

3 APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA DELIMITACIÓN Y ANÁLISIS DE COBERTURAS VEGETALES INFLUENCIADAS POR MINERÍA Y AGRICULTURA EN EL PÁRAMO DE RABANAL (BOYACÁ-COLOMBIA)

Pablo Andrés Gil-Leguizamón
Dalia Soraya Useche
Diego Fernando Gualdrón Alfonso

3.1 Introducción

En Colombia, los ecosistemas de páramo han experimentado procesos de degradación y disminución de áreas naturales debido al aumento de áreas para la producción agrícola (p ej., la papa); esta situación no es ajena a la complejidad ambiental, biológica y social evidenciada en el páramo de Rabanal (Boyacá) (Vergara-Buitrago et al., 2018); las prácticas agrícolas, han sido fuente de empleo en zonas rurales, lo cual permite la conformación de redes de producción, mercadeo y vinculación a actividades económicas (jornales), que inciden directa y positivamente en el sustento familiar (Fedepapa & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Sin embargo, las prácticas agrícolas inadecuadas (aplicación de agroquímicos al cultivo de papa), la ampliación de la frontera agropecuaria y la minería (p. ej., del carbón), han ocasionado afectación sobre el ecosistema de alta montaña, impactando los recursos naturales agua, aire, suelo, flora, fauna y de manera directa a la población que se abastece de las fuentes hídricas allí existentes (Useche de Vega & Márquez-Girón, 2015).

La economía de los pobladores de áreas naturales depende de la producción convencional de la papa, la cual utiliza productos de síntesis química de manera recurrente, con poca o nula presencia del Estado, el cual debería cumplir una función de control y super-

visión frente al uso de agroquímicos, que afectan la salud humana y ecosistémica. Considerando que un área protegida se caracteriza por ser definida geográficamente, regulada y administrada con el fin de alcanzar objetivos de conservación de acuerdo con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), la reserva forestal protectora del páramo de Rabanal, está bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional - CAR, y cuenta con 2,561.19 he. (Parques Nacionales Naturales, s.f.), de área protegida con uso sostenible de los recursos naturales, por la Resolución 158 de 1992, con sus modificaciones (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2013).

En el Plan de Manejo Ambiental del Macizo del páramo de Rabanal, se plantean 9 objetivos con sus respectivos programas para la conservación de la reserva. En el que acertadamente se tiene en cuenta la producción agropecuaria sostenible y la minería responsable, se observa que el rubro destinado es insuficiente para el trabajo social y ambiental requerido (Corpoboyacá, 2008).

Por su parte, la minería (actividad económica mediante la cual se extraen de la corteza terrestre, diferentes tipos de minerales básicos para la producción), particularmente del carbón, representa otra actividad económica importante en zonas colindantes al área de Rabanal; lo anterior, debido a que, la mayor cantidad de reservas carboníferas del país se encuentran en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, con niveles de producción importantes y con carbón de alto poder calorífico (Grupo De Investigación Xué - Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020).

Alrededor del 80% del carbón extraído se hace de manera ilegal, algunas de estas actividades mineras están en transición hacia la formalidad (Higuera, 2015); según datos del Ministerio de Minas y Energía - MME, solo el 50% de la minería a pequeña escala y el 17% de la minería a mediana escala, cuenta con título minero. Las prácticas de explotación del carbón son en gran parte, inseguras y, ambientalmente insostenibles (Rocha-Suárez, 2018); esta situación, genera conflictos socioambientales como consecuencia derivada de los intereses entre los defensores del medio ambiente

o personas que sufren los efectos de los problemas ambientales generados por esta actividad, realizada en ecosistemas estratégicos vs aquellos gremios mineros.

Por lo anterior, con el propósito aportar en los procesos de planificación, ordenamiento y gestión del territorio a partir de las coberturas de la tierra, se realizó un inventario de las mismas (Prenzel, 2004) y se cuantificó la estructura espacial del páramo de Rabanal a través de métricas de paisaje. Un insumo esencial para este tipo de mapeo, son las imágenes satelitales; estas permiten interpretar de manera espacial y temporal los fenómenos ambientales. En este contexto, la tecnología geoespacial, se convierte en una herramienta ideal para adquirir elementos científicos para la investigación de las coberturas de tierra y los impactos sobre las áreas naturales por uso del suelo (García-Pardo et al., 2022).

3.2 Metodología

3.2.1 Área de Estudio

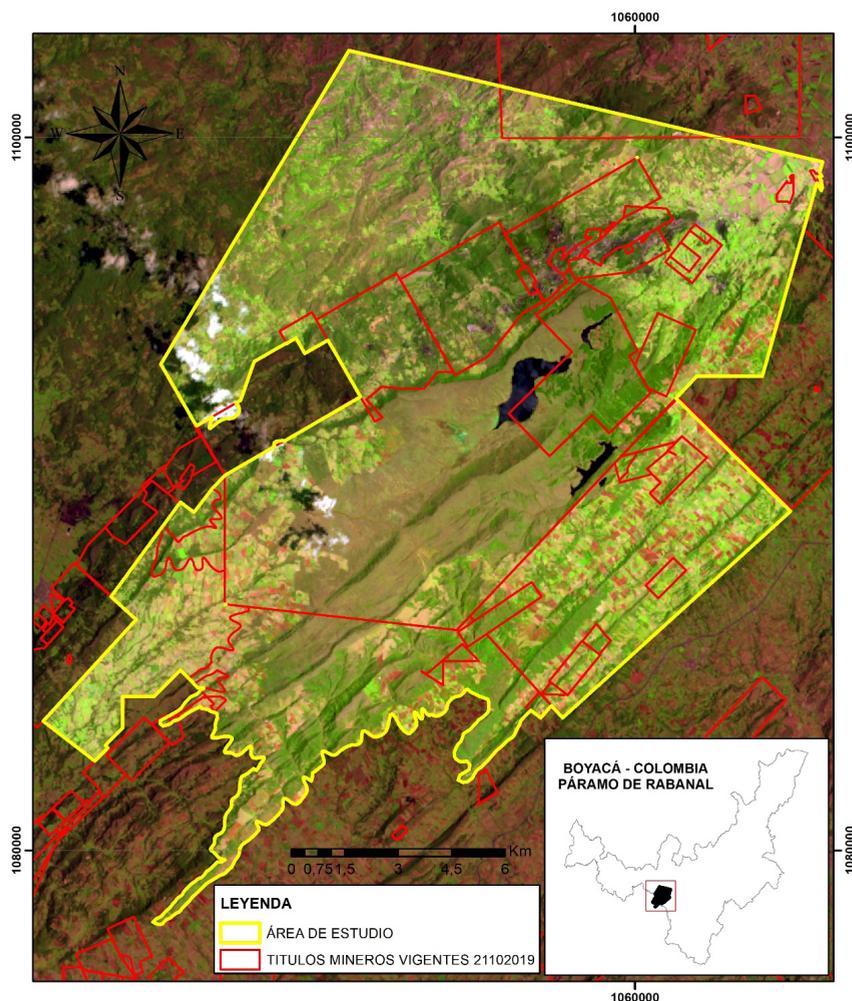
El páramo de Rabanal se ubica en límites de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (Colombia), particularmente en los municipios de Samacá, Ventaquemada (Boyacá), Guachetá, Lenguazaque y Villapinzón (Cundinamarca); como ecosistema de alta montaña (> 3200 m), integra el complejo de páramo Rabanal - río Bogotá (Morales et al., 2007; Medina et al., 2015; Manrique-Valderrama y Morales-Puentes, 2016; Moreno-Mancilla et al., 2018).

Característica del ecosistema, es la presencia de unidades de vegetación como arbustales, pajonales, frailejonales y parches aislados de bosque altoandino, que ofertan servicios ambientales (p. ej., regulación hídrica, belleza paisajística y conservación de biodiversidad); en conjunto, conforman una isla circundada por áreas destinadas para actividad agrícola intensiva y extensiva, así como de actividad minera, consideradas causas de la historia de disturbio en años anteriores (Moreno-Mancilla et al., 2018; Prado-Castillo et al., 2018; Vergara-Buitrago et al., 2018; Forero-Gómez

et al., 2020), hoy día, estas actividades humanas repercuten en la disminución de la resiliencia ecosistémica.

Figura 30. Área de estudio, recorte ventana de trabajo a partir de la capa de títulos mineros y delimitación del área protegida del complejo Rabanal-rio Bogotá

Recorte - Área de estudio

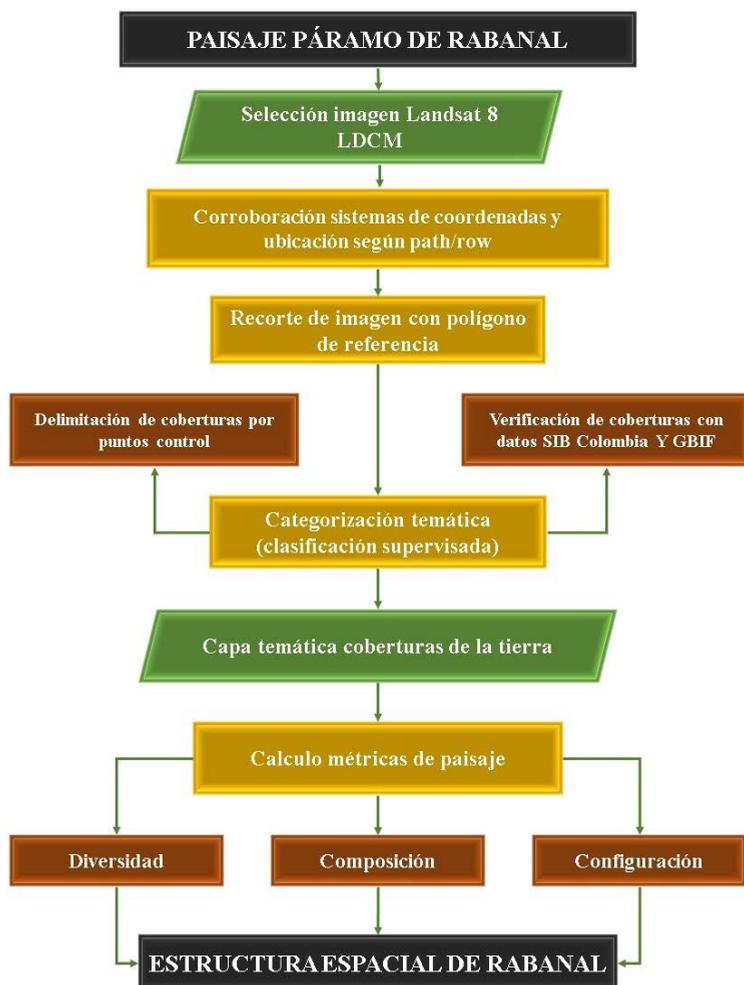


Nota. Autores.

3.2.2 Descripción del Método

El método, se orientó a la estimación de coberturas vegetales influenciadas por áreas de minería y de agricultura en el páramo de Rabanal; se utilizaron datos de procedencia satelital, edición de mapa temático de coberturas vegetales y posterior análisis con métricas de paisaje. Este proceso, se basó en The Nature Conservancy (2009) y los protocolos de manejo espacial de Posada (2012) del Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La identificación de coberturas vinculó una secuencia de procesamiento.

Figura 31. Cadena de procesamiento para estimar la estructura espacial de Rabanal



Nota. Autores.

3.2.2.1 Adquisición de imágenes

Se utilizó la imagen del sensor *Landsat 8*, con resolución espacial de 30m y Path/Row 8/56; estos datos satelitales, fueron provistos y descargados de la página del Earth Explorer del USGS (U.S. Geological Survey). La imagen fue registrada por el sensor en marzo de 2020, y presentó (según previsualización) menor registro

de nubosidad y semejanzas en cuanto estadios fenológicos de la vegetación. El análisis de coberturas estuvo acorde a la disposición de imágenes de este centro de documentación espacial y a las características mencionadas (Tabla 18); la delimitación del área de estudio estuvo acorde a insumos cartográficos tales como: shapefile a escala 1:100.000 del complejo páramo de Rabanal – río Bogotá y de títulos mineros circundantes al páramo.

Tabla 18. *Detalles de la imagen satelital utilizada en esta investigación*

Satélite	Path/Row	Fuente	Fecha
Landsat 8 del OLI	8/56	USGS	06 de marzo de 2020

Nota. Landsat Data Continuity Mission.

3.2.2.2 Pre-Procesamiento

Los procedimientos expuestos a continuación, fueron realizados con el software ArcGIS ver. 10.5 (licencia académica).

3.2.2.2.1 Corroboración sistema de coordenadas y ubicación path/row:

Ya que la imagen seleccionada incluye una ortorectificación previa, esta fue corroborada desde la identificación del sistema de coordenadas, y verificada con la posición de la escena de forma concordante con el **path/row del sensor** (Chuvienco, 2002). A su vez, el área de estudio fue espacializada acorde a los shapefile de referencia del páramo de rabanal.

3.2.2.2.2 Recorte de la imagen a partir del polígono de referencia:

Este procedimiento consistió en la selección de la información espacial que representa el área de distribución del complejo Rabanal (ventana de trabajo); implicó el recorte de la imagen fuente (810/956 pixel) iniciando con el polígono de referencia de las zonas geográficas (Shapefile complejos de páramo de Colombia y de concesiones o títulos mineros). Para ello, se utilizó la ventana *Data Management Tools – Raster – Raster processing - Clip*, en la que se incorporó la imagen, más el polígono de referencia (capa

tipo vector). El resultado de este procedimiento se evidenció en una nueva imagen con sistema de proyección WGS_1984_UTM_Zone_18N (Figura 30).

3.2.2.3 Categorización temática de la imagen:

La clasificación digital de la imagen multibanda, implicó su categorización estadística. Este proceso conllevó a reducir la escala de medida de una variable continua (de los ND originalmente detectados por el sensor) a una escala categórica (tipos de cobertura vegetal; Chuvieco, 2002).

La clasificación digital de la imagen Landsat abordó el “método supervisado” a partir del reconocimiento de la zona de estudio en una escala 1:1; es decir, verificación de campo (recorridos del área de páramo, las zonas agrícolas y de minería circundantes a Rabanal); de esta forma, se dio veracidad a la información captada por el sensor, para así interpretar y delimitar cada categoría temática presente (áreas de entrenamiento).

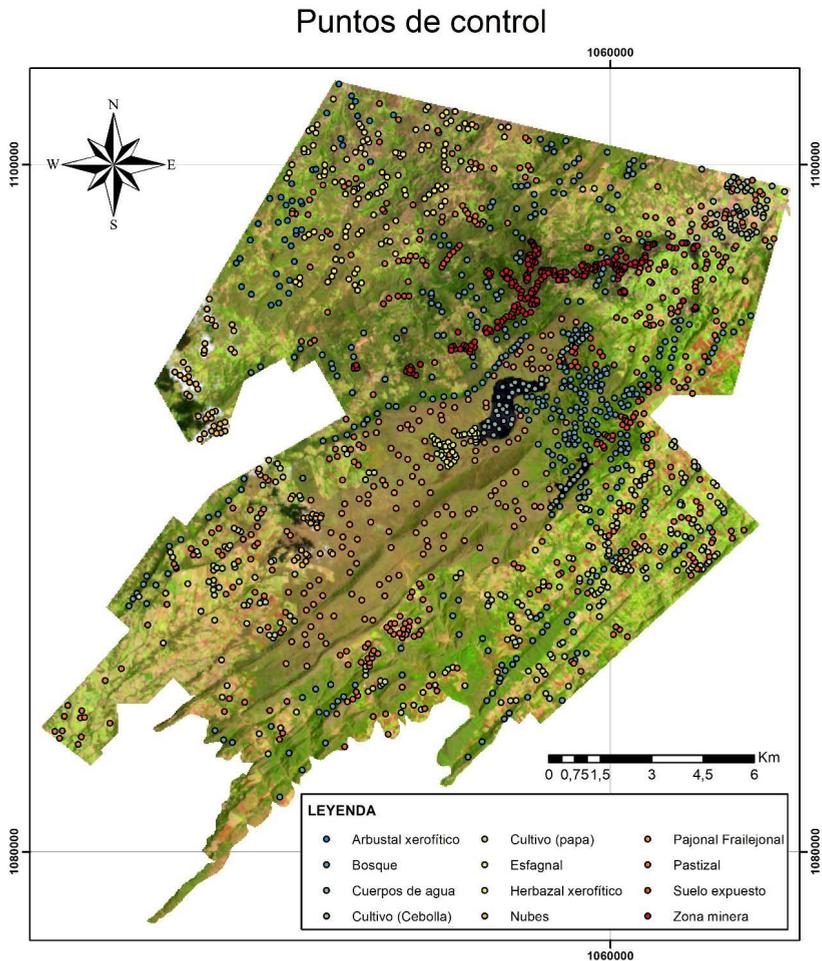
Así, se caracterizó cada clase temática (coberturas), en función de la similitud de los Niveles Digitales (ND) respecto a los identificados en campo, como se muestra a continuación:

- 1.** Selección y combinación de bandas que evidencian mayor contraste espectral entre clases temáticas (según especificaciones técnicas del sensor Landsat 8, bandas 564).
- 2.** Se identificaron las coberturas de la tierra según sistema de clasificación Corin Land Cover - CLC (IDEAM, 2010).
- 3.** Se creó una capa (shapefile) con topología tipo puntos (con 1743 ediciones) por cada cobertura vegetal con el fin de general firmas espectrales (*Spatial Analys Tools – Multivariate – Create Signatures*) y así obtener un archivo. GSG con datos de covarianza por cobertura (Figura 32).

4. El método de clasificación supervisada se realizó con las opciones de *Spatial Analys Tools – Multivariate – maximum likelihood classification*.

5. Mejoras de la clasificación que consistió en la agrupación de píxeles aislados a la cobertura más próxima (herramientas *Spatial Analys Tools – Generalization – Majority Filter*).

Figura 32. Selección y delimitación de coberturas a partir de puntos de control; el color de cada punto corresponde a las categorías definidas según *Corin Land Cover*

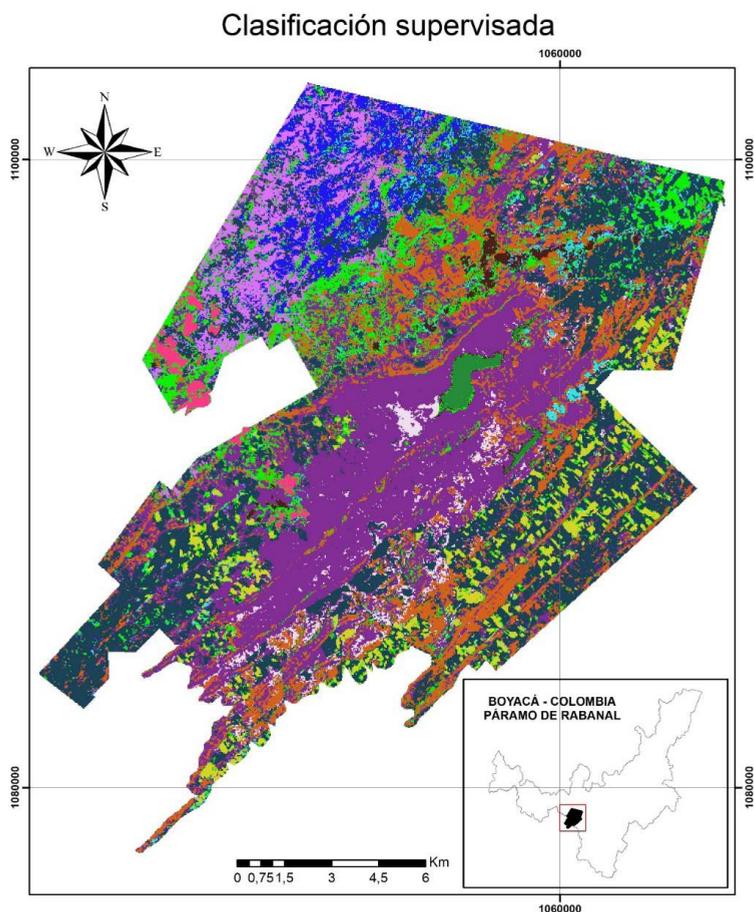


Nota. Autores.

3.2.2.4 Agrupación espectral:

Correspondió a la fase final del proceso de categorización temática de la imagen; consistió en agrupar los ND de toda la imagen a una de las clases temáticas determinadas en los pasos anteriores. Para lo cual, se realizó la conversión del archivo ráster resultante (Figura 33) a vector (herramientas: *Conversion tools – From Raster – Raster to polygon*), a su vez, se calcularon las áreas de cada polígono y se fusionaron aquellos menores a 900 m² (30x30 m) con coberturas adyacentes de mayor área.

Figura 33. Visualización del proceso de clasificación supervisada formato Ráster



Nota. Autores.

3.2.2.3 Post-procesamiento

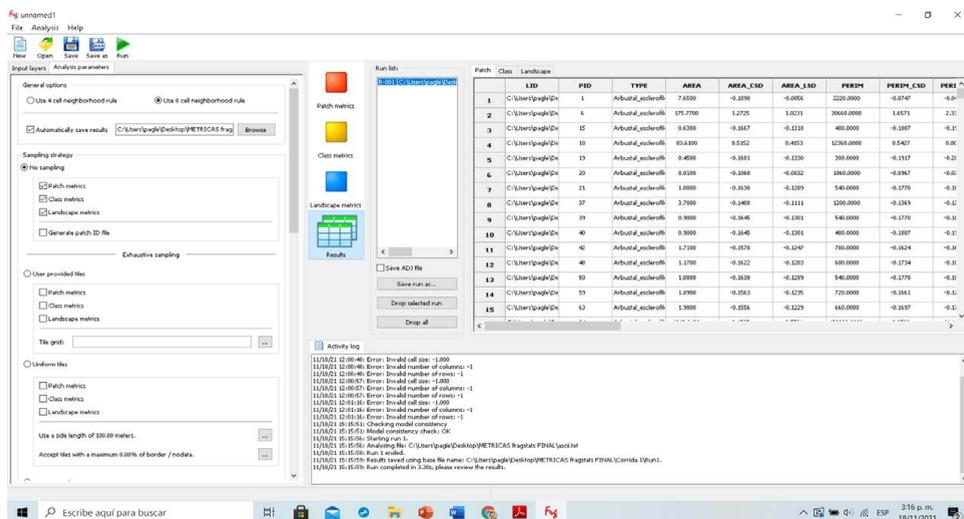
3.2.2.4 Obtención de métricas de paisaje

Con el fin de identificar la diversidad, composición y configuración de las coberturas vegetales, se obtuvieron métricas o estadísticas basadas en la teoría de patrones espaciales. Esta teoría incorporó el paisaje como un mosaico de parches o coberturas discretas que buscan explicar la distribución de los objetos geográficos, sus patrones y procesos en el tiempo (Magle *et al.*, 2009; McGarigal *et al.*, 2009; 2012).

La obtención de métricas de paisaje fue realizada a partir de la vinculación del archivo tipo ráster (transformado a ASCII) a la ventana de trabajo de FRAGSTATS (software libre) que cuantificó el paisaje de Rabanal según los siguientes parámetros (McGarigal *et al.*, 2012; Figura 34):

1. Métricas que cuantificaron la diversidad y composición del mapa sin referencia a atributos espaciales. La composición se abordó como el atributo asociado con la variedad y abundancia de tipos de parche, sin considerar el carácter espacial o ubicación (Tabla 19).
2. Métricas que cuantificaron la configuración y forma espacial de las coberturas y que necesitaron de información espacial para el cálculo. La configuración espacial fue asumida como el arreglo, posición, orientación (métricas de aislamiento) y el carácter espacial (forma) de cada parche en el área de estudio (Tabla 19).

Figura 34. Ventana de FRAGSTATS, obtención de métricas de paisaje



Nota. Autores.

Tabla 19. Métricas utilizadas para cuantificar la composición, diversidad, configuración y forma del paisaje en páramo de Rabanal y su área de influencia

PARÁMETRO	MÉTRICA	SÍMBOLO
Diversidad	Área total del paisaje	TA (Ha)
	Número de parches total	NP
	Riqueza de parches	PR
	Densidad de riqueza de parches	PRD
	Índice diversidad de Shannon	SHDI (rango 0.5-5)
	Índice diversidad de Simpson's	SIDA (rango 0-1)
Composición	Área de clase	CA (Ha)
	Número de parches	NP
	Densidad de parches	PD
	Porcentaje del paisaje	PLAND (%)
	Índice del parche más grande	LPI (%)

PARÁMETRO	MÉTRICA	SÍMBOLO
Configuración	Distancia euclidiana al vecino más cercano	ENN_MN; SD; CV (m)
	Índice de conectividad (radio: 500 m)	CONNECT (m)

Nota. Autores.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Descripción de coberturas vegetales

Según leyenda nacional de coberturas de la Tierra (Corine Land Cover - CLC), más la delimitación de áreas de entrenamiento a escala 1:100000 y soporte de la verificación de campo (escala 1:1), se identificaron 14 categorías espectrales (Figura 20); a continuación, se describe cada una y se incluyen listados de géneros o especies que caracterizan la unidad especial, esta información fue obtenida de bases de datos tales como el Sistema de Información de la Biodiversidad (SIB Colombia), Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y publicaciones para el área, así:

Arbustal abierto esclerófilo (AaE): cobertura caracterizada por una vegetación esclerófila (adaptada a periodos relativamente largos-secos, correspondientes a zonas subxerofíticas o enclaves secos); representada en arbustos achaparrados y árboles de bajo porte, con hojas coriáceas, suculentas y caducifolias (p. ej., cactus y plantas con hojas modificadas tipo espinas). Según registros de distribución, en esta cobertura es posible encontrar especies como: *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd. (Dividivi), *Prosopis juliflora* DC. (Trupillo), *Dodonaea viscosa* Jacq. (Hayuelo), *Myrsine guianensis* (Aubl.) Kuntze (Cucharó), así como especies de *Chromolaena*, *Lantana*, *Acacia*, *Salvia*, y *Cestrum*.

Arbustal denso (Ad): caracterizada por comunidades vegetales dominadas por especies de crecimiento simpodial (generalmente arbustos) y pocas especies dispersas de crecimiento monopodial (árboles). Representada en especies como: *Macleania rupestris* (Kunth) A.C. Sm. (Uva camarona), *Weinmannia fagaroides* Kunth

(Ensenillo), *Miconia ligustrina* (Sm.) Triana (Tunilla), *Oreopanax mutisianus* (Kunth) Decne. & Planch. (Mano de oso), *Diplostephium floribundum* (Benth.) Wedd., *D. tenuifolium* Cuatrec. (Chulo), *Pentacalia pulchella* (Kunth) Cuatrec. (Romero de páramo), *Scrobicaria ilicifolia* (L.f.) B. Nord. (Palo blanco chiquito), *Berberis goudotii* Triana & Planch. ex Wedd., *Clethra fimbriata* Kunth (Manzano o Istoraque), *Disterigma alaternoides* (Kunth) Nied. (Totiadera), *Gaultheria anastomosans* (L. f.) Kunth (Totiadera blanca o Reventadera), *Gaiadendron punctatum* (Ruiz & Pav.) G. Don (Tague), entre otras (Bravo-Pedraza et al., 2018).

Bosque fragmentado (Bf): territorios dominados por bosques naturales continuos (densos) o discontinuos (abiertos) afectados por la inclusión de coberturas tipo pastos, cultivos o vegetación en transición. Esta cobertura se define como fragmentada, ya que, en ella se distribuyen especies nativas principalmente de *Quercus humboldtii* Bonpl. (Roble) influenciadas por actividad minera de carbón, además de estar contiguas a zonas dominadas por árboles exóticos de *Eucalyptus globulus* Labill. (Eucalipto) y *Acacia melanoxylon* R. Br. (Acacia) que espectralmente no se diferencian a la escala trabajada.

Aclaración: la asignación de esta cobertura está acorde a los parámetros CLC, sin embargo, se sugiere realizar análisis detallados de la conectividad funcional y pérdida de calidad de hábitat para soportar a escala 1:1 la fragmentación.

Explotación de carbón (Ec): corresponde a las áreas dedicadas a la extracción de materiales minerales a cielo abierto que para el área de estudio corresponde a extracción de Carbón.

Hortalizas-cebolla (Hc): cobertura terrestre de manejo intensivo caracterizada por plantas herbáceas bianuales correspondientes a la especie *Allium cepa* L., que forma bulbos que se consumen como alimento. En esta cobertura, el suelo es constantemente ocupado.

Herbazal denso de tierra firme (HdTf): cobertura natural constituida por especies herbáceas densamente distribuidas, cuyas áreas no están sujetas a inundaciones; en estas se pueden distribuir elementos arbóreos o arbustivos dispersos. Algunos géneros de crecimiento herbáceo, en macolla y postradas que caracterizan esta cobertura corresponden a: *Ageratina*, *Achyrocline*, *Carex*, *Chromolaena*, *Pentacalia*, *Andropogon*, *Hypstis*, *Hypochoeris* y *Pleopeltis*.

Herbazal denso de tierra firme no arbolado (HdTfna): cobertura natural constituida por herbáceas y plantas con crecimiento en roseta (presentes en la alta montaña colombiana y típicas de formaciones de páramo que para Rabanal conforman las fisionomías de pajonales y frailejonales), abundantes por unidad de área, distribuidas en terrenos no inundables, con árboles o arbustos muy dispersos, localizadas en áreas con condiciones climáticas extremas (bajas temperaturas, alta radiación solar y vientos fuertes).

Especies que caracterizan los pajonales son: *Rhynchospora ruiziana* Boeckeler, *Gaultheria anastomosans* (L. f.) Kunth, *Pernettya prostrata* (Cav.) DC., *Vaccinium floribundum* Kunth, *Halenia asclepiadea* (Kunth) G. Don, *Lycopodium clavatum* L., *Calamagrostis effusa* (Kunth) Steud., *Jamesonia* sp., *Arcytophyllum nitidum* (Kunth) Schltld. y *Valeriana pilosa* Ruiz & Pav. Aquellas que caracterizan los frailejoanles son: *Espeletia murilloi* Cuatrec., *Espeletia boyacensis* Cuatrec., *Espeletiopsis rabanalensis* S. Díaz & Rodríguez-Cabeza en asociación con *Paepalanthus columbiensis* Ruhland, *Geranium hirtum* Burm. f. y *Geranium sibbaldoides* Benth. (Gil-Leguizamón et al., 2018).

Laguna, lagos y ciénagas naturales (LICn): superficie de agua natural o artificial de carácter abierto o cerrado, dulce, que conecta con sistemas lóticos, y funcionan como nacimientos de estos. Para Rabanal, están conformados por la represa de Teatinos, los embalses Gachaneca 1 y Gachaneca 2, así como Laguna Verde.

Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (McpEn): territorio cuya cobertura está conformada por cultivos y pastos en combinación con espacios naturales (fragmentos dispersos de arbustal denso y frailejónal). El patrón de distribución no puede ser representado individualmente, ya que, ocupan áreas inferiores a 25 hectáreas y existe extensión significativa de cultivos y pastos mayor al 50% de la superficie total de la cobertura. Para el área de estudio, los cultivos están representados con *Solanum tuberosum* L. (papa), *Ullucus tuberosus* Caldas (rubas), *Tropaeolum tuberosum* Ruiz & Pav. (nabos) y *Pisum sativum* L. (arveja); los pastizales con gramíneas como *Holcus lanatus* L. (rabo e' zorro) y *Pennisetum* sp (kikuyo).

Plantación de coníferas (Pc): conformada por plantaciones de vegetación arbórea, con intervención del hombre con fines de manejo forestal (producción de madera) y tiene rodales forestales. Para Rabanal, esta plantación masiva corresponde con árboles de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. (pino).

Parcelas de plantaciones en proceso de aprovechamiento (zonas en tala; Ppa-Zt): corresponde a las áreas destinadas para tala selectiva de la plantación de coníferas.

Tubérculos-papa (Tp): cobertura terrestre propia de zonas de alta montaña de clima frío, que para Rabanal, se sitúa entre los 2500 y 3000 msnm. En estas áreas el cultivo dominante es la papa (*Solanum tuberosum* L.) de hasta un metro de alto, herbácea, tuberosa y perenne.

Turberas (Tur): corresponde con terrenos pantanosos, de textura esponjosa, el sustrato está conformado por musgos y materia orgánica en descomposición (conocidos también como esfagnales debido a la presencia de briofitos del género *Sphagnum*, con dominio de *S. magellanicum* Brid.). Ubicados en áreas altoandinas por lo general, superiores a 3000 (3200) m.

Zonas industriales o comerciales (Zic): cubierta por infraestructura artificial (terrenos cimentados), que para Rabanal, se utiliza para

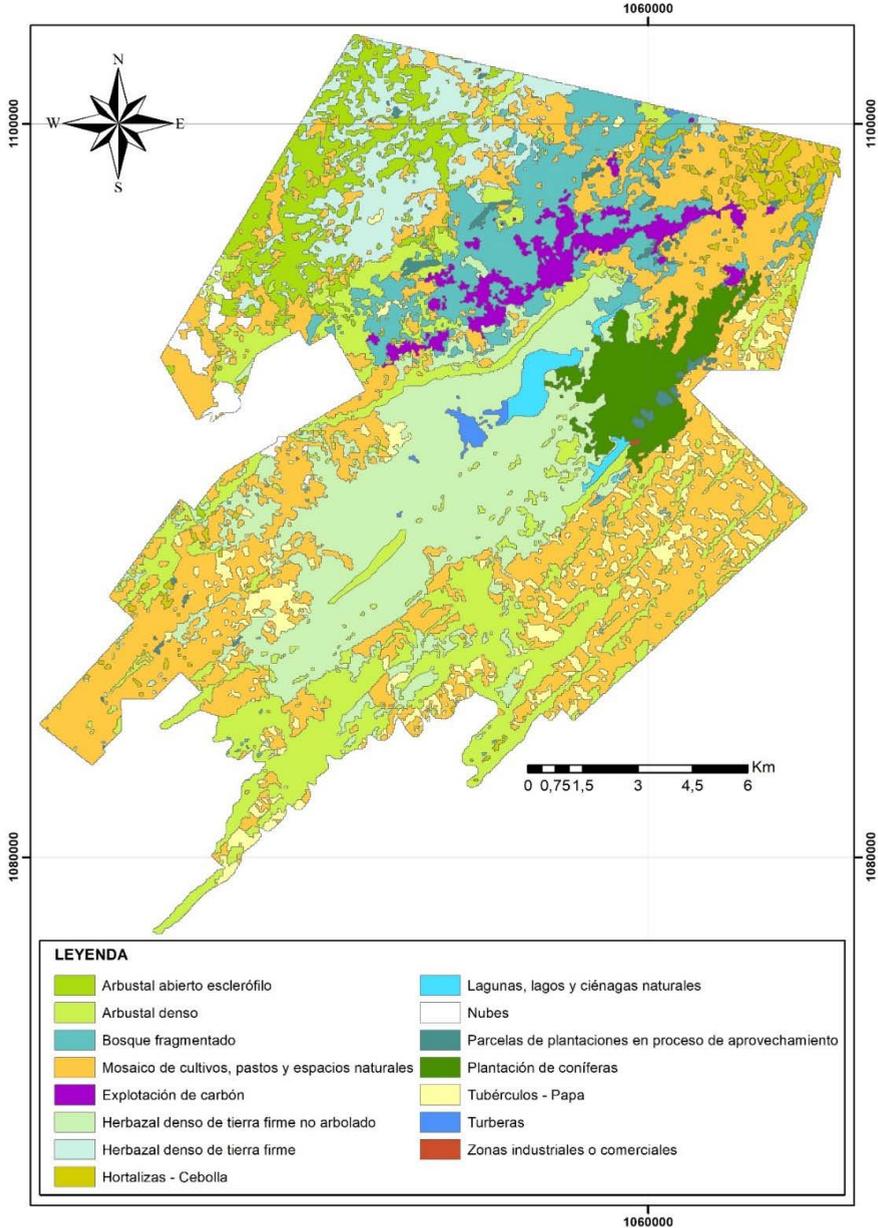
actividades industriales correspondientes a obras hidráulicas (área > 3 ha) ya que corresponde a la zona de control de las compuertas de la represa Teatinos, que abastece de agua a municipios como Tunja, Ventaquemada, Samacá y Ráquira.

3.3.2 Dimensión Espacial del Paisaje de Rabanal (Estructura)

Los resultados del análisis espacial de coberturas para el año 2020 en el páramo de Rabanal y sus áreas de influencia, se presentan como productos digitales en formato vectorial (previa transformación de ráster), que en total suman 14 coberturas de la tierra, derivadas del procesamiento e interpretación de la imagen Landsat 8, seleccionada y una que correspondió a nubes (Figura 35). A continuación, se describe la estructura en términos de la diversidad, composición y configuración.

Figura 35. Coberturas de la tierra definidas para el páramo de Rabanal y sus zonas de influencia según sistema de clasificación CLC (IDEAM, 2010)

Coberturas de la Tierra - Complejo páramo Rabanal



Nota. Autores.

→ Métricas de diversidad

El área de estudio se caracteriza por la presencia de cinco (5) coberturas de tipo natural y nueve (9) artificiales o influenciadas por el hombre (riqueza total – PR: 14 coberturas; Tabla 20). La diversidad del paisaje está representada con una extensión total (TA) de 26955.45 ha, en las que se distribuye una riqueza total de 1307 parches (NP) con densidad de 0.0556 parches por hectárea (entiéndase por parche a un fragmento, tesela o polígono).

Para el índice de Shannon (SHDI), se estimó un valor de 2.0759, que se asocia con una probabilidad de diversidad intermedia a baja (debido a la extensión del paisaje analizado), resultado apoyado con el estimado de Simpson's (SIDA: 0.8325) que determina un paisaje homogéneo, seguramente por la alta dominancia de coberturas con mayor extensión.

→ Métricas de composición

La cobertura dominante es el Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (McpEn) con una ≈ 30 % del área total, seguido del Herbazal denso de tierra firme no arbolado (18,3 %; fisiológicamente conocido como pajonal-frailejónal), a su vez, es dominante la cobertura Arbustal denso (≈ 17 %) definida como franja de subpáramo; en conjunto, estas coberturas cobijan 65 % del área espacializada (17424,1 Ha, Tabla 20).

De igual forma, la extensión geográfica de las concesiones mineras cobija zonas correspondientes a enclaves xerofíticos, relacionados con coberturas de tipo Herbazal denso de tierra firme (HdTf) y Arbustal abierto esclerófilo (AaE) que en conjunto cubren el 11,6 % del área total (3147,4 Ha, Tabla 20, Figura 35).

Tabla 20. Métricas de composición (área y porcentaje de área) estimada para Rabanal y su área de influencia

Origen	Cobertura CLC	Abreviación	CA (Ha)	PLAND (%)
Artif/Influencia	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	McpEn	8009,3	29,7
Natural	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	HdTfna	4933,9	18,3
Natural	Arbustal denso	Ad	4480,1	16,6
Artif/Influencia	Bosque fragmentado	Bf	2140,1	7,9
Natural	Herbazal denso de tierra firme	HdTf	1683,5	6,2
Natural	Arbustal abierto esclerófilo	AaE	1463,9	5,4
Artif/Influencia	Tubérculos - papa	Tp	1329,6	4,9
Artif/Influencia	Plantación de coníferas	Pc	1007,9	3,7
Artif/Influencia	Explotación de carbón	Ec	671,8	2,5
Artif/Influencia	Hortalizas - cebolla	Hc	473,3	1,8
Artif/Influencia	Laguna, lagos y ciénagas naturales	LLCn	237,1	0,9
NoAplica	Nubes	Nu	233,4	0,9
Artif/Influencia	Parcelas de plantaciones en proceso de aprovechamiento	Ppa-Zt	188,0	0,7
Natural	Turberas	Tur	99,9	0,4
Artif/Influencia	Zonas industriales o comerciales	Zic	3,7	0,0137

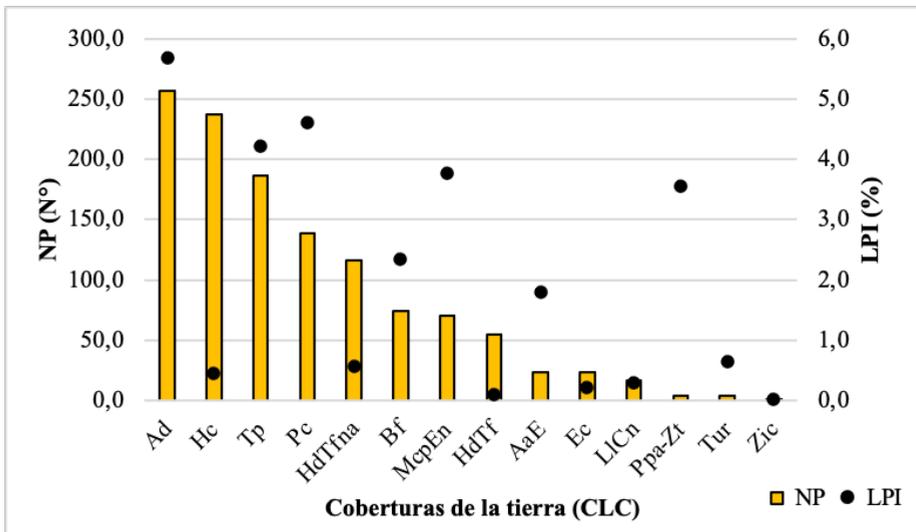
Nota. Autores.

De esta forma, el mapa temático de coberturas de la tierra y la métrica de área, son evidencia de la amplia extensión de los sistemas productivos (en conjunto McpEn, Tp y Hc: 9812,2 Ha), las plantaciones forestales de pino (Pc: 1007,9 Ha) y la actividad minera (Ec: 671,8 Has que corresponden a zonas de bocaminas y rutas de acceso) en comparación con las coberturas naturales típicas del sistema páramo (en conjunto HdTfna y Ad: 9414 Ha) y aquellas xerofíticas (en conjunto HdTf y AaE: 3147,4 Ha); por su parte, la repuesta espectral del bosque fragmentado (Bf: 2140,1

Ha) es la consecuencia de la actividad agrícola y minera en la zona, que actúan como factores tensionantes sobre el bosque y los ecosistemas naturales del área.

Las coberturas con mayor número de parches (NP) corresponden a Arbustal denso (Ad: 257), seguido de las áreas de cultivos de cebolla (Hc: 237) y de papa (Tp: 187), en su orden, las plantaciones de coníferas (Pc: 139) y las áreas naturales de páramo (HdTfna: 116); por su parte, la cobertura Arbustal denso (Ad) evidencia tener parches más grandes (LPI) seguido de los cultivos de papa (Tp), las plantaciones de coníferas (Pc), los mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales (McpEn) y parcelas de plantaciones en proceso de aprovechamiento (Ppa-Zt). Este resultado determina, que no todas las coberturas con abundancia de parches tienen parches con gran extensión, casos particulares son los cultivos de cebolla (Hc) y los herbazales densos de tierra firme (HdTf), cuyas coberturas son abundantes en parches, pero presentan poca extensión (Figura 36).

Figura 36. Métricas de composición. NP: número de parches; LPI: índice de parche más grande por cobertura



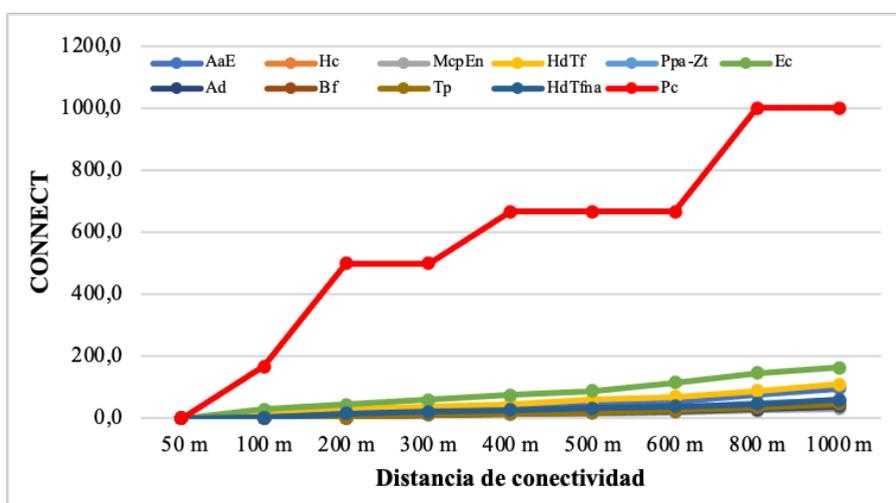
Nota. Autores.

→ Métricas de configuración

La configuración se interpretó en términos de la conectividad estructural (CONNECT) y la distancia media al vecino más cercano (ENN_MN) entre parches de cobertura natural y de sistemas agrícolas y mineros; estas métricas permitieron interpretar la disponibilidad de hábitat en el paisaje y la proporción de uniones posibles para cada tipo de cobertura.

De esta forma, el cálculo de conectividad entre parches de una misma cobertura, determina tendencias similares; a distancia de 50 m entre parches la conectividad es nula, pero, a distancias superiores a 100 m (hasta 1000 m) la conectividad aumenta; aquella cobertura que mayor conectividad evidencia, corresponde a la plantación de coníferas (Pc) soportado en que sus polígonos se encuentran agregados y no dispersos como ocurren en las restantes coberturas (Figuras 37 y 38).

Figura 37. Métrica de configuración. Conectividad estructural entre parches de la misma cobertura estimada en distancias entre 50–1000 m

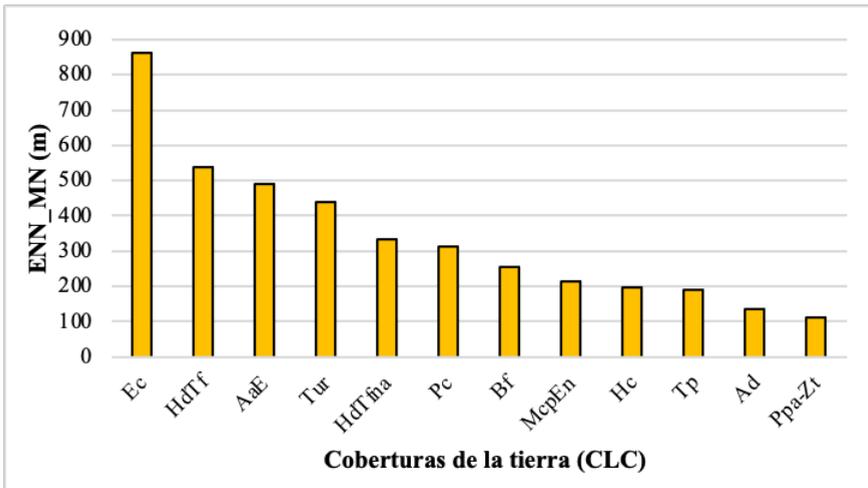


Nota. Autores.

La distancia entre parches de vegetación natural establece posibilidades exitosas o infructuosas de desplazamiento de la flora

y la fauna; no obstante, para el caso de Rabanal, las coberturas con mayor distancia corresponden a la Explotación de Carbón (Ec: polígonos distanciados 862 m), y se asume mayor coste de desplazamiento de la biota para el Herbazal denso de Tierra firme (HdTf: 539 m) y Arbustal abierto esclerófilo (AaE: 489 m; Figura 38).

Figura 38. Métrica de configuración. Distancia al vecino más cercano entre parches de la misma cobertura



Nota. Autores.

3.4 Consideraciones y conclusiones

- El uso del suelo y la influencia de las actividades agrícolas y mineras pueden generar efectos negativos en el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas naturales de alta montaña colombiana, así como de enclaves subxerofíticos (Lambin et al., 2001; Hansen et al., 2001). La región Andina, ha experimentado la transformación de coberturas vegetales producto de la colonización, el bosque altoandino y páramo, han sido sustituidos por actividades agrícolas, de pastoreo y ganadería; en otros casos, la actividad minera no contempla planes de cierre que permitan aportar a recuperar, rehabilitar o restaurar la integridad ecológica de estos sistemas estratégicos, evidenciado en afectaciones directas

- a la biodiversidad y limitación de los servicios ambientales que ofertan (Etter & van Wyngaarden, 2000; Etter et al., 2008).
- La estructura paisajística de Rabanal, el funcionamiento y dinámica de las especies y la figura legal de espacio natural protegido como complejo de páramo, actualmente experimenta tensionantes de origen humano cuyas consecuencias espaciales se evidencian en el distanciamiento y posible pérdida de la calidad de hábitat (Reitsma et al., 2015); es clara la dominancia del Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales al sur del complejo (Municipios de Ventaquemada, Villapinzón, Lenguazaque y Guachetá) y la actividades de explotación de Carbón al norte (Samacá).
 - Los efectos de la transformación del paisaje por actividades humanas, se evidencian en la disminución de superficie de hábitat disponible para procesos reproductivos, anidamiento y conectividad funcional, esto repercute en la reducción del tamaño de las poblaciones naturales y aislamiento de especies; según Valdés (2011), Saura & Rubio (2010) y Saura (2013), la pérdida de área por fragmento aumenta la relación perímetro-superficie, lo que permite la permeabilidad de los parches a efectos de la matriz de pastos y cultivos.
 - Por su parte, la papa es un producto con alta demanda y consumo per cápita en Colombia, con gran expansión y presión sobre el ecosistema de páramo, particularmente en el altiplano Cundiboyacense (Sánchez-Cuervo et al., 2012); esta aseveración soporta los resultados de este estudio, que describen al páramo de Rabanal como un ecosistema con tensionantes continuos producto de dicha actividad.
 - El manejo sostenible de los agroecosistemas, en zonas de fragilidad ambiental, requiere tener en cuenta las interacciones de todos sus componentes físicos, biológicos y socioeconómicos y el impacto ambiental que éstos producen. Es necesario proponer ajustes a la agricultura convencional para hacerla ambientalmente sostenible, socialmente justa y equitativa y económicamente viable.
 - Se han propuesto algunas posibles soluciones a los problemas ambientales creadas por los sistemas agrícolas

- intensivos en capital y tecnología, basándose en investigaciones que tienen como fin, evaluar sistemas alternativos, es así que para Altieri (2001), la apuesta está en la reducción o eliminación de agroquímicos a través de cambios en el manejo productivo, que aseguren la adecuada nutrición y protección de las plantas a través de fuentes de nutrientes orgánicos y un manejo integrado de plagas y enfermedades.
- Por esta razón, las prácticas agroecológicas para Rabanal, son fundamentales para orientar la conversión de sistemas convencionales de producción (monocultivos dependientes de insumos agroquímicos) a sistemas más diversificados y autosuficientes. Las prácticas agroecológicas en las zonas de influencia al páramo, deben justificarse en principios ecológicos que favorecen procesos naturales e interacciones biológicas que optimicen sinergias, de modo tal, que la agrobiodiversidad sea capaz de subsidiar por sí misma, procesos claves tales como, la acumulación de materia orgánica, fertilidad del suelo, mecanismos de regulación biótica de plagas y la productividad de los cultivos (Gliessman et al., 1998); de esta forma, se aporta a la integridad ecosistémica y la resiliencia del páramo de Rabanal.
 - Un aspecto destacado de la Agroecología, es la fuerza con la que introduce y resalta el componente social. Esto es así, porque entiende que el hombre es quien decide modificar los ecosistemas naturales para transformarlos en agroecosistemas (Sarandón, 2011). Esta transformación implica entender de manera clara los usos del suelo a nivel del agroecosistema, con el fin de incorporar elementos que permitan entender la ocupación del territorio y los componentes del entorno que ejercen sinergia para el manejo adecuado de la producción vegetal.
 - La diversidad, composición y configuración de las coberturas de la tierra en Rabanal, están condicionadas por modificaciones en el uso y ocupación del suelo; Armenteras et al. (2003), documentaron procesos de fragmentación y asilamiento progresivo de la vegetación de alta montaña en la cordillera Oriental colombiana; solo el 36% de las áreas de

páramo, presentan figuras legales de protección y conservación bajo sistemas de Parques Nacionales Naturales, las restantes están expuestas a transformación; esto determinaría la necesidad de crear franjas de amortiguación colindantes al área natural que permitan minimizar efectos de la minería y la agricultura en la zona.

- Son necesarias estrategias de conservación que propicien escenarios de preservación y desarrollo de las comunidades locales en Rabanal, una de ellas, es la Restauración Ecológica, práctica que pretende reintegrar características de diversidad, estructura y funcionalidad a un sistema que ha experimentado disturbios (en este caso, por actividad agrícola y minera) (Prado-Castillo et al., 2018); atender a estrategias de conservación permitirá proveer al hombre los servicios ecosistémicos necesarios para su vida, así como minimizar impactos producto del cambio climático (Chavarro et al., 2007).