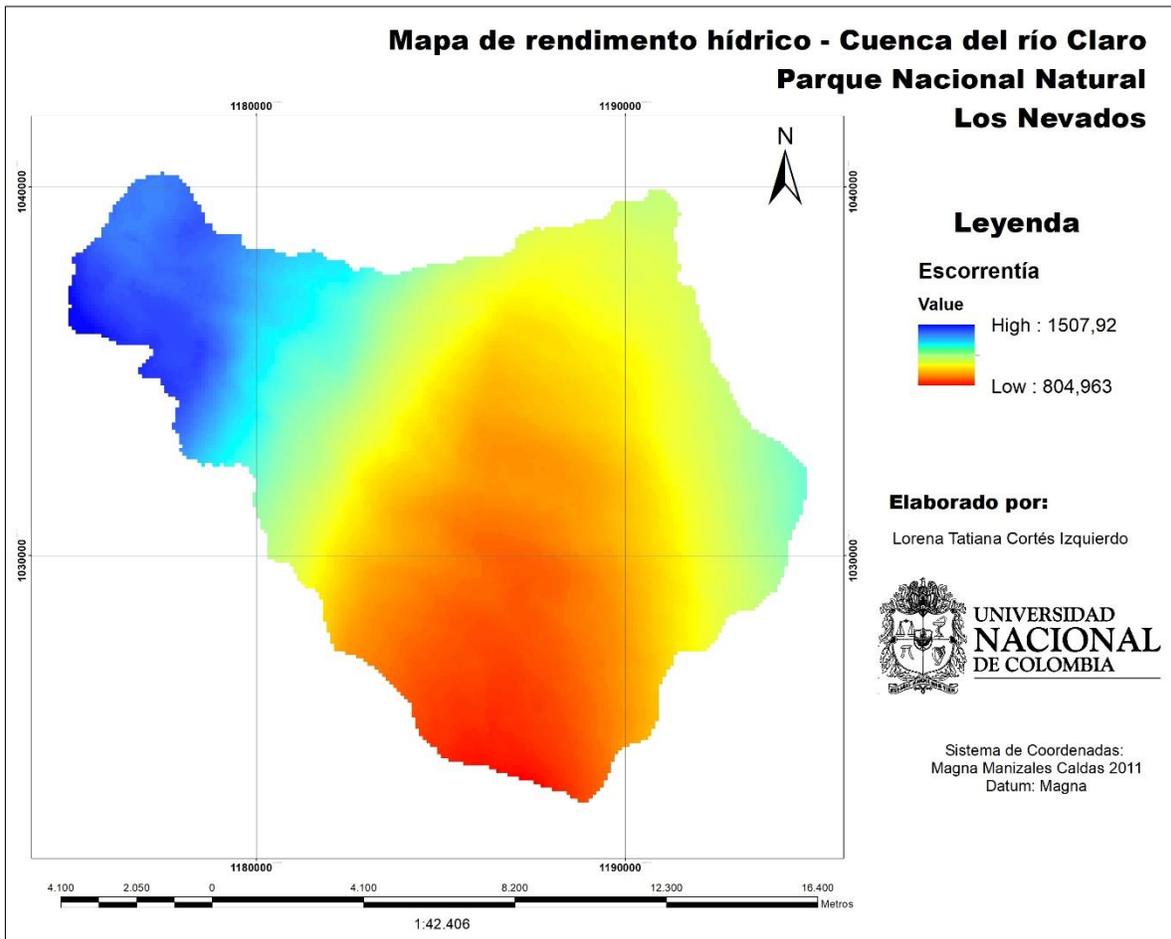
Figura 3-2: Variable Hábitat, de la cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

El mapa referido al rendimiento hídrico corresponde al mapa de escorrentía superficial mostrado en la figura 2-8, que luego de hacer un *clip* en arcGIS se obtienen los valores a nivel de cuenca, presentados en la figura 3-3.

Figura 3-3: Variable rendimiento hídrico, cuenca del río Claro



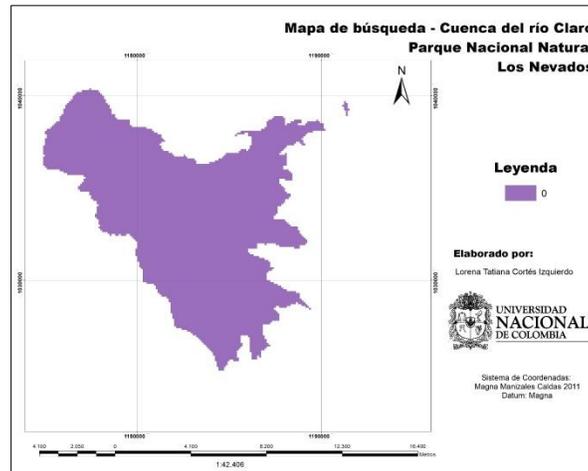
Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar, que tal como se expresó en el capítulo 2 los datos de almacenamiento de carbono fueron tomados directamente de la investigación de Cárdenas (2016) y que su procedimiento de obtención se muestra en el anexo B.

En cuanto a conectividad, se establecen dos mapas de entrada previamente descritos en el capítulo 2, a partir de los cuales el algoritmo identifica disponibilidad de píxeles para compra (mapa de búsqueda) y los píxeles que ya se encuentran en estado de conservación (Mapa de estado actual). Cabe recordar que el mapa de estado actual cambia conforme se van ejecutado las iteraciones dentro del código porque en cada una de ellas se compra una nueva hectárea que modifica su estado de no conservado a conservado.

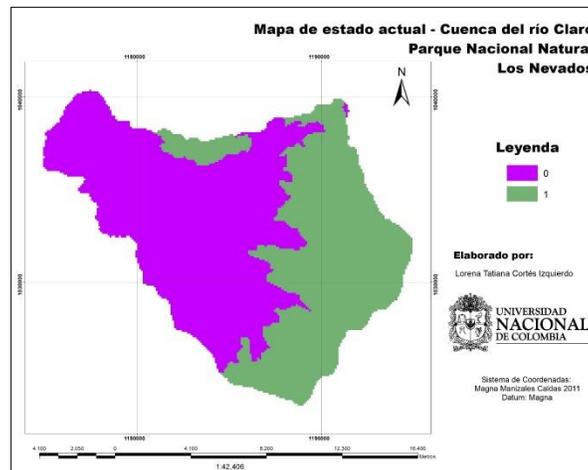
Los mapas de búsqueda y estado actual inicial se exponen en las figuras 3-4 y 3-5, respectivamente.

Figura 3-4: Mapa de Búsqueda cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

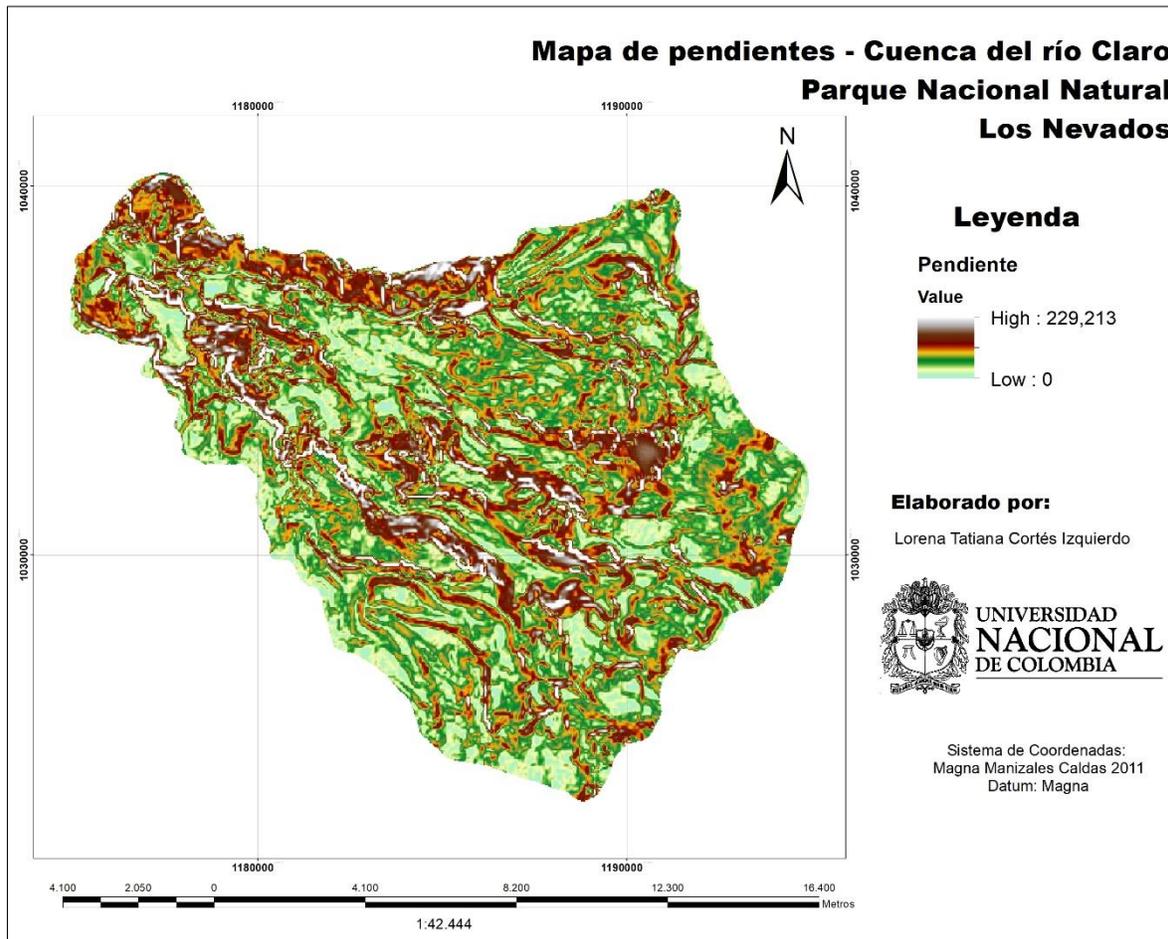
Figura 3-5: Mapa de estado actual cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

Para el mapa de costos, es necesario previamente llevar a cabo el cálculo de las pendientes para el que se requiere el Modelo de elevación digital a partir del cual, usando la herramienta Slope de Arcgis es calculado el valor de las pendientes. Este mapa es mostrado en figura 3-6.

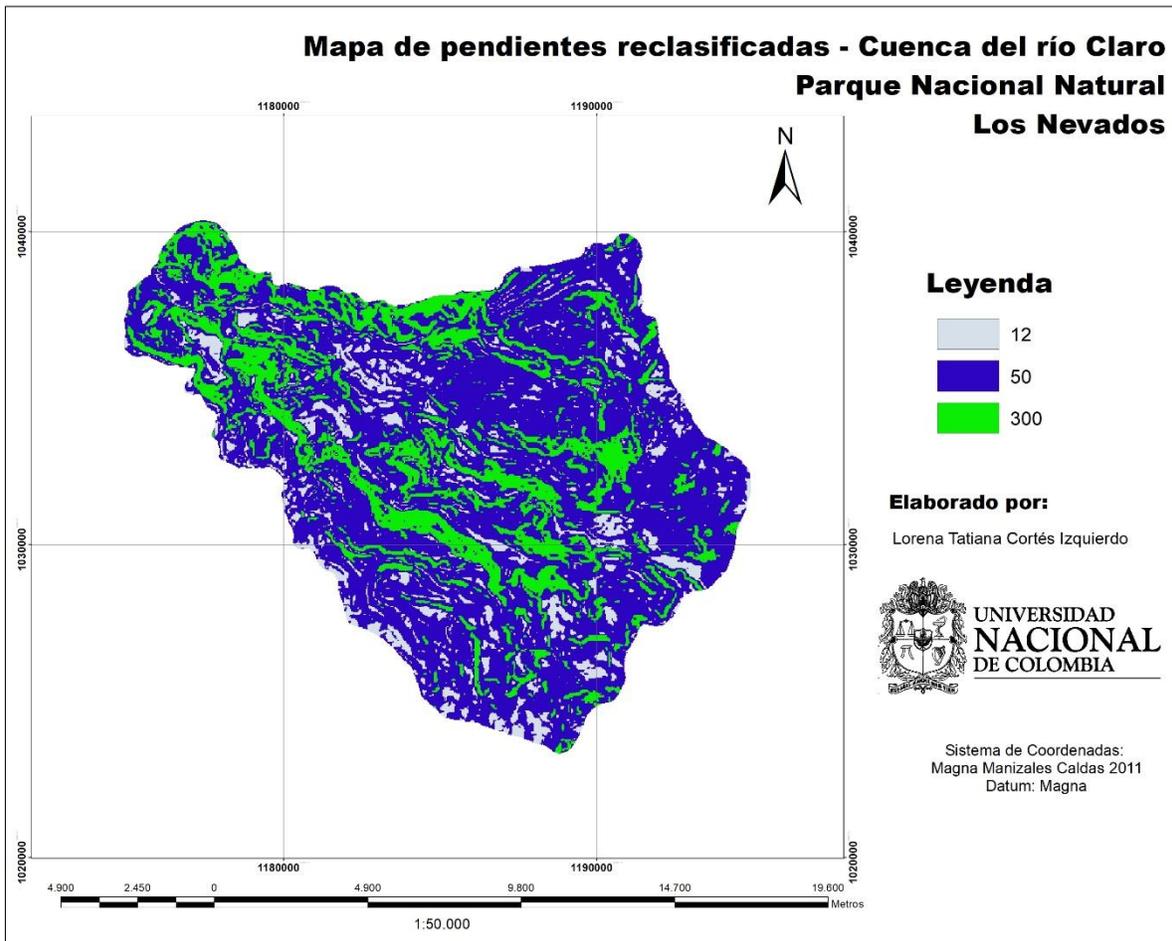
Figura 3-6: Mapa de pendientes de la cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se le realiza una reclasificación al mapa de pendientes, utilizando la herramienta *reclassify*, teniendo en cuenta la identificación de relieve dada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC (1980), mostrado en la figura 3-7.

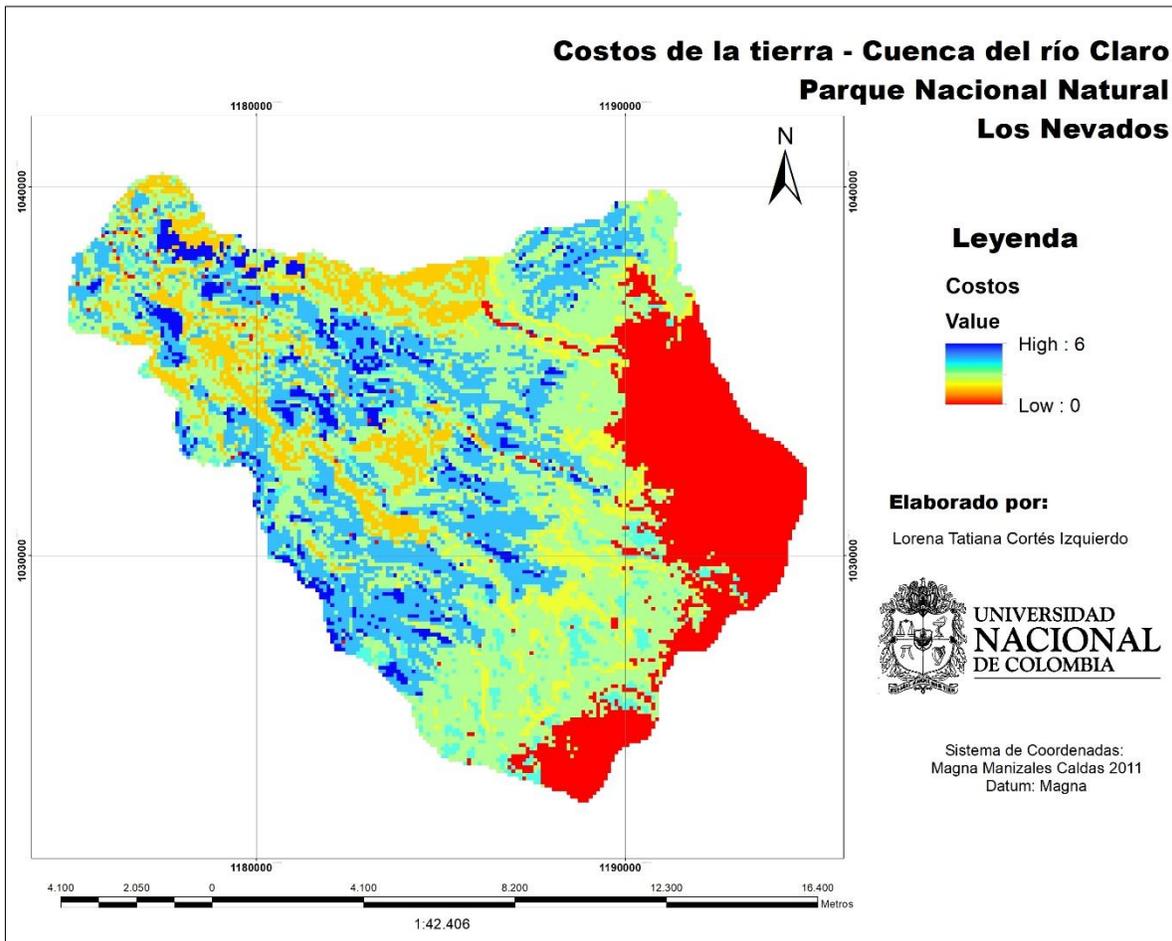
Figura 3-7: Mapa de pendientes reclasificado de la cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

Luego, fue necesario convertir el ráster obtenido a polígono usando Arcgis, teniendo como resultado el archivo vector “Pendientes”, que luego mediante una *intersección* con el archivo “Coberturas_vf” permite la asignación de costos de la tierra, encontrados en el atributo Valor costos, determinado a partir de los valores presentes en la (tabla 2-2) en la que los precios están dados en millones de pesos colombianos. A partir de esta intersección fue posible empleado la herramienta *convertir a ráster*, obtener el mapa de costos mostrado en la figura 3-8.

Figura 3-8: Mapa de costos de la tierra en la cuenca del río Claro



Fuente: Elaboración propia

En este mapa se evidencia que las áreas que facilitan el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias son aquellas cuya pendiente es baja o media y sus coberturas en su mayoría son pastos y su costo es elevado; por otro lado, aquellas hectáreas ubicadas en sitios con alta pendiente presentan parches de bosques existentes debido a que la explotación económica de estos sitios es de difícil acceso, lo que ocasiona que su precio de venta sea bajo.

4. Resultados

A continuación, serán mostrados los resultados de la aplicación del algoritmo, usando como mapas de entrada los correspondientes a la cuenca del río Claro. Para mostrar los casos iniciales de corrida, es necesario en principio explicar los parámetros que no fueron modificados, entre los que se encuentran los fondos financieros y el radio para el cálculo de la conectividad.

4.1 Descripción de casos de análisis

Para simular una situación cercana a la realidad que le permita al modelo mostrar su potencialidad, se va a trabajar con base en la siguiente situación hipotética; la construcción y operación de una planta de energía geotérmica en la zona de amortiguación del PNN Los Nevados, lo que conllevaría, de acuerdo con el Decreto 2099 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016) la inversión del 1% del valor de construcción de la planta para la *“recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que alimenta la respectiva fuente hídrica”*

Esta es una situación verosímil, tal como lo demuestra la publicación del Periódico El Tiempo del 18 de febrero de (2015) en la que se muestra la firma de un memorando de entendimiento entre la generadora Isagén y las firmas Toshiba, West JEC y Schlumberger referido a la posibilidad de desarrollar un planta de energía geotérmica en el municipio de Villa María, Caldas, en donde también se ubica la cuenca del río Claro, con una capacidad de generación de 50 megavatios.

De acuerdo con el IPCC (2012) los costos de instalación de energía geotérmica pueden estar entre los US\$ 1.7 y 3 millones por MW para plantas tipo flash, mientras que para las binarias están entre US\$ 2.3 y 3.7 millones, por lo que se asume un costo de 3 US\$ millones por MW instalado.

En la tabla 4-1, se presenta la determinación de los fondos disponibles para la realización del ejercicio de simulación aquí descrito.

Tabla 4-1: Determinación de fondos disponibles

Determinación de fondos disponibles		
Concepto	Unidad	Valor
Capacidad instalada planta geotérmica	MW	50
Costo de instalación	US\$ mill/MW	3
Valor planta	US\$ mill	150
Porcentaje para conservación	[.]	1%
Fondos destinados a conservación	US\$ mill	1,5
Tasa de cambio	\$/US\$	3000
Fondos destinados a conservación	\$ mill	4500

Fuente: Elaboración propia

El tamaño de pixel escogido para trabajar dentro del algoritmo corresponde a 100 m*100 m, una hectárea, esto se decidió con base en:

- La resolución de los mapas disponibles.
- El hecho de que la unidad usual empleada para la negociación y valoración de la tierra es la hectárea.
- La necesidad de agilizar los tiempos de corrida.²

El radio propuesto para la evaluación de conectividad corresponde a 15 pixeles; sabiendo que el tamaño de pixel de los mapas de entrada mostrados en el capítulo 4 ítem 4.3, es de 100 metros, la distancia equivalente corresponde a 1.5 kilómetros.

4.2 Resultados caso a caso

En la tabla 4-2, se presentan los parámetros de entrada para una serie de corridas en las que se evalúa el cambio en la situación final conforme se varía el parámetro α .

² Se llevaron a cabo corridas de prueba con un tamaño de pixel 30*30, encontrando que el algoritmo finalizaba su ejecución luego de 20 horas de corrida. Una vez se amplió el tamaño del pixel a 100*100, este tiempo se redujo a 4 horas en promedio.

Tabla 4-2: Casos iniciales de la cuenca del río Claro³

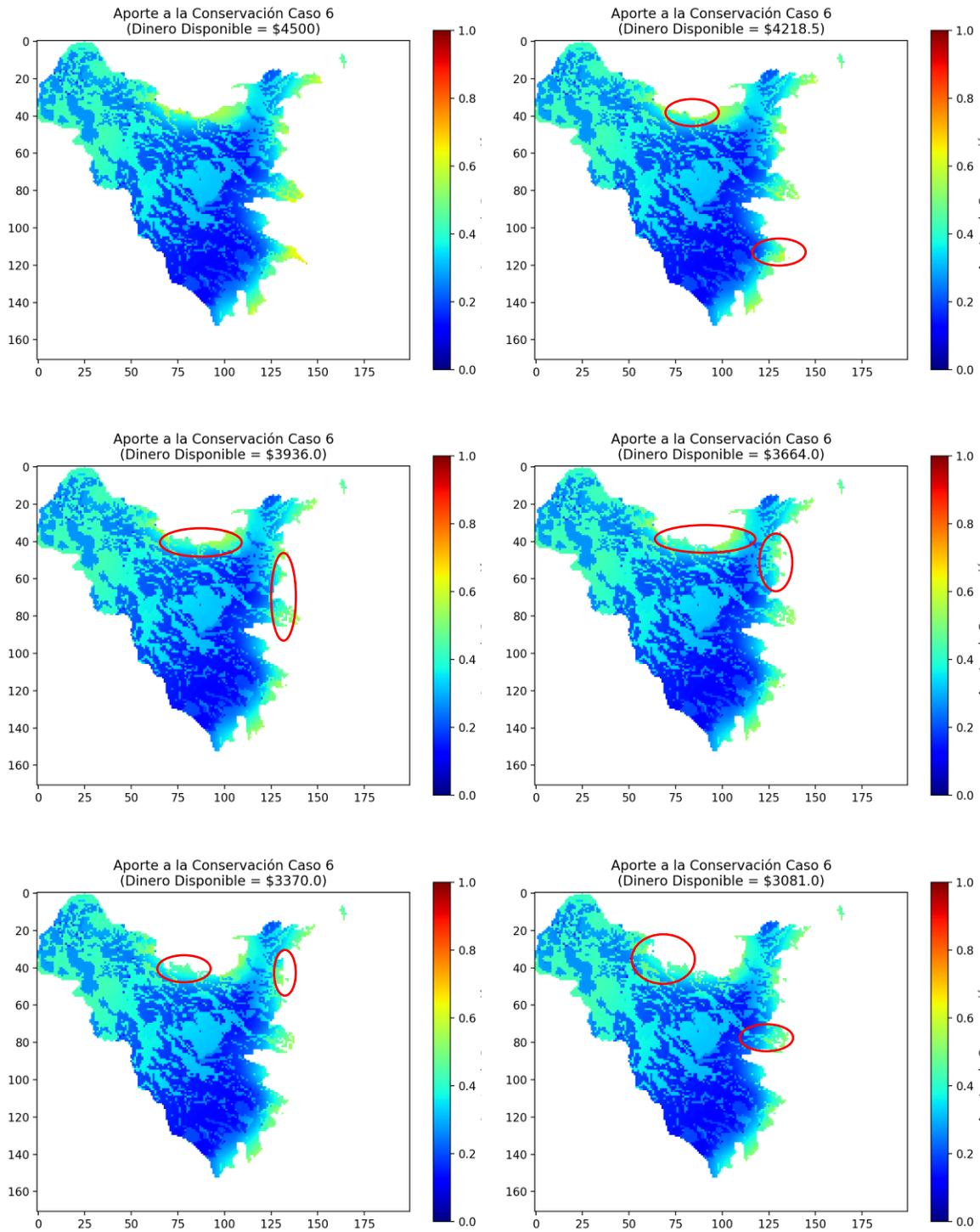
Valor de α	0	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,5	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1
Número de iteraciones realizadas	1720	1720	1720	1722	1724	1712	1520	1422	1411	1376	1342	1334	1330
Tiempo de corrida (Horas)	4	4	6	4	4	4	3	5	2	3	2	2	2

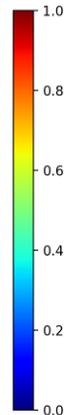
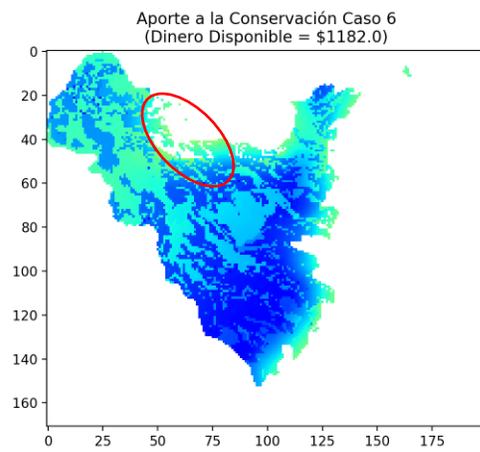
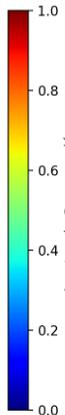
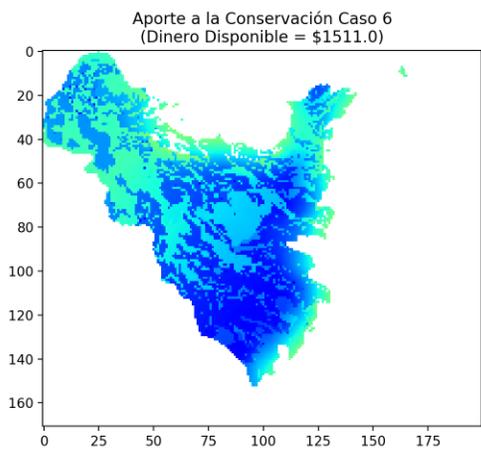
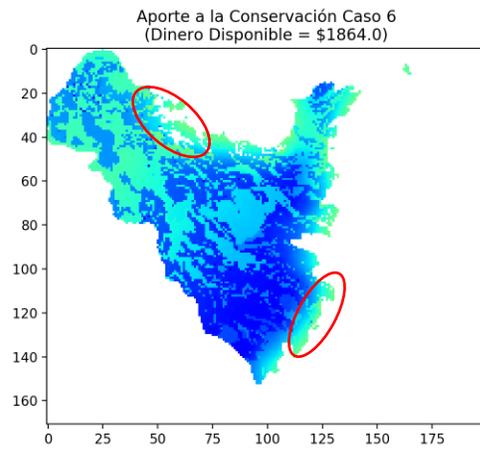
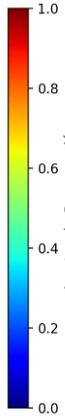
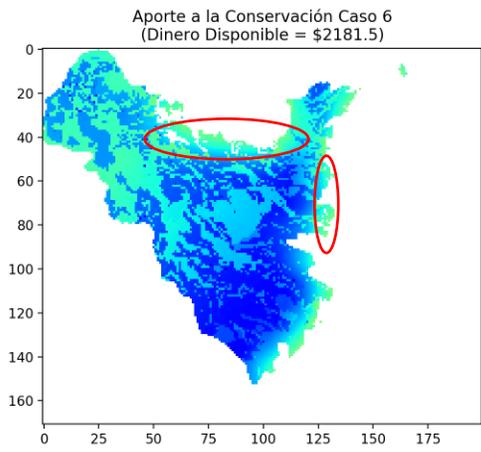
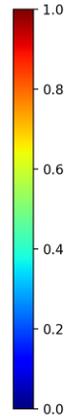
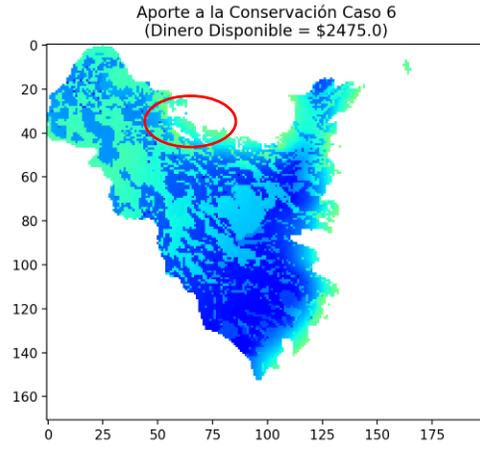
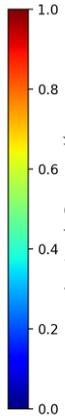
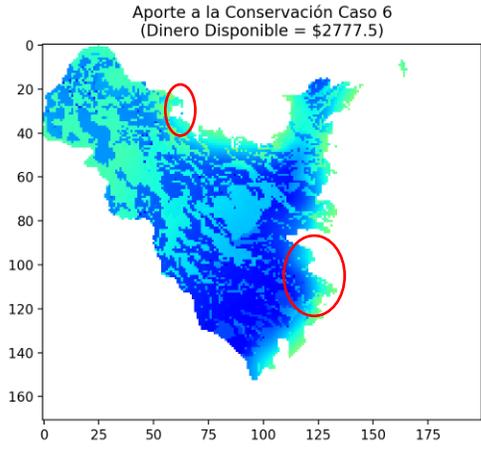
Fuente: elaboración propia

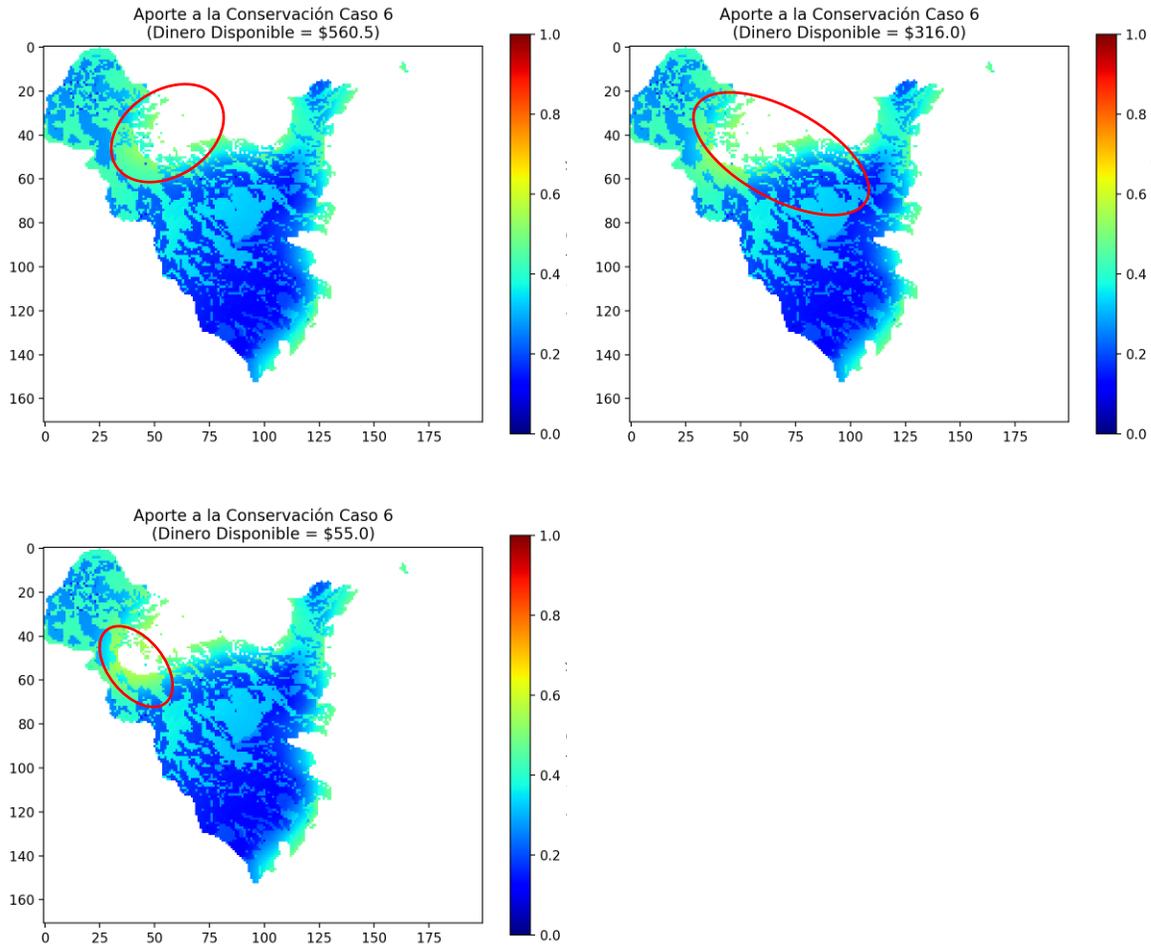
Inicialmente, se presentará el caso 6 cuyo α es 0.5, caso que corresponde a asignar la misma importancia tanto a conectividad como a VEP. Este caso involucra 1720 iteraciones; para efectos de entender la evolución, en la figura 4-1 se muestran los resultados del algoritmo, cada 100 iteraciones. Para interpretar correctamente los mapas de resultados es necesario tener en cuenta que estos muestran el aporte a la conservación de los píxeles aún disponibles para la compra.

³ Los casos 1, 2 y 3 corresponden a corridas en las que se variaron los valores W que hacen parte del criterio VEP, correspondiendo estos a 0.5 para almacenamiento de carbono, 0.3 para rendimiento hídrico y 0.2 para hábitat.

Figura 4-1: Resultados obtenidos con $\alpha=0.5$ cada 100 iteraciones.







Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que α corresponde a un valor de 0.5, con el que el decisor proporciona la misma importancia tanto al criterio de conectividad como al criterio de Valor Ecológico del Pixel (VEP). En las primeras iteraciones se observa que el algoritmo selecciona los terrenos localizados en las salientes más próximas al PNN Los Nevados, dado que su aporte a la conservación se ubica entre el rango de 0.7 y 0.8 tal como se observa en la barra de colores adyacente, siendo los mayores disponibles en ese momento.

El algoritmo no selecciona en principio píxeles ubicados en áreas circundantes a la reserva forestal regional, ubicada en la parte superior de la cuenca, dado que no existen salientes como sí sucede con el PNN, lo que genera bajos valores en el criterio de conectividad, lo que a su vez disminuye sus valores de aporte a la conservación.

Una vez el algoritmo selecciona para compra los píxeles antes descritos, se observa como las selecciones se trasladan a los píxeles próximos a la reserva, a los que el algoritmo

asigna valores de aporte a la conservación de 0.5 aproximadamente, este valor puede ser mayormente influenciado por los altos valores VEP, dado que es allí donde se presentan los valores más altos en las variables de hábitat, almacenamiento de carbono y rendimiento hídrico.

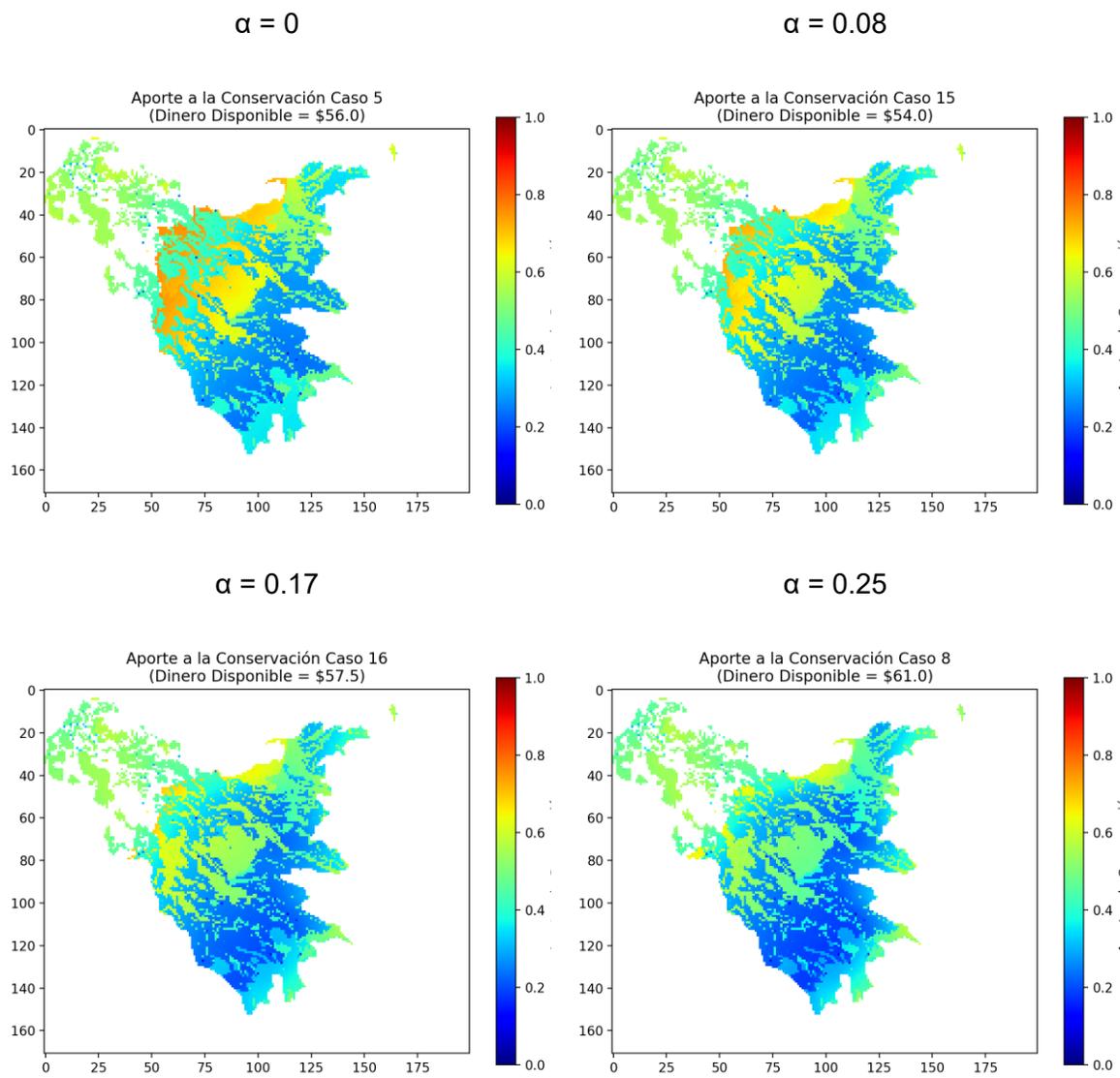
Con el paso de las iteraciones es posible evidenciar cómo los pixeles seleccionados van formando un parche creciente que va desde la reserva forestal, con dirección hacia el oeste de la parte baja de la cuenca donde los valores de almacenamiento de carbono, cuyo peso W en VEP es el más alto, se encuentran entre 142 y 270 toneladas por hectárea.

El algoritmo, como se expresó antes, guarda mapas cada 100 iteraciones. El resultado que se presenta corresponde a la última visualización, es decir, todavía queda algún remanente de fondos, en este caso particular, 55 millones de pesos.

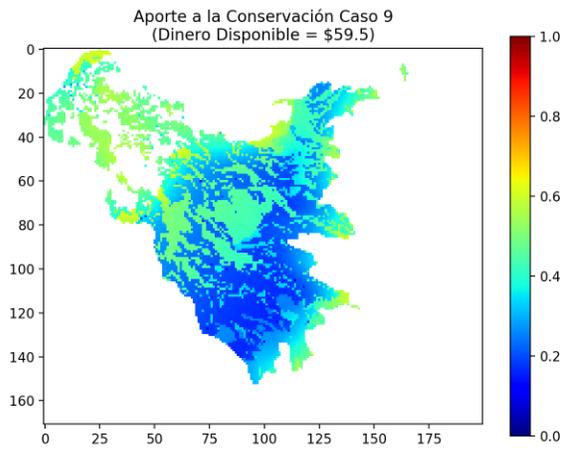
Este caso de corrida con α de 0.5 muestra cómo la selección de áreas de conservación se dirige a ampliar las fronteras del PNN Los Nevados, que posteriormente, avanza hacia la parte alta de la cuenca donde los relictos de bosque permiten tener hábitats cuyos valores de carbono almacenado y escorrentía son elevados que aumentan la importancia del criterio VEP, lo que facilita la selección de pixeles en esta zona.

A continuación, en la Figura 4-2, serán presentados las imágenes finales de cada uno de los casos señalados en la tabla 4-2, con la finalidad de mostrar la tendencia de selección de áreas de conservación, conforme alfa, varía de cero (0) a uno (1), caso en el que se le atribuye toda la importancia al criterio de conectividad, sin tomar en cuenta el criterio VEP.

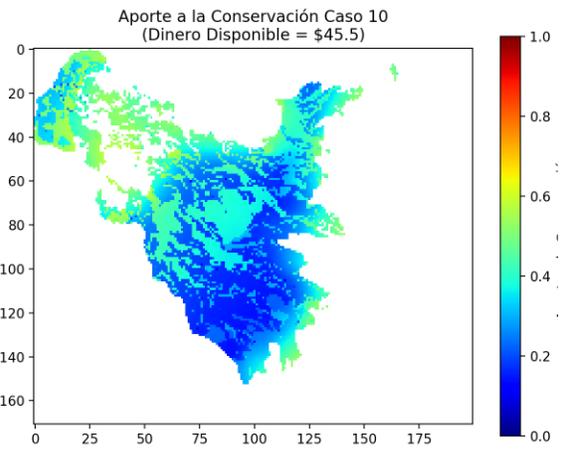
Figura 4-2: Evolución de la selección de áreas de conservación según variación de α desde 0 hasta 1.



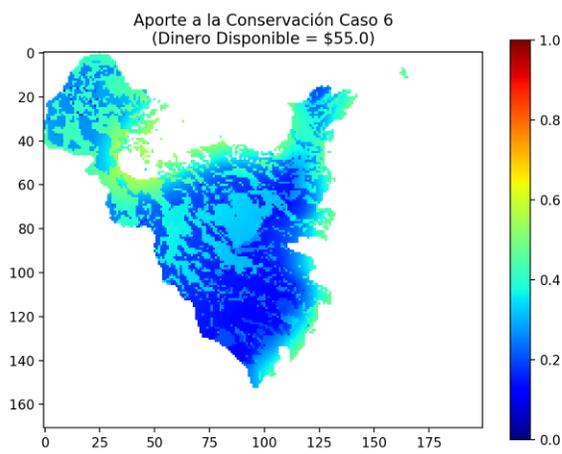
$\alpha = 0.33$



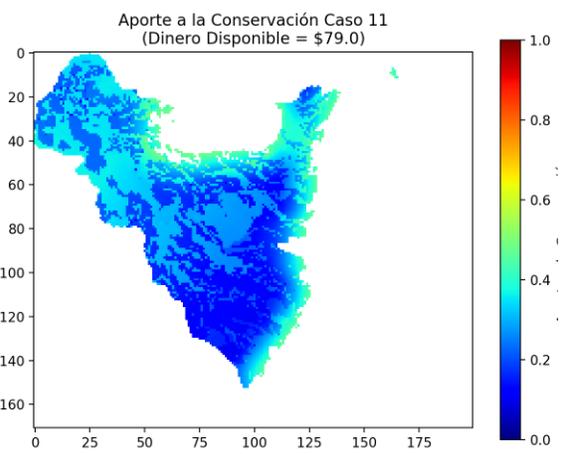
$\alpha = 0.42$



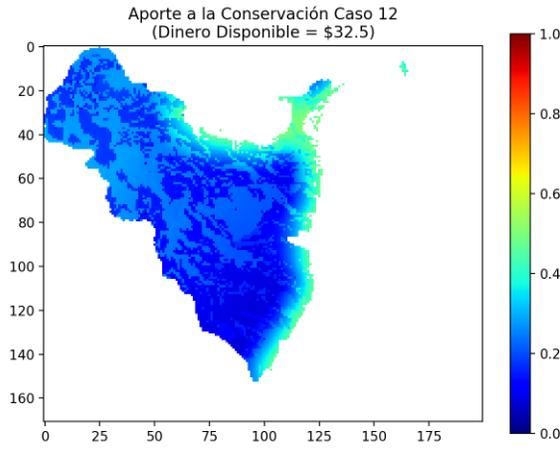
$\alpha = 0.50$



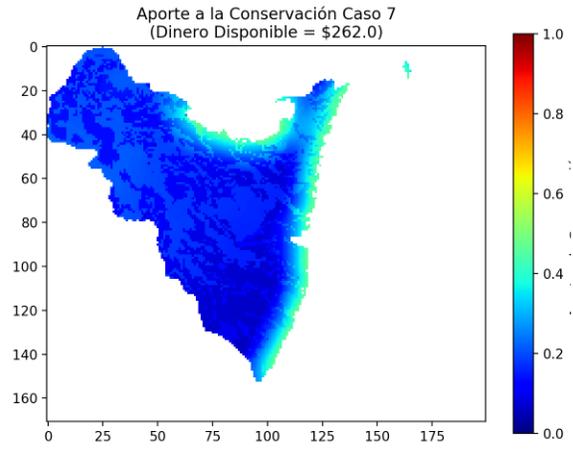
$\alpha = 0.58$



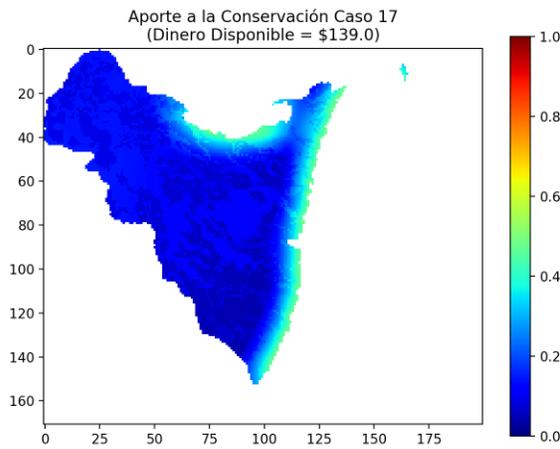
$\alpha = 0.67$



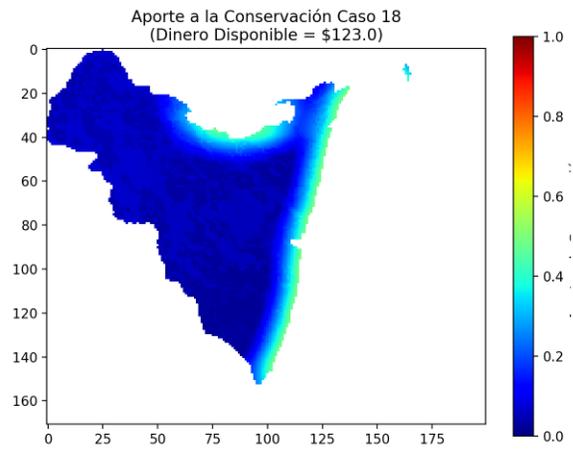
$\alpha = 0.75$



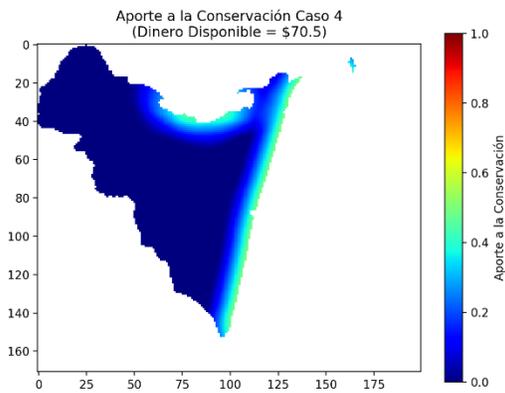
$\alpha = 0.83$



$\alpha = 0.92$



$\alpha = 1$



Fuente: Elaboración propia

Inicialmente, con α igual a 0, se evidencia la selección de píxeles cuyo VEP es alto, ubicado en el extremo superior izquierdo de la cuenca del río Claro, esta selección permite la creación de un parche sustancialmente amplio, dentro del área amortiguadora de la cuenca en cuestión, dicho parche tiende a crecer a medida que α toma valores cercanos a 0.5. tal como se evidencia en las imágenes correspondientes a α desde 0.8 hasta 0.42.

En particular para la corrida de $\alpha=0.42$ es interesante desde el punto de vista de las posibilidades de conexión entre la reserva y el PNN Los Nevados dado que se evidencia que, al darle una importancia menor a la proximidad de píxeles, es posible crear parches de mayor tamaño que permitan dicha conectividad.

Cuando los valores de alfa varían entre 0.5 y 1, es posible visualizar como los mapas van mostrando mayores aportes a la conservación en píxeles cuya ubicación esta próxima a cualquiera de las áreas protegidas, ubicadas en la cuenca. Así lo evidencian las imágenes con α 0.75 a 1.

Por su parte los α ubicados entre 0.5 y 0.67, visualizan resultados interesantes, teniendo en cuenta que muestran la posibilidad de conexión entre la reserva forestal y el PNN Los Nevados, dado que a medida que se seleccionan píxeles cercanos al PNN se crea un principio de corredor ubicado en la parte noreste de la cuenca, tal como se muestra cuando α corresponde a 0.67; esto demuestra que además de que el algoritmo revisa VEP y conectividad, tiene posibilidades de crear áreas de conservación útiles y de importancia ecosistémica.

4.3 Análisis de sensibilidad

Se presenta el análisis de sensibilidad realizado alrededor del caso 6, cuyos parámetros corresponden a un radio de 15 píxeles, sabiendo que el tamaño del pixel es de 1 hectárea, las ponderaciones de los criterios del VEP son 0.22 para almacenamiento de carbono, 0.37 para rendimiento hídrico y 0.41 para hábitat.

Para llevar a cabo este análisis se van cambiando los valores de cada parámetro amentando o disminuyendo, con el fin de determinar por comparación, la influencia del parámetro en cuestión sobre los resultados del ejercicio.

En la tabla 4-3 se muestran cada uno de los casos evaluados en el análisis de sensibilidad, sabiendo que sus variaciones en los casos relacionados con las ponderaciones de las variables que forman parte del VEP (almacenamiento de carbono, recurso hídrico y hábitat) se definieron así:

- Se seleccionó para cada variable el mayor y menor valor suministrado por el grupo de expertos, ver tabla 2-10.
- Las ponderaciones las otras dos variables que hacen parte del VEP se determinaron de forma que se mantuviera la proporcionalidad entre los factores, cuidando que la suma de las tres ponderaciones fuera igual a uno.

Tabla 4-3: Casos de estudio del análisis de sensibilidad

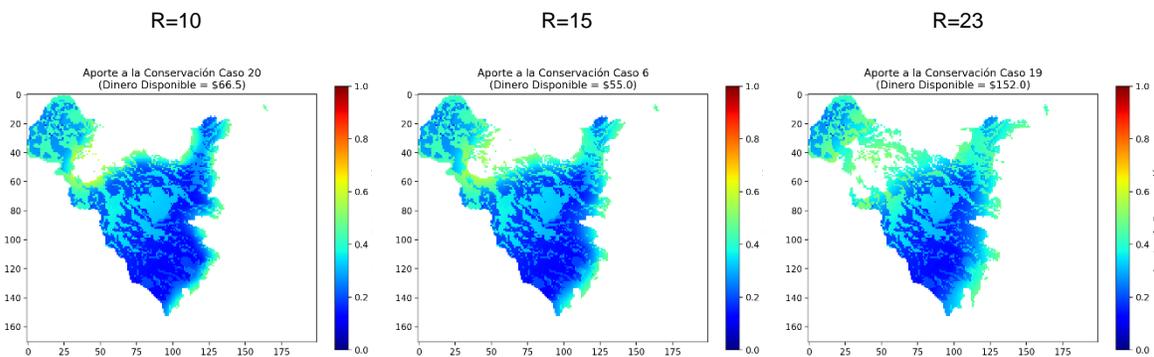
Numero de caso	6	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Radio	15	23	10	15	15	15	15	15	15	15
Alfa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
W1 Almacenamiento de carbono	0,22	0,22	0,22	0,333	0,1	0,3	0,24	0,19	0,24	0,2
W2 Rendimiento hídrico	0,37	0,37	0,37	0,333	0,43	0,33	0,3	0,45	0,4	0,3
W3 Hábitat	0,41	0,41	0,41	0,334	0,47	0,37	0,46	0,36	0,35	0,5
Número de iteraciones	1520	1657	1525	1451	1585	1469	1513	1525	1508	1584

Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Sensibilidad a cambios en el radio

Para estudiar los cambios en el radio, se realizaron las corridas 19 y 20 que se analizaran con respecto a la corrida 6 antes descrita.

Figura 4-3: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en el radio de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Cuando se trabaja con un radio menor (caso 19, $r=10$) se observa que la franja en la que se tiene una influencia de las áreas ya conservadas, sobre la variable de conectividad, disminuye hasta ser igual al radio. Conforme se pasa al caso 6 ($r=15$) y al caso 20 ($r=23$) el ancho de dicha franja crece con el radio, ampliando la influencia de las áreas ya conservadas sobre las áreas de análisis.

Es visible que la dirección de los pixeles a conservar va desde la parte noreste donde se ubica a la reserva forestal regional hacia la parte sur oeste de la cuenca donde se presentan mayores valores de almacenamiento de carbono y hábitat.

4.3.2 Sensibilidad a cambios en la ponderación de las variables que conforman el VEP

Este análisis se realizó con el fin de revisar qué tan sensible es el algoritmo de análisis a los cambios en los factores que componen el VEP, frente a los cambios en alfa, previamente analizados en el presente capítulo.

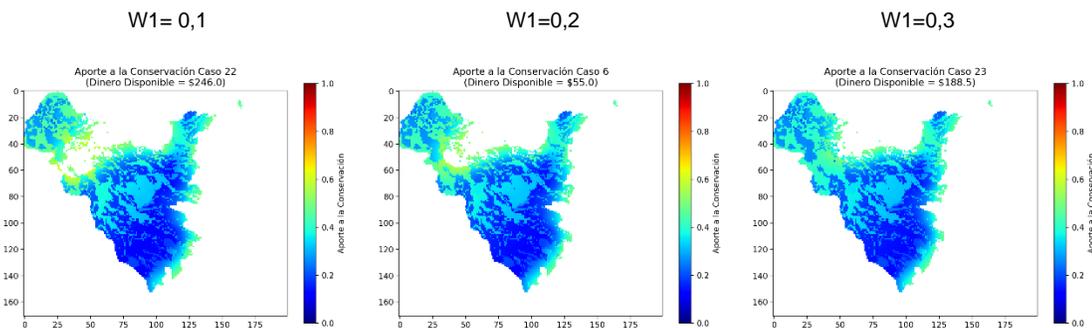
Para este análisis se mantienen fijos los valores de alfa y radio, siendo 0.5 y 15 respectivamente.

- **Almacenamiento de carbono**

Para estudiar la sensibilidad a los cambios en la ponderación del almacenamiento de carbono (W_1), se realizaron las corridas 22 y 23 que al igual que en el anterior análisis se comparan con el caso 6, asumido como el pivote para estos análisis de sensibilidad.

En la figura 4-4 se muestran los resultados que arroja el algoritmo ante las variaciones en las ponderaciones del almacenamiento de carbono (W_1).

Figura 4-4: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones de almacenamiento de carbono



Fuente: Elaboración propia

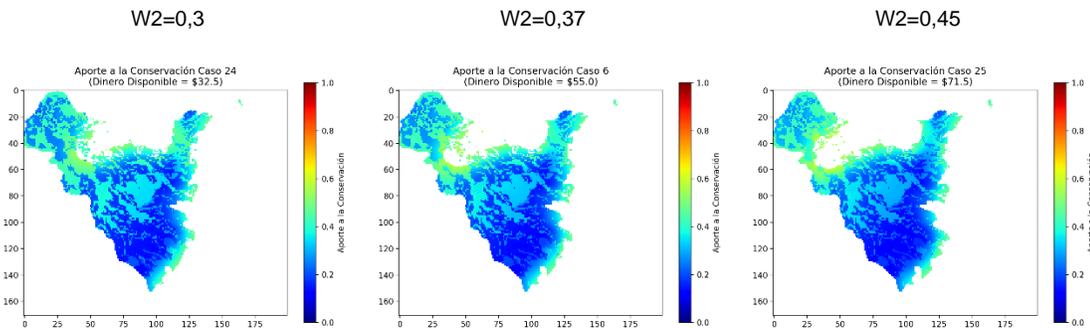
A medida que las ponderaciones asignadas para almacenamiento de carbono aumentan, la formación y crecimiento del parche ubicado en la parte noreste de la cuenca del río Claro, disminuye; esto puede deberse a que la combinación de cambios en las ponderaciones de los factores que conforman el VEP, hace que el algoritmo selecciona pixeles en las cercanías a zonas previamente conservadas.

- **Rendimiento hídrico**

Para estudiar la sensibilidad a los cambios en la ponderación del almacenamiento de carbono (W_2), se realizaron las corridas 24 y 25 que al igual con el anterior análisis se compraran con el caso 6, asumido como el pivote para estos análisis de sensibilidad.

En la figura 4-5 se visualizan los mapas que se generan al aplicar el algoritmo variando las ponderaciones de los factores de VEP, a partir de los máximos y mínimos dados por los expertos para el rendimiento hídrico (W_2).

Figura 4-5: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones de rendimiento hídrico



Fuente: Elaboración propia

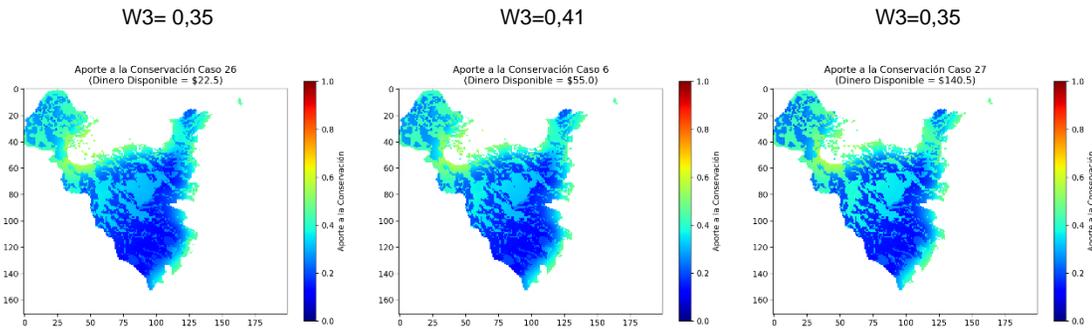
A medida que la ponderación de rendimiento hídrico crece se observa un aumento en la compra de píxeles ubicados en la zona noreste de la cuenca, esto se debe a que en esta ubicación los píxeles presentan valores de escorrentía superficial altos, y al crecer la ponderación correspondiente, sube por consiguiente su VEP.

- **Hábitat**

Para estudiar la sensibilidad a los cambios en la ponderación del almacenamiento de carbono (W_3), se realizaron las corridas 26 y 27 que al igual con el anterior análisis se compraran con el caso 6, asumido como el pivote para estos análisis de sensibilidad.

En la figura 4-6 se muestran los mapas generados a partir de las variaciones en las ponderaciones de los factores de VEP, basadas en las ponderaciones máximos y mínimos dadas por los expertos para el hábitat (W_3).

Figura 4-6: Análisis de sensibilidad evaluando variaciones en las ponderaciones del Hábitat



Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en los mapas la compra de pixeles inicia desde la parte noreste de la cuenca, donde se ubica la reserva regional, hacia la parte sureste de la misma, coincidiendo esa ubicación con las zonas donde se ubican pixeles cuya calidad de hábitat es alta, y teniendo que en el desarrollo de esta investigación se identificó una correlación entre los recursos de hábitat y almacenamiento de carbono, es posible deducir que los pixeles comprados también presentan valores de almacenamiento de carbono altos.

Al comparar las variaciones en los resultados debidas a la sensibilización de las variables de radio y las ponderaciones de almacenamiento de carbono, rendimiento hídrico y hábitat (Casos desde 19 hasta 27) con los resultados obtenidos al variar el parámetro alfa desde 0 hasta 1 se ve claramente, que las variaciones en resultados debidos a los cambios en este último son mucho más significativas que las halladas en este análisis de sensibilidad.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En el desarrollo de esta investigación se conceptualizó, desarrolló y probó en un caso de estudio, un algoritmo que permite la selección de áreas destinadas para la conservación, teniendo en cuenta criterios de conectividad y de valor ecológico de cada pixel (VEP), sujeto esto, a la disponibilidad de recursos económicos. Dicho algoritmo puede ser una herramienta importante a la hora de definir áreas de conservación asociadas a proyectos de desarrollo, de tal manera que los recursos destinados a la preservación de la biodiversidad, asignados para este fin, por el cumplimiento de las obligaciones expuestas en el Decreto 2099 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016), maximicen el aporte a la conservación de los terrenos seleccionados.

La integración de sistemas para la resolución del problema planteado inicialmente demuestra como la interdisciplinariedad de técnicas y conocimientos contribuyen a formar una visión holística de determinada situación, tal como sucedió en esta investigación donde a partir de información de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fue posible generar resultados intermedios, que sirven de entrada a un algoritmo de solución, mejorando la integralidad con la que la zona en estudio fue analizada.

Cuando se varía la importancia dada a la conectividad o al valor ecológico del pixel (VEP), tal como muestran los resultados obtenidos, las diferentes son muy marcadas en el caso de estudio, evidenciando con esto, la necesidad de contar con un algoritmo que los integre y permita la generación de alternativas de áreas para la conservación, en las que prime un criterio o el otro; o que se mezclen con ponderaciones similares. Esto confirma una de las motivaciones iniciales de la realización de esta investigación, que consistía en evidenciar que las áreas dedicadas a la conservación diferirían en gran medida al tomar uno u otro criterio ambiental.

Luego de realizarse el análisis de sensibilidad, es posible deducir que el algoritmo desarrollado en la presente metodología es más sensible ante los cambios en los valores de alfa, que a los correspondientes a las ponderaciones de los factores que hacen parte del Valor Ecológico del Pixel (VEP).

5.2 Cumplimiento de objetivos

A continuación, se explica cómo esta investigación, desarrollada con el fin de acceder al título de magister en Medio Ambiente y Desarrollo, cumplió con los objetivos previamente establecidos.

5.2.1 Objetivos específicos

- **Identificar un grupo de criterios que determinen aportes a la conservación, provenientes de cada una de las dimensiones ambientales, reconociendo sus parámetros y variables.**

Los criterios ambientales identificados corresponden a la conectividad y el factor VEP, determinados a partir múltiples revisiones de literatura se concluyó, que, se debía escoger criterios relacionados con biodiversidad y aspectos de funcionalidad y estructura de ecosistemas para la selección de áreas de conservación, integrándolos dentro de una misma ecuación, con el fin de realizar una toma de decisiones más holística al respecto.

Dentro del VEP se contemplan 3 parámetros tal como se expresa en la ecuación 2.4; el almacenamiento de carbono, el rendimiento hídrico y el hábitat, en los que a su vez fueron identificadas variables que permitieron su cálculo.

- **Definir una metodología georreferenciada de agregación de los aportes a la conservación de cada uno de los criterios seleccionados.**

Esta metodología se evidencia en la figura 2-2, en donde se representa el paso a paso llevado a cabo para la producción de los mapas de entrada, necesarios para que el algoritmo de solución funcione.

- **Desarrollar algoritmos y procedimientos para generar áreas de conservación óptimas, sujetas a restricciones en los recursos financieros disponibles.**

Dicho algoritmo corresponde a lo dispuesto en las ecuaciones 2.3 y 2.4 las cuales definen la forma en la que el algoritmo de solución fue creado, buscando aplicar estas operaciones en cada uno de los pixeles de la zona de análisis, incluyendo como criterio de análisis los costos de la tierra, presentados en la tabla 2-2, para la cuenca del río Claro.

5.2.2 Objetivo General

- **Formular una metodología que permita seleccionar áreas y programas de conservación teniendo en cuenta localizaciones geográficas, condiciones ambientales y costos de implementación**

La metodología desarrollada en esta investigación se explica en el capítulo 2 e incluye la generación de material cartográfico de entrada y las iteraciones de selección de píxeles para la conservación en cada una de las iteraciones dadas una vez se corre el algoritmo de solución. La comprobación de esta metodología se desarrolla a lo largo del capítulo 3.

5.3 Recomendaciones

Dentro de los estudios complementarios que pueden mejorar los resultados de esta investigación se resaltan metodologías que permitan identificar, valorar y jerarquizar criterios ambientales relacionados con la biodiversidad de un área, así como la determinación de índices de proximidad que sean fácilmente calculables, que a su vez se relacionen con la conectividad de parches.

El algoritmo desarrollado en la presente investigación es aplicable para evaluar el desarrollo de programas diferentes a la conservación mediante la compra de terrenos, para tal fin, el mapa de costos, que corresponde a uno de los mapas de entrada, debe elaborarse con base en los costos de implementación del programa deseado, en cada píxel en particular.

Si bien, los resultados obtenidos como recomendaciones para definición de áreas de conservación de proyectos de desarrollo, en la zona de amortiguación del PNN Los Nevados, son indicativos, pueden complementarse y refinarse mediante un análisis más detallado del comportamiento ecológico particular de la zona.

Es de especial importancia entender a profundidad el ciclo hidrológico en alta montaña, para el caso de estudio, dado que en este influyen fenómenos como la precipitación horizontal y sólida, el almacenamiento de agua en forma de paquetes de nieve y glaciares y el posterior derretimiento de esta en las épocas de verano; ya que dichos fenómenos tienen importancia en el PNN Los Nevados. Si bien la zona de estudio está por fuera de esta zona protegida, recibe los afluentes que nacen el mismo y por tanto estos fenómenos pueden tener incidencia en la variable referida a rendimiento hídrico.

A. Anexo: Encuesta Académica

26/5/2018

Tesis de Maestría de Medio Ambiente y Desarrollo. "Selección de áreas estratégicas para conservación en proyectos de desarrollo"

Tesis de Maestría de Medio Ambiente y Desarrollo. "Selección de áreas estratégicas para conservación en proyectos de desarrollo"

La presente encuesta esta dirigida a expertos en el manejo de recursos naturales, sus fines son netamente académicos y serán usados para el desarrollo de la tesis antes enunciada, la cual está a cargo de Lorena Tatiana Cortés Izquierdo, cuyo correo es lcortesi@eia.edu.co

Selección de áreas de conservación

Para la compra de áreas destinadas a la conservación, determine el aporte a la biodiversidad, desde el punto de vista de calidad del habitat; de las siguientes coberturas de la tierra. Tenga en cuenta que el sitio de análisis corresponde a la cuenca del río Claro que a su vez, hace parte de la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados.

1 corresponde al valor más bajo mientras, que 10 corresponde al valor más alto. Seleccione un solo valor para cada cobertura. *

Selecciona todos los que correspondan.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cultivos Transitorios	<input type="checkbox"/>									
Pastos	<input type="checkbox"/>									
Bosques	<input type="checkbox"/>									
Áreas con vegetación herbácea	<input type="checkbox"/>									
Áreas con vegetación arbustal	<input type="checkbox"/>									
Vegetación secundaria en transición	<input type="checkbox"/>									
Áreas húmedas continentales (Turberas y zonas pantanosas)	<input type="checkbox"/>									
Plantación forestal de producción	<input type="checkbox"/>									
Zonas abiertas con o sin vegetación (Zonas arenosas naturales, afloramientos rocosos y zonas glaciares y nivales)	<input type="checkbox"/>									
Aguas Continentales (Lagunas, lagos y ciénagas)	<input type="checkbox"/>									

Ponderación de los criterios ambientales en la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados

Para la estimación del aporte a la conservación se hará uso de tres criterios ambientales: almacenamiento de carbono, rendimiento hídrico y biodiversidad. Por favor, asigne la ponderación a cada uno de los tres criterios, expréselos en porcentaje y asegúrese que su suma de 100%.

1. Almacenamiento carbono: Dada su importancia en los ciclos de nutrientes y su aporte a la mitigación de los efectos del cambio climático en una zona. *

2. Rendimiento Hídrico: Entendido como la distribución de agua en un territorio. *

3. Biodiversidad: Referida a la conservación del hábitat y los beneficios que esto aporta a las especies y las sociedades humanas. *

B. Anexo: Almacenamiento de Carbono

Estimación de biomasa superficial a partir de ecuaciones alométricas

Considerando que en la cuenca del río Claro no se encontró información de biomasa de las coberturas para estimar el carbono, se lograron conseguir datos de inventarios forestales, compilados por varios investigadores que estudian el carbono forestal en Colombia para las coberturas con vegetación arbórea (bosque denso/abierto, pastos enmalezados, plantación forestal y vegetación secundaria o en transición) y arbustiva (arbustal). Estos datos provienen de 32 parcelas establecidas en diferentes altitudes de las cuencas de los ríos Quindío y Chinchiná, cercanas a la cuenca del río Claro (Restrepo et al. 2015; Álvarez et al. en revisión).

Para la estimación de la biomasa superficial se utilizaron ecuaciones alométricas, publicadas en Alvarez, et al., (2012), de acuerdo con el tipo de vegetación y la altitud. Las ecuaciones alométricas relacionan variables físicas de los árboles tales como diámetro, altura y densidad de la madera para estimar la biomasa superficial total.

Tabla 5-1: Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa (Alvarez, et al., 2012)

Altitud (msnm)	Tipo de Bosque	Ecuación Alométrica
1.000-2.000	Premontano húmedo	$AGB = \exp(1.960 - (1.098 \ln(DBH)) + (1.169(\ln(DBH))^2) - (0.122(\ln(DBH))^3) + (1.061 \ln(WD)))$
2.000-3.000	Montano bajo húmedo	$AGB = \exp(1.836 - (1.255 \ln(DBH)) + (1.169(\ln(DBH))^2) - (0.122(\ln(DBH))^3) - (0.222 \ln(WD)))$
3.000-	Montano húmedo	$AGB = \exp(3.130 - (1.536 \ln(DBH)) + (1.169(\ln(DBH))^2) - (0.122(\ln(DBH))^3) + (1.767 \ln(WD)))$

AGB es la biomasa superficial, DBH se refiere al diámetro a la altura del pecho y WD es la densidad de la madera. Luego de tener los datos de biomasa superficial se multiplicó por un factor de 0,5 según el procedimiento establecido por el IPCC para hallar el contenido de carbono en la biomasa (IPCC, Forest Land, 2003). Por último, se hizo la homologación de

las parcelas de los estudios mencionados a las coberturas de la cuenca del río Claro teniendo en cuenta coincidencias en la altitud y la cobertura vegetal específica.

Estimaciones de biomasa subterránea a partir de relaciones raíces – biomasa superficial

La estimación de la biomasa subterránea de las coberturas con vegetación arbórea y arbustiva del numeral anterior se realizó a partir de los datos de biomasa superficial según el estudio de Cairns, Brown, Helmer, & Baumgardner (1997) donde se propone la siguiente ecuación (1) para calcular la biomasa radicular, a partir de la biomasa superficial (BA).

$$Br = \exp(-1,0587 + 0,8836 \ln BA)$$

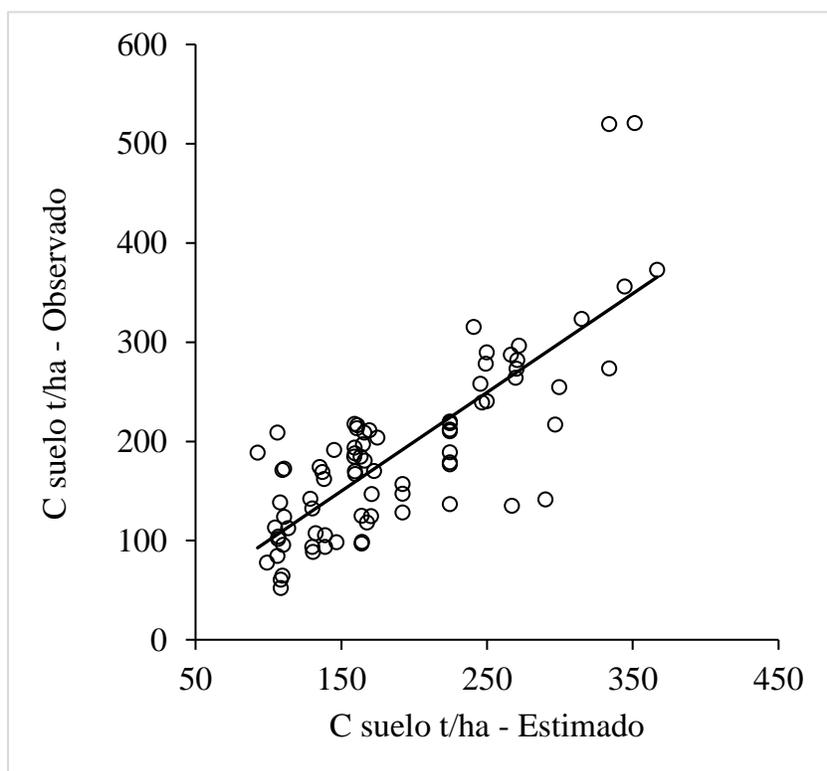
Este método es el recomendado por el IPCC y el proyecto REDD en Colombia (Yepes et al. 2011).

Estimación de carbono en el suelo a partir de valores de precipitación y temperatura

Dada la falta de información y estudios de almacenamiento de carbono en el suelo en los trópicos, se usó la información de una investigación en proceso, sin publicar, de Esteban Álvarez-Dávila. La investigación de Álvarez-Dávila recopiló información de estudios que reportaran datos de carbono en el suelo hasta una profundidad de 1 m, en un amplio gradiente de altitud (10 a 4.250 msnm), precipitación (900 a 5.800 mm/año) y tipos de vegetación (bosques primarios y secundarios, pastos, cultivos y vegetación de páramo conservada y perturbada), en Colombia (Zúñiga et al. 2013; Moreno et al. 2008; Montes-Pulido et al. 2016), Ecuador (Rhoades et al. 2001) y Costa Rica (Cifuentes-Jara 2008). A partir de estos datos se construyó un modelo de regresión múltiple, con la precipitación y la temperatura como variables predictoras que arrojó el siguiente resultado (ecuación 2, ver estadísticos del modelo en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

$$\text{Carbono en el suelo } \left(\frac{t}{ha}\right) = 45.31 + 0.064 * \text{Altitud} + 0.028 * \text{Precipitación}$$

Figura 5-1: Relación entre el carbono en el suelo estimado con el modelo y el observado en los estudios (Tomado de investigación en proceso de Álvarez-Dávila)



Considerando que el modelo explica solo el 61,4 % en la variación en el carbono del suelo los resultados tienen una alta incertidumbre. Sin embargo, se considera que esta es la mejor opción dada la escasez de datos sobre el carbono en el suelo en los bosques tropicales. Estos datos y los resultados presentados fueron utilizados con la autorización de Álvarez-Dávila.

Este método se aplicó para calcular el almacenamiento de carbono en el suelo para las coberturas de vegetación arbórea y arbustiva. Se utilizó la altitud como proxy de la temperatura y los datos de precipitación propios de la cuenca. Una limitación importante que hay que mencionar es que este modelo no considera el efecto de la vegetación propia de cada cobertura para estimar el contenido de carbono almacenado en el suelo ya que depende únicamente de las variables de precipitación y temperatura.

Este anexo fue copiado de forma literal de la tesis desarrollada por Cárdenas (2016)

C. Anexo: Código Python del algoritmo de solución

```
# Coded by Daniel González Duque
# Last revised 12/02/2018

# DESCRIPCIÓN:
# En este código se pretende seleccionar los píxeles que tienen mayor aporte
# a la conservación dentro de una restricción de disponibilidad financiera.

# -----
# Se importan las librerías
# -----

# Librerías del sistema
import sys

import glob as gl

# Librerías de manipulación de datos
import numpy as np

import xlswriter as xlsxl

import scipy.io as sio

import matplotlib.pyplot as plt

import matplotlib
```

```
from matplotlib.ticker import MultipleLocator, FormatStrFormatter

from mpl_toolkits.axes_grid1 import make_axes_locatable

from mpl_toolkits.basemap import Basemap

import matplotlib.pyplot as plt

from numpy import linspace

from numpy import meshgrid

from math import sqrt

# Librerías de extracción de datos

import netCDF4 as nc

from pyproj import Proj, transform

# Data Analysis

from scipy.stats import pearsonr

# Time

from datetime import date,datetime,timedelta

import time

# -----

# Librerías Personales

# -----

sys.path.append('03_Codes/01_Python_Codes/00_Libraries/')

from Utilities import Data_Man as DM

from Utilities import Utilities as utl

from EMSD.Dates.DatesC import DatesC
```

```
from Hydro_Analysis import Hydro_Analysis as HA;

from Hydro_Analysis import Hydro_Plotter as HyPl; HyPl=HyPl()

from GeoF.GeoF import GeoF

from GeoF.GeoTIFF import Functions as GFF
```

```
# -----

# Funciones

# -----

def Dist(i,j,ii,jj):

    """

    DESCRIPTION:

    """

    return sqrt((ii-i)**2+(j-jj)**2)
```

```
def Pixels(r):

    Puntos = 0

    Medio = int((r*2)/2)

    for i in range(0,(r*2)+1):

        for j in range(0,(r*2)+1):

            if Medio == i and Medio == j:
```

```

        continue

    else:

        D = Dist(Medio,Medio,i,j)

        if D > r:

            continue

        else:

            Puntos += 1

return Puntos

```

```

def Connectivity(EA,Puntos,Busqueda=None):

```

```

    """

```

```

    """

```

```

    # Cálculo de conectividad

```

```

    # Se recorren las Filas

```

```

    if Busqueda is None:

```

```

        Busqueda = EA

```

```

    Conec = np.zeros(Busqueda.shape)

```

```

    Conec[Busqueda == 1] = np.nan

```

```

    Conec[np.isnan(Busqueda)] = np.nan

```

```

    for i in range(Busqueda.shape[0]):

```

```

        # Se recorren las columnas

```

```

        for j in range(Busqueda.shape[1]):

```

```

            if Busqueda[i,j] != 1 and not(np.isnan(Busqueda[i,j])):

```

```
imin = i-r
imax = i+r
jmin = j-r
jmax = j+r
if imin < 0:
    imin = 0
if jmin < 0:
    jmin = 0
if imax >= Busqueda.shape[0]:
    imax = Busqueda.shape[0]-1
if jmax >= Busqueda.shape[1]:
    jmax = Busqueda.shape[1]-1
N = 0 # Puntos con valor de 1
x = np.where(EA[imin:imax+1,jmin:jmax+1] == 1)[0]
if len(x)>0:
    for ii in range(imin,imax+1):
        for jj in range(jmin,jmax+1):
            if i == ii and j == jj:
                continue
            else:
                D = Dist(i,j,ii,jj)
                if D > r:
                    continue
```

else:

if EA[i,j] == 1:

N += 1

Conec[i,j] = N/Puntos

return Conec

def AporteCon(alpha,Conec,SE):

'''

'''

AC = (Conec*alpha)+(SE*(1-alpha))

return AC

def ServiciosEcosistemicos(CA,EscA,VB,b1=0.2,b2=0.3,b3=0.5):

'''

DESCRIPTION:

Función para calcular los servicios ecosistémicos a partir
de los mapas de captura de carbono, escorrentía y biodiversidad.

INPUT:

:param CA: A ndarray, Captura de carbono.

:param EscA: A ndarray, Escorrentía superficial de la cuenca.

:param VB: A ndarray, Biodiversidad de la cuenca.

:param b1: a float, parámetro que acompaña a la captura de carbono.

:param b2: a float, parámetro que acompaña a la escorrentía.

:param b2: a float, parámetro que acompaña a la biodiversidad.

OUTPUT:

:return SE: A ndarray, Servicios ecosistémicos.

'''

if b1+b2+b3 != 1.0:

 raise ValueError('La sumatoria de los b deben ser iguales a 1')

Se escalan los valores de escorrentía

EscAE = (EscA-np.nanmin(EscA))/(np.nanmax(EscA)-np.nanmin(EscA))

Se escalan los valores de Carbono

CAE = (CA-np.nanmin(CA))/(np.nanmax(CA)-np.nanmin(CA))

Se calculan los parámetros

SE = b1*CAE+b2*EscAE+b3*VB

return SE

def Graph(Map,Title,PathImg,Name,vmin=None,vmax=None,CbarName='Aporte a la Conservación'):

 plt.figure()

 plt.imshow(Map,cmap='jet',vmax=vmax,vmin=vmin)

 cbar = plt.colorbar()

```
cbar.set_label(CbarName)

plt.title(Title)

plt.tight_layout()

plt.savefig(PathImg+Name+'.png',format='png',dpi=200)

plt.close('all')
```

```
# -----
```

```
# Rutas
```

```
# -----
```

```
PathData = '02_Data/01_Tif/01_Maps/'
```

```
Pathout = '02_Data/01_Tif/02_Results/'
```

```
# -----
```

```
# Constantes y variables importantes
```

```
# -----
```

```
# Se cargan los mapas de Servicios ecosistémicos
```

```
MapsNameSE = ['carbono_area.tif','esc_area.tif','val_bio.tif']
```

```
MapsLabSE = ['CA','EscA','VB']
```

```
SEMaps = [PathData+'01_SE/'+i for i in MapsNameSE]
```

```
MapsName = ['estado_actual.tif','mapa_muestra.tif','val_costos.tif']
```

```
MapsLab = ['EA','Busq','VC']
```

```

Maps = [PathData+i for i in MapsName]

# -----

# Datos

# -----

MapsSE = dict()

for iF,F in enumerate(SEMaps):

    GF = GeoF()

    GF.OpenGeoTIFFData(F)

    GF.Data['Data'][GF.Data['Data']<-100] = np.nan

    MapsSE[MapsLabSE[iF]] = GF.Data

    print(MapsLabSE[iF],GF.Data['Data'].shape)

```

```

MapsEA = dict()

for iF,F in enumerate(Maps):

    GF = GeoF()

    GF.OpenGeoTIFFData(F)

    GF.Data['Data'][GF.Data['Data']<-100] = np.nan

    MapsEA[MapsLab[iF]] = GF.Data

    print(MapsLab[iF],GF.Data['Data'].shape)

```

```

# -----

# Constantes

# -----

```

Parámetros de servicios ecosistémicos

b1=0.22

b2=0.37

b3=0.41

Radio

Corrida = '18'

r = 15

Puntos = Pixels(r)

alpha = 0.92

Fondo = 4500

vmax = 1

Guardado = 100

Tamaño de pixel

Pixel = MapsEA['VC']['latitude'][0]-MapsEA['VC']['latitude'][1]

Rutas

PathImg = '04_Images/02_Calculos/02_CorridasMaps/'+Corrida+'/'

ConPath = PathImg+'02_Con/'

utl.CrFolder(ConPath)

ACPath = PathImg+'01_AC/'

utl.CrFolder(ACPath)

ACPathout = Pathout+Corrida+'/'+'01_AC/'

```

# Servicios ecosistémicos

# -----

# Se calcula los servicios ecosistémicos

SE =
ServiciosEcosistemicos(MapsSE['CA']['Data'],MapsSE['EscA']['Data'],MapsSE['VB']['Data'],
    b1=b1,b2=b2,b3=b3)

# -----

# Function

# -----

a = time.time()

Conec = Connectivity(MapsEA['EA']['Data'],Puntos,Busqueda=MapsEA['Busq']['Data'])

AC = AporteCon(alpha,Conec,SE)

# Se grafican los mapas iniciales

# Graph(Conec,'Conectividad (Dinero =
    $%s)%(round(Fondo,3)),ConPath,'Conec_0000',vmin=0,vmax=1)

Graph(AC,u'Aporte a la Conservación Caso %s\n(Dinero Disponible =
    $%s)%(int(Corrída),round(Fondo,3)),
    ACPath,'AC_0000',vmin=0,vmax=1,CbarName=u'Aporte a la Conservación')

# Mapa de Costos

CT = MapsEA['VC']['Data']

EA = MapsEA['EA']['Data']

Busq = MapsEA['Busq']['Data']

Res = MapsEA['Busq']['Data'].copy()

```

```

b = time.time()-a

print('\nTiempo lter: %s'%(b))

GFF.GeoTIFFSave(AC,GF.Data['geoTrans'],Projection=GF.Data['Prj'],Name='AC_0000',P
athout=ACPathout)

a = time.time()

F = 0

i = 1

ii = 1

iii = Guardado

while F <= Fondo:

    maxAC = np.nanmax(AC)

    xmaxAC = np.where(AC==maxAC)

    minCT = np.nanmin(CT[xmaxAC])

    F += minCT*(Pixel/100)**2

    if F > Fondo:

        break

    xminCT = np.where(CT[xmaxAC]==minCT)

    EA[xmaxAC[0][xminCT[0]],xmaxAC[1][xminCT[0]]] = 1

    Busq[xmaxAC[0][xminCT[0]],xmaxAC[1][xminCT[0]]] = np.nan

    Res[xmaxAC[0][xminCT[0]],xmaxAC[1][xminCT[0]]] = ii

    print('->Iteracion: %02d' %(ii))

    print(' Fondo:',Fondo-F)

```

```

b = time.time()-a

print(' Tiempo Recorrido: %s' %(b))

Conec = Connectivity(EA,Puntos,Busqueda=Busq)

AC = AporteCon(alpha,Conec,SE)

if ii == iii:

    Graph(AC,u'Aporte a la Conservación Caso %s\n(Dinero Disponible =
    $%s)'%(int(Corrída),round(Fondo-F,3)),

        ACPath,'AC_%04d' %(i),vmin=0,vmax=1)

    # Graph(Conec,'Conectividad (Dinero = $%s)'%(round(Fondo-
    F,3)),ConPath,'Conec_%04d' %(i),vmin=0,vmax=1)

    i+=1

    iii += Guardado

if ii == 1000:

GFF.GeoTIFFSave(Res,GF.Data['geoTrans'],Projection=GF.Data['Prj'],Name='AC_%04d'
%(ii),Pathout=ACPathout)

ii += 1

b = time.time()-a

print('\nTiempo Iter: %s'%(b))

```

```
GFF.GeoTIFFSave(Res,GF.Data['geoTrans'],Projection=GF.Data['Prj'],Name='AC_%04d'  
%(ii),Pathout=ACPathout)
```

Bibliografía

- Ángel, E. (2004). *Metodos cuantitativos para la toma de decisiones*. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAAahUKEwjgp7qjxf3IAhXHLyYKHR7uAtU&url=http://intranet.minas.medellin.unal.edu.co/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=2170&Itemid=285&usg=AFQjCNF8GXiPfy
- Ángel, E., Ortega, S., Ruiz, D., González, D., Cardona, S., Parra, A., ... Sanchez, J. (2016). *GENERACIÓN DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PROYECTO DE I + D INFORME FINAL – COMPONENTE ECOSISTEMAS UNIVERSIDAD EIA*.
- Ángel, E., Ruiz, D., Veléz, R., Álvarez, S., & Cortés, L. (2018). *Definición de línea base de cambio y variabilidad climática, recurso hídrico y biodiversidad en el PNN Nevados y sus áreas circundantes*.
- Bert, Ogunlade, Coninck, Loos, & Meyer. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Director* (Vol. 17). <https://doi.org/10.3145/epi.2008.jul.13>
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., Da Fonseca, G. A. B., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., ... Rodrigues, A. S. L. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783), 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.1127609>
- Cárdenas, J. P. (2016). APLICABILIDAD DEL SOFTWARE InVEST PARA EL MAPEO DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS : CASO CUENCA ALTA DEL RÍO CLARO AUTOR : Juan Pablo Cárdenas Álvarez Trabajo de grado para optar al título de : Ingeniero Ambiental DIRECTORA : Martha Isabel Posada Posada - MSc .
- Castaño-Villa, G. J. (2006). Áreas Protegidas, Criterios Para Su Selección Y Problemáticas En Su Conservación *. *Boletín Científico - Centro de Museos - Museo de Historia Natural*, 10, 79–102.
- Chen, L. ling, & Hui, C. (2009). Habitat destruction and the extinction debt revisited: The Allee effect. *Mathematical Biosciences*, 221(1), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2009.06.003>
- Congreso Nacional de Colombia. (1951). LEY 4 DE 1951.
- Congreso Nacional de Colombia. (1959). Ley 2 de 1959.
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Salicrup, D. R. P. (2016a). Habitat connectivity in biodiversity conservation. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 7–37. <https://doi.org/10.1177/0309133315598713>
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A., & Salicrup, D. R. P. (2016b). Habitat connectivity in biodiversity conservation. *Progress in Physical Geography*, 40(1), 7–37. <https://doi.org/10.1177/0309133315598713>
- Czech, B. (2002). A transdisciplinary approach to conservation land acquisition. *Conservation Biology*, 16(6), 1488–1497. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01046.x>

- Delfín-Alfonso, Gallina-Tessaro, & López-González. (2014). El hábitat: definición, dimensiones y escalas de evaluación para la fauna silvestre. *Fauna Silvestre de México: Uso, Manejo y Legislación*, 285–313. Retrieved from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/717/cap13.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación, Abel, G., & Flórez, R. (2018). Lineamientos de política y estrategias para el desarrollo regional sostenible del Macizo Colombiano. *CONPES*, 8–56. Retrieved from <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3915.pdf>
- Echandía, A. (2016). PRESIÓN ANTRÓPICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CLARO : CAMBIOS EN USOS Y COBERTURAS DEL SUELO ANDRÉS FELIPE ECHANDÍA ARBELÁEZ Martha Isabel Posada Posada.
- ESRI. (2018). ¿ Qué es Python ? Información sobre Python.
- FAO Organización para las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. (2018). Secuestro de Carbono en el Suelo. Retrieved from <http://www.fao.org/soils-portal/manejo-del-suelo/secuestro-de-carbono-en-el-suelo/es/>
- Gurrutxaga, M., Lozano, P. J., & del Barrio, G. (2010). GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation*, 18(4), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2010.01.005>
- Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., & Murdiyarsa, D. (2007). The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.014>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1980). *Estudio semidetallado de suelos del Valle geográfico del Río Cauca*. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6993&shelfbrowse_itemnumber=7335
- Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables - INDERENA. (1973). Acuerdo 015 de 1973.
- IPCC. (2012). *Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C_Geo.html
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: informe de síntesis. Quinto informe de evaluación* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., & Noretto, M. D. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*, 23(2), 87–96.
- Knight, A. T., & Cowling, R. M. (2007). Embracing opportunism in the selection of priority conservation areas. *Conservation Biology*, 21(4), 1124–1126. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00690.x>
- Marzluff, J. M., Knick, S. T., Vekasy, T. K. M. S., Schueck, L. S., & Zarriello, T. J. (1997). Spatial use and habitat selection of golden eagles in southwestern Idaho. *Auk*, 114(4), 673–687. <https://doi.org/10.2307/4089287>

- Mendel, L. C., & Kirkpatrick, J. B. (2016). Society for Conservation Biology Historical Progress of Biodiversity Conservation in the Protected-Area System of Historical Progress of Biodiversity Conservation in the Protected-Area System of Tasmania , Australia, 16(6), 1520–1529.
- Ministerio de Agricultura. (1974). Resolución Ejecutiva No. 148 del 30 de Abril de 1974, (148), 4.
- Ministerio de agricultura y ganadería. (1978). Decreto 1541 de 1978. *Julio 26, 1978*(Julio 26), 48. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1541_de_1978.pdf
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo. (2010). Decreto 2372, 23. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_2372_2010.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Resolución 1517 de 2012 - Manual para la Asignación de Compensaciones por pérdida de biodiversidad. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/gestion_en_biodiversidad/res_1517_310812.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Decreto 2099 De 2016. Retrieved from http://www.andi.com.co/Uploads/DECRETO_2099_DEL_22_DE_DICIEMBRE_DE_2016.pdf
- Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible. (2013). Decreto 0953, 1–8.
- Ministerio del Medio Ambiente. Ley 99 De 1993, Diario Oficial § (1993). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Molina, A., Govers, G., Poesen, J., Van Hemelryck, H., De Bièvre, B., & Vanacker, V. (2008). Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area. *Geomorphology*, 98(3–4), 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.025>
- Morrone, J. J. (2006). La importancia de los atlas biogeográficos para la conservación de la biodiversidad. *Cirug*, 79(1), 3–9. [https://doi.org/10.1016/S0009-739X\(06\)70807-7](https://doi.org/10.1016/S0009-739X(06)70807-7)
- Nicholson, E., Westphal, M. I., Frank, K., Rochester, W. A., Pressey, R. L., Lindenmayer, D. B., & Possingham, H. P. (2006). A new method for conservation planning for the persistence of multiple species. *Ecology Letters*, 9(9), 1049–1060. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00956.x>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2010). *Restauración ecológica en páramos del Parque Nacional Natural Los Nevados*. Retrieved from <http://www.youblisher.com/p/42946-Restauracion-ecologica-en-paramos-del-Parque-Nacional-Natural-Los-Nevados/>
- Periódico el Tiempo. (2015). Isagen y japoneses en proyecto de energía geotérmica. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15267155>
- Presidencia de la República de Colombia. (1968). Decreto 2420 de 1968.

- Rouget, M., Cowling, R. M., Lombard, A. T., Knight, A. T., & Kerley, G. I. H. (2006). Designing large-scale conservation corridors for pattern and process. *Conservation Biology*, 20(2), 549–561. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00297.x>
- Sabatini, F. (2000). Reforma de los mercados de suelo en Santiago, Chile: efectos sobre los precios de la tierra y la segregación residencial. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*, XXXVI(77), 49–80. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612000007700003>
- Sánchez, F., García, M., Jaramillo, O., & Verdugo, N. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. *Estudio Nacional Del Agua 2010*, 69. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>
- Sarmiento, M., & López, A. (2014). Hacia un sistema de bancos de hábitat como herramienta de compensación ambiental en Colombia. *Fundepúblico, Documento*, 1–17.
- Soons, M. B., Messelink, J. H., Jongejans, E., & Heil, G. W. (2005). Habitat fragmentation reduces grassland connectivity for both short-distance and long-distance wind-dispersed forbs. *Journal of Ecology*, 93(6), 1214–1225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01064.x>
- Sostenible, M. de A. y D. (2013). Decreto Numero 0953, 1–8.
- Soule, M. E. (2000). Conservation : Tactics for Constant Crisis The Six Classes of Interference and the North-South Distinction, 253.
- Stelzenmüller, V., Breen, P., Stamford, T., Thomsen, F., Badalamenti, F., Borja, Á., ... ter Hofstede, R. (2013). Monitoring and evaluation of spatially managed areas: A generic framework for implementation of ecosystem based marine management and its application. *Marine Policy*, 37(1), 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.04.012>
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., & Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571. <https://doi.org/10.2307/3544927>
- Tilman, D. (1994). Competition and Biodiversity in Spatially Structured Habitats. *Ecology*, 75(1), 2–16.
- Tischendorf, L., & Fahrig, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>
- Valente, R. de O. A., & Vettorazzi, C. A. (2008). Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*, 256(6), 1408–1417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.006>
- Velez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., Barco, J., Cuartas, A., Montoya, M., & Botero, B. (1999). Dsitribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA*, 127.
- Veléz, J., Poveda, G., & Mesa, O. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín.
- Wilson, K. A., McBride, M. F., Bode, M., & Possingham, H. P. (2006). Prioritizing global conservation efforts. *Nature*, 440(7082), 337–340.

<https://doi.org/10.1038/nature04366>