

Zonificación minera basada en la integración de la evaluación ambiental estratégica y modelado con múltiples criterios en la región de La Macarena, departamento del Meta, Orinoquía Colombiana.

Mining zoning based on the integration of the strategic environmental assessment and multi criteria modeling in the La Macarena region, Meta department, Colombian Orinoquia.

Larry Niño¹

Resumen

Se desarrolló un modelo de zonificación para inducir restricciones a la minería en la región de La Macarena, departamento del Meta (Colombia), el cual integró la Evaluación Ambiental Estratégica al modelado de múltiples criterios, particularmente Electre Tri. El área de estudio se clasificó en cuatro niveles de restricción, de acuerdo a la jerarquía de mitigación de impactos: áreas excluidas y áreas de restricciones mayores, medias y menores; donde se podrían plantear intervenciones para evitar, minimizar, reparar, restaurar y compensar los efectos negativos ante un eventual desarrollo minero. Se concluye que el modelo de zonificación corresponde a una herramienta analítica, dinámica y multivariante de ordenamiento minero, donde el acopio, cruce y análisis de potencialidades, restricciones y condicionantes para el desarrollo de la minería en escenarios complejos, son de carácter prioritario.

Palabras clave: Zonificación minera; Ordenamiento minero; Evaluación Ambiental Estratégica; Modelado con múltiples criterios, La Macarena, Colombia.

Abstract

A zoning model to induce constraints to mining was developed in La Macarena, Meta department (Colombia), based in the integration of the Strategic Environmental Assessment with multi criteria modeling, particularly Electre Tri. The study area was classified into four levels of restriction, according to the hierarchy of impact mitigation: excluded areas and areas of major, medium and minor restrictions as well; where an appropriate planning of interventions could be prevent, minimize, repair, restore and compensate the negative effects to a possible mining development. Therefore, the zoning model corresponds to an analytical, dynamic and multivariate tool of mining order, where the collection, crossing and analysis of potentialities, constraints and conditions for development of mining in complex scenarios, represent priorities.

Keywords: Mining zoning; Mining order; Strategic Environmental Assessment; Multi criteria modeling , La Macarena, Colombia.

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. lninoa@unal.edu.co

Introducción

La globalización ha dado paso al mega consumo per cápita y el uso desproporcionado de los recursos y producción a una escala sin precedentes, como consecuencia el mayor reto a la humanidad actualmente es reconciliar la producción mundial con la conservación de la biodiversidad (Carrasco *et al.* 2014). El espacio geográfico actual es producto de los procesos globalizadores en la sociedad y la economía que transforman la totalidad de los elementos naturales con fines productivos, donde los territorios se diferencian, reorganizan y especializan de acuerdo a sus atributos sociales o naturales y las oportunidades y rentabilidades que lo posicionan funcionalmente en el sistema globalizado (Santos, 1996). La creciente demanda por metales y productos derivados, la cual abarcan gran parte de las actividades humanas, han hecho ver a la minería como un factor clave en la reactivación de la economía en países subdesarrollados, donde son comunes la reducción de costos de operatividad de la industria y la disminución de estándares ambientales con el objetivo de aumentar su competitividad de localización de inversiones mineras (Banco Mundial, 2002; Banco Mundial & IDRC, 2003; Sánchez, 1997). Asimismo, la multiplicidad de planes y ordenamientos de naturaleza ambiental, territorial, hidrográfica y sectorial en Colombia, no han generado los determinantes ambientales específicos para lograr su incidencia efectiva en la zonificación del uso del suelo; la superposición de diversos planes en un mismo territorio ha generado aún mayor conflicto, al desconocer las restricciones y los usos que prevalecen. Una de las propuestas para mejorar la base de la actividad minera corresponde al desarrollo de ejercicios regionales de ordenamiento territorial que permitan acopiar, cruzar y analizar información de las potencialidades,

restricciones y condicionantes para el desarrollo de la minería, con la implementación de herramientas analíticas, dinámicas y multivariantes, a escalas precisas y útiles, que tengan la capacidad de modelar y analizar escenarios complejos y que permitan formular estudios socio-ambientales como base para la toma de decisiones (UPME, 2014).

La perspectiva de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) como instrumento de evaluación y mecanismo de incorporación de objetivos sostenibles a decisiones en políticas, planes o programas, junto a consideraciones sociales y económicas, permite identificar y evaluar el origen de las problemáticas asociadas a las actividades originadas o incentivadas, en este caso, por medio de la política minera colombiana y el Plan Nacional de Ordenamiento Minero (PNOM), antes de que se manifiesten. Las tendencias modernas enfatizan en que la principal finalidad de la EAE corresponde al proceso de la toma de decisiones dando origen a la “Evaluación Ambiental Estratégica Centrada en la Decisión”, en la cual las afectaciones de una decisión dejan de ser objeto de evaluación para posicionarse como parte del proceso de análisis, el acompañamiento de los procesos de decisión se realizan desde una perspectiva sostenible que permite opciones de desarrollo, sus resultados son flexibles y adaptables al contexto institucional y reemplaza requisitos legales de aplicación por criterios de desempeño (Herrera, 2014).

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo espacial, basado en el análisis Electre Tri de múltiples criterios, que permita la zonificación minero-ambiental en La Macarena (Colombia). Esta herramienta busca inducir restricciones a la expansión de la actividad minera que se desarrollan en las cercanías de zonas protegidas (compuestas por ecosistemas frágiles y con una alta y única

biodiversidad), de esta manera se podrán minimizar los efectos en la funcionalidad y estructura ecosistémica que provee de bienes y servicios que satisfacen las necesidades de las poblaciones locales. El modelo presentado corresponde a un insumo fundamental en el Ordenamiento Minero de la región, el cual permitiría localizar los centros de extracción de minerales en espacios geográficos compatibles con el desarrollo de las poblaciones humanas locales; igualmente, aborda geográficamente aquellos espacios que están siendo creados o transformados para responder a funciones de producción minera en un contexto histórico y a una escala regional, donde las circunstancias globales implican nuevas exigencias, particularmente el dejar atrás la visión de región como una entidad aislada, autónoma, particular y poco relacionada.

Área de estudio

El municipio de La Macarena se sitúa al Suroccidente del departamento del Meta a 225 km de Villavicencio con una superficie de 11.231,0 km²; limita al Norte con los municipios de Uribe y Vistahermosa, al Sur y al Occidente con el departamento de Caquetá y al Oriente con el municipio de Vistahermosa y el departamento de Guaviare (Figura 1). La Macarena se localiza a 233 m de altitud, presenta variaciones climáticas con temperaturas medias anuales que oscilan entre 23° C y 35° C, con un promedio de 29° C; el régimen pluviométrico es unimodal con un período marcado de lluvias de abril a septiembre, la precipitación media anual es de 2.000 mm y se incrementa progresivamente de Este a Oeste hacia la Sierra, donde se presentan máximos de 4.000 mm (Alcaldía La Macarena, 2008; Sacristán, 2007).

Materiales y métodos

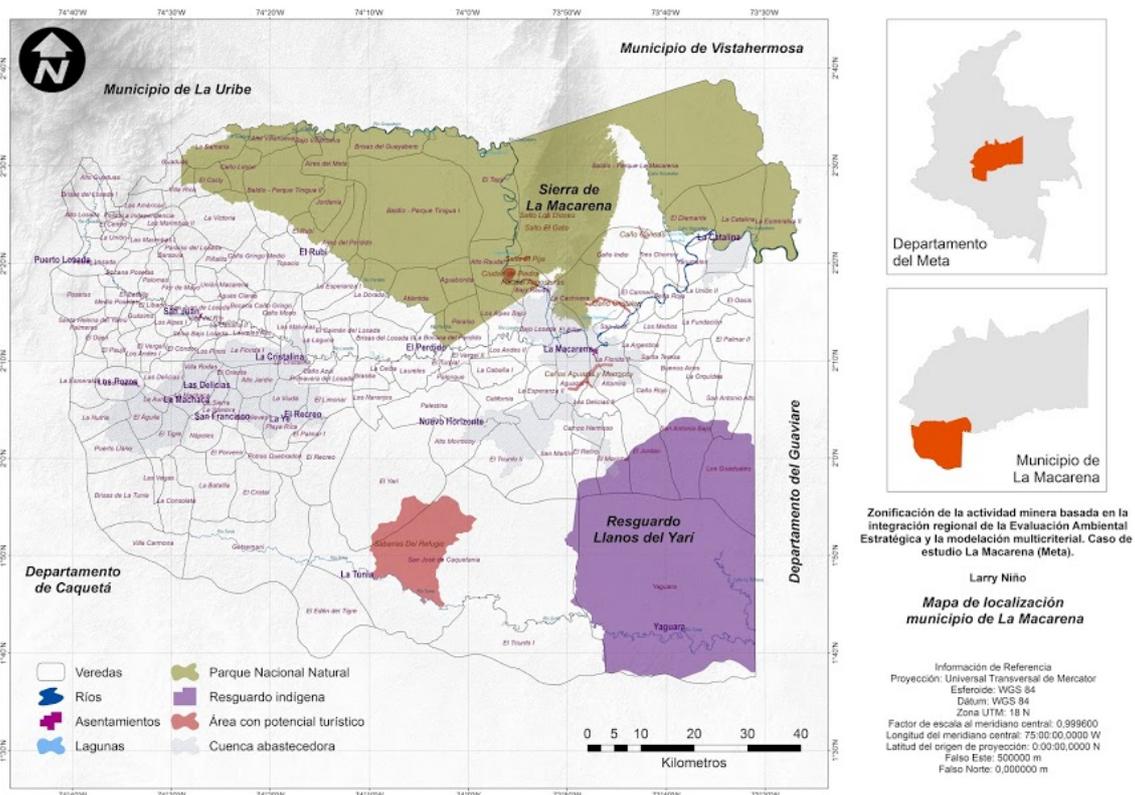


Figura 1. Municipio de La Macarena. Fuente: elaboración propia.

A pesar de que la mayor proporción de habitantes de La Macarena residen en zona rural, la información del sector agropecuario es insuficiente, posiblemente debido a las condiciones geográficas del Municipio, la trayectoria histórica insurgente de la región, la necesidad de producir coca y la incipiente producción de autoconsumo; asimismo, la comercialización de los excedentes agropecuarios enfrenta adversidades geográficas y de transporte a escala extra-regional, por consiguiente la producción debe realizarse cerca de la cabecera municipal y centros poblados. La tendencia actual en el uso del suelo se encamina hacia la introducción de pasturas con propósitos de ganadería, donde la limitada fertilidad de los suelos hace que colonos y empresarios acumulen grandes extensiones de tierra en forma de potreros que permitan a cada semoviente pastar en 5 ha de terreno; la expansión de las áreas dedicadas al pastoreo se suma a la conflictividad en el uso del suelo por prácticas no adecuadas como deforestación, establecimiento de cultivos ilícitos, ampliación de la frontera agrícola, quemas incontroladas y asentamientos humanos en zonas de riesgo, lo cual supone una deficiente planeación del territorio (Sacristán, 2007). Se estima que un poco más de la mitad del área deforestada en la región se encuentra cubierta por pastos, lo cual evidencia la estructura agropecuaria dominada por la ganadería y la tendencia de la conversión de la cobertura hacia una inmensa pradera (Arcila, 2009).

El municipio cuenta con zonas de alto valor hedónico y paisajístico con potencial para el turismo ecológico e investigativo, donde es posible apreciar desde bosques densos primarios hasta manifestaciones de arte prehistórico como petroglifos de 4.000 años de antigüedad. Caño Cristales corresponde al sitio con mayor potencial turístico, es reconocido mundialmente por sus corrientes de aguas cristalinas y algas multicolores;

asimismo, son de interés turístico el Salto de los Dioses, Salto Canoas, Salto del Gato, Ciudad de Piedra, Raudal de Angostura y las Sabanas del Yará. A pesar de su potencial, el turismo en La Macarena no ha tenido un desarrollo relevante, principalmente por presencia de grupos armados insurgentes, desinterés de la población local por la conservación del patrimonio cultural y deficiencias en infraestructura vial, acceso a servicios públicos y servicios turísticos complementarios que puedan articularse para consolidar la cadena productiva. Con relación a la extracción de minerales, se destaca la explotación de materiales de arrastre o agregados de río como balastro, arena, piedra y gravilla, los cuales son implementados en el mantenimiento de vías y construcción de viviendas principalmente (Sacristán, 2007).

Selección de criterios

Fueron seleccionadas 24 variables como criterios de zonificación minero-ambiental, de acuerdo a su disponibilidad, vigencia, representatividad, espacialidad, legibilidad y operatividad. Estos criterios expresaron distintas dimensiones con el objetivo de responder a los requerimientos funcionales de la ordenación minero-ambiental del territorio y que a su vez permitieran el establecimiento de las medidas propositivas localizadas en el espacio (Tabla 1).

Los criterios generados por el estudio correspondieron a la cobertura y uso del suelo, los principales cursos de agua y las cuencas abastecedoras de agua en el municipio. Los dos primeros fueron originados a partir de la interpretación visual de cuatro escenas *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM) del año 2015, obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) a través del *Global Visualization Viewer* (GloVis; <http://glovis.usgs.gov/>), correspondientes a los *Path- Row* 8-58, 8-59, 7-58 y 7-59. Los procesos correspondientes a la importación, compilación, corrección

geométrica/radiométrica y configuración del mosaico, fueron realizados en el programa informático ERDAS 2011; una vez se obtuvo la ventana de trabajo, se procedió a realizar la clasificación visual de las coberturas implementando distintas combinaciones de bandas de acuerdo a la cobertura a identificar según lo planteado en Murcia (2009); el trazado de vectores se realizó en formato Arc Coverage para garantizar la integridad topológica de los polígonos con una tolerancia *fuzzy* de 0,0001 en el programa informático anteriormente mencionado. En cuanto a las cuencas abastecedoras de agua, en primera instancia se trazaron las cuencas hidrográficas del municipio a partir de un

modelo de elevación digital proveniente del programa Aster GDEM, obtenido del USGS a través del *Global Data Explorer* (GDEX; <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>), el cual provee modelos de elevación de 30 m provenientes de imágenes Aster, como su nombre lo indica. La delimitación de cuencas de La Macarena se realizó en el programa ArcMap 10.1 con la herramienta *Hidrology* del módulo *Spatial Analyst*, en la cual se llevaron a cabo los procesos de corrección del modelo de elevación, definición de dirección y acumulación de flujos, definición y ordenación de la red de drenajes, y finalmente la delineación de las cuencas.

Tabla 1. Variables seleccionadas como criterios.

Dimensión	Criterio	Fuente
Biológica	Cobertura y uso del suelo.	El estudio (Landsat LDCM).
	Principales cursos de agua.	El estudio (Landsat LDCM).
Físico-química	Nivel de pendientes.	IGAC, 2014.
	Nivel de erosión.	IGAC, 2014.
	Susceptibilidad a inundación.	IDEAM, 2003.
	Susceptibilidad a desertificación.	IDEAM, 2003.
	Susceptibilidad a incendios.	IDEAM, 2003.
	Nivel de fertilidad del suelo.	IGAC, 2014.
	Nivel de humedad del suelo.	IGAC, 2014.
	Nivel de drenaje del suelo.	IGAC, 2014.
	Profundidad del suelo.	IGAC, 2014.
	Nivel de acidez el suelo.	IGAC, 2014.
Nivel de aluminio en el suelo.	IGAC, 2014.	
Institucional	Parques Nacionales Naturales.	IGAC, 2012.
	Bosques protectores declarados.	Alcaldía La Macarena, 2008.
	Áreas de reserva Ley 2 de 1959.	IGAC, 2012.
	Resguardos indígenas.	IGAC, 2012.
Social	Densidad de población.	Alcaldía La Macarena, 2008.
	Núcleos de población.	Alcaldía La Macarena, 2008.
	Cuencas abastecedoras.	EOT y Aster GDEM.

Dimensión	Criterio	Fuente
	Equipamiento.	Alcaldía La Macarena, 2008.
Económica	Solicitudes y títulos mineros.	Catastro Minero, 2014.
	Sitios con potencial turístico.	Alcaldía La Macarena, 2008.
	Áreas con influencia cocalera.	UNODC, 2011-2013.

Fuente: elaboración propia.

La información cartográfica proveniente de la Alcaldía de La Macarena, correspondiente al Esquema de Ordenamiento Territorial, fue transformada del formato CAD (*Computer-Aided Design*) al formato *Shape* en el programa QGIS Desktop 2.16.2; posteriormente, junto a la información geográfica procedente del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la geometría de los polígonos fue ajustada y georreferenciada con la imagen *Landsat* LDCM y el modelo de elevación Aster GDEM en el mismo programa informático. La totalidad de capas cartográficas en formato *Shape* fueron definidas en la proyección *European Petroleum Survey Group* (EPSG) 32618.

Los atributos cualitativos, asociados a las entidades espaciales poligonales que representan las alternativas del modelo, fueron reclasificados en variables ordinales numéricas de acuerdo a la conveniencia ambiental de no realizar actividades mineras en el área considerada, es decir, el valor asignado fue directamente proporcional al grado de restricción al desarrollo de proyectos mineros. Aquellas entidades poligonales de carácter binario fueron complementadas con áreas de influencia a 1 y 2 km de distancia, y de igual manera, los atributos se re-categorizaron de acuerdo al nivel de restricción ambiental a los proyectos de extracción de minerales. Una vez los atributos de los criterios fueron reclasificados en una escala numérica ordinal, se procedió al proceso de normalización de acuerdo a:

$$v_i = \frac{V_i}{(\sum V_i^2)^{1/2}}$$

Donde **V** corresponde al vector de evaluaciones de las alternativas correspondientes a cierto criterio genérico, el cual permite comparar de forma adimensional y a cabalidad los valores normalizados de los criterios considerados en la zonificación minero-ambiental. Adicional a la normalización, se calculó la predicción de los valores en una tendencia lineal de 0 a 1 mediante una regresión lineal, de tal manera que se distribuyeran en todo el intervalo (Barba, 1987).

Vector de pesos

El método Saaty corresponde a un procedimiento diseñado para cuantificar las preferencias del decisor con respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios incluidos en el proceso de análisis, cuyo objetivo apunta a la construcción de un vector de prioridades o pesos que permitan la evaluación jerárquica de los criterios en consideración, respondiendo a la necesidad de asignar un valor numérico a cada criterio que represente la preferencia del decisor. Inicialmente fue configurada una matriz cuadrada con las comparaciones pareadas de criterios de acuerdo a la Tabla 2, la cual describe una escala previamente establecida que define la correspondencia entre la valoración cualitativa del decisor y una asignación numérica (Saaty, 1990).

Tabla 2. Escala fundamental de Saaty.

Escala numérica	Escala cualitativa
1	Importancia equitativa entre criterios.
3	Importancia moderada de un criterio sobre otro.
5	Importancia fuerte de un criterio sobre otro.
7	Importancia muy fuerte de un criterio sobre otro.
9	Importancia extrema de un criterio sobre otro.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios de importancia entre juicios adyacentes.
Incrementos decimales	Valores decimales en incrementos de mayor precisión.

Fuente: modificado de (Saaty, 1994).

En la determinación de los pesos del decisor, con el uso de la escala fundamental de Saaty, se construyó una matriz R en la que r_{ij} representa la prioridad relativa entre los criterios C_i y C_j en relación al objetivo del análisis de múltiples criterios; la matriz se caracteriza por ser cuadrada y recíproca, donde $r_{ij} * r_{ji} = 1$ (Saaty, 1990):

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

A continuación se obtuvo la matriz normalizada R_{Norm} dividiendo cada elemento de la j -ésima columna por la suma de los valores de la respectiva columna:

$$R_{Norm} = \begin{pmatrix} r_{ijNorm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \end{pmatrix}$$

El vector de pesos \hat{w} se calculó promediando cada fila de la matriz normalizada:

$$\hat{w} = \hat{w}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{njNorm}$$

Dado que los pesos no son conocidos y la matriz de comparaciones R se construye bajo la subjetividad del decisor, R contiene inexactitudes con respecto a la matriz de pesos verdaderos, en la cual el rango es 1 debido a su condición recíproca y por ende presenta un autovalor distinto de 0 (λ), el cual se caracteriza por dar lugar a un múltiplo escalar de sí mismo cuando es transformado; de modo que la suma de los autovalores de una matriz es igual a la suma de los valores de la diagonal principal, donde todos los elementos son iguales a 1 y puede afirmarse que el autovalor distinto de 0 de la matriz de pesos verdaderos es igual a la dimensión de la matriz cuadrada, es decir igual a n ($\lambda = n$). Las inexactitudes de la matriz R pueden originar valores distintos de 0, así que el máximo valor de λ (λ_{max}) está asociado a un vector propio que se considera aproximado al vector de pesos \hat{w} (Alonso & Lamata, 2006; Jiménez, 2002):

$$R * \hat{w} = \lambda_{max} * \hat{w}$$

El grado de inconsistencia de los juicios del decisor durante las valoraciones de los pesos fue estimado con el índice de consistencia IC:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{1}{n(n - 1)} \sum_{i=j}^n (e_{ij} - 1)$$

Donde $e_{ij} = w_j / w_i$.

El IC puede computarse con el índice de consistencia aleatorio IA, el cual es obtenido con la simulación de 500.000 matrices recíprocas de Saaty generadas aleatoriamente. El cociente entre IC e IA estima la razón de consistencia RC:

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Dado el valor de RC, se considera que la matriz R es completamente consistente si $RC = 0$, R presenta una inconsistencia admisible y el vector de pesos se admite como válido si $RC \leq 0,1$ y R es inadmisibles si $RC > 0,1$.

Electre Tri

Corresponde a la problemática de ordenación o gamma, donde cada alternativa es considerada independiente de las otras para determinar la categoría a la cual se justifica asignarlo por medio de comparar perfiles; los resultados se expresan de forma absoluta como “asignado” o “no asignado” a una categoría. Es un modelo diseñado para asignar un conjunto de alternativas (a) a categorías (C), ordenadas de la peor (C1) la mejor (Ck). Cada categoría debe ser definida entre un nivel inferior y uno superior, donde $C = (C1, \dots, Ch, \dots, Ck)$ corresponden al conjunto de categorías; la asignación de los a objetos en cierta categoría Ch es el resultado de la comparación de a con los niveles superiores e inferiores de las categorías, siendo bh el límite superior de la categoría Ch y el límite inferior de la categoría Ch+1, para todo nivel $h = 1, \dots, k$. Para un límite de categoría bh dado, la comparación se basa en la credibilidad de las afirmaciones de superación S: $aSbh$ y $bhSa$ por medio de un índice, el cual se define por los índices de concordancia y discordancia para cada criterio gj; el índice de concordancia $c_j(a, b)$ se calcula para cada par de alternativas (a, b) en

términos de cada uno de los criterios (Lima & Salazar, 2011; Tervonen et al. 2009):

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(a) + q_j(g_j(a)) \geq g_j(b) \\ 0 & \text{si } g_j(a) + p_j(g_j(a)) \leq g_j(b) \\ g_j(a) + q_j(g_j(a)) < g_j(b) < g_j(a) + p_j(g_j(a)), & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Donde $q_j(\cdot)$ y $p_j(\cdot)$ son respectivamente los umbrales de indiferencia y preferencia para el criterio c_j .

El cálculo del índice de discordancia $d_j(a, b)$ para todas las alternativas en términos de cada uno de los criterios se realiza de acuerdo con:

$$d_j(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_j(b) \geq g_j(a) + v_j(g_j(a)) \\ 0 & \text{si } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a)) \\ g_j(a) + p_j(g_j(a)) < g_j(b) < g_j(a) + v_j(g_j(a)), & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Donde $v_j(\cdot)$ es el umbral de veto para el criterio c_j , si no se considera umbral de veto, entonces $d_j(a, b) = 0$ para todos los pares de alternativas.

Finalmente, el índice de credibilidad $p(a, b)$ se define como:

$$p(a, b) = \begin{cases} c(a, b), & \text{si } d_j(a, b) \leq c(a, b), j = 1, \dots, n \\ c(a, b) \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - c_j(a, b)}, & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Donde $c(a, b) = (\sum_{m=1}^n w_m c_m(a, b)) / (\sum_{m=1}^n w_m)$.

$J(a, b)$ corresponde al conjunto de criterios para los cuales $d_j(a, b) > c(a, b)$; el índice de credibilidad es una medida de la fuerza de la afirmación “la alternativa a es al menos tan buena como la alternativa b” – aSb . Nótese que cuando $d_j(a, b) = 1$, implica que $p(a, b) = 0$, puesto que $c(a, b) < 1$.

Una vez se determina el índice de credibilidad, debe calcularse el nivel de relación difusa corte- λ ; el cual se define como el índice de credibilidad de menor valor compatible con la afirmación aSb_h . Siendo P preferencia, I indiferencia, R la no comparabilidad de la relación binaria, a la alternativa y b_h la categoría, pueden relacionarse unos a otros de la siguiente forma (Lima & Salazar, 2011):

aIb_h si **aSb_h** y **b_h Sa**
aPb_h si **aSb_h** y no **b_h Sa**
b_h Pa si no **aSb_h** y **b_h Sa**
aRb_h si no **aSb_h** y no **b_h Sa**

El objetivo del procedimiento de implementación corresponde a la incorporación de las relaciones binarias a las asignaciones particulares de acuerdo a la lógica conjuntiva o disyuntiva. La lógica conjuntiva u optimista es aquella donde una alternativa puede asignarse a una categoría cuando su evaluación sobre cada criterio es al menos tan buena como el límite inferior definido en el criterio para estar en esa categoría, la alternativa es asignada a la categoría más alta que cumple esta condición; mientras que la lógica disyuntiva o pesimista asigna la alternativa a una categoría si en al menos un criterio la evaluación es al menos tan buena como el límite inferior definido sobre ese criterio para estar en esa categoría, de igual forma, el objeto es asignado a la categoría más alta que cumpla esa condición. Una vez realizada la implementación del modelo y la ordenación de las alternativas en las categorías dadas, debe considerarse que algunos de los valores del modelo de múltiples criterios subjetivos, principalmente los pesos de los criterios y el puntaje de las alternativas; lo cual implica que debe estimarse qué tan sensible es la clasificación de las alternativas a los cambios de los parámetros de entrada del modelo propuesto (Fülöp, 2004). Cuando el peso de un criterio es modificado, los coeficientes de

concordancia y discordancia se alteran al mismo tiempo; el análisis de sensibilidad para pesos involucra consideraciones simultáneas de los efectos sobre los demás parámetros, lo cual es de mayor complejidad que los análisis de sensibilidad sobre otras variables (Vetschera, 1986). Por lo tanto, el valor del peso de cada criterio fue variado con el fin de conocer el límite superior e inferior del valor original, entre los cuales la solución no se modifica, con lo cual es posible estimar la sensibilidad del modelo final con respecto a cada criterio (Carvajal & Zuluaga, 2006; Forman & Selly, 2001).

Modelamiento

Una vez se determinó el vector de pesos, se procedió al modelamiento, el cual fue realizado en dos fases e igual número de programas informáticos, la inferencia y exploración de las relaciones de superación se realizaron en Diviz 1.15.1 y la implementación de la ordenación de las alternativas en el módulo Electre Tri de QGIS.

El proyecto Decision Deck, a cargo de una organización francesa sin ánimo de lucro llamada Decision Deck Consortium, desarrolla de forma colaborativa herramientas informáticas de código abierto, de aplicación en el apoyo a la toma de decisiones con múltiple criterios (MCDA); su objetivo es ofrecer a profesionales y académicos una plataforma integrada para la implementación de métodos MCDA disponibles en la actualidad, facilitando la prueba y comparación de las metodologías desarrolladas. El uso del proyecto requiere del estándar XMCDA, el cual permite representar elementos del MCDA en lenguaje XML de acuerdo a una gramática definida; el XMCDA hace parte del lenguaje universal de análisis de decisión de múltiple criterios (UMCDA-ML), una iniciativa del proyecto Decision Deck para expresar conceptos del MCDA y su lenguaje de modelación de forma unificada, lo

cual facilita la interacción, ejecución y representación visual de diferentes algoritmos, conceptos y estructuras de datos en la resolución del mismo problema. Diviz 1.15.1 corresponde a un programa informático que implementa algoritmos MCDA de forma modular y permite descomponerlos en sub-sistemas, su diseño en flujogramas facilita una interfaz gráfica intuitiva al usuario, donde los algoritmos están representados por cajas que pueden vincularse a archivos de datos y procesos de cálculo suplementarios por medio de conectores; por consiguiente, el diseño de flujos de trabajo de algoritmos complejos solo requiere del entendimiento de la funcionalidad de cada módulo de cálculo (Cailloux et al. 2013; Ros, 2011).

La exploración e inferencia de las relaciones de superación, y demás parámetros necesarios para la posterior implementación del modelo Electre Tri, se realizó en Diviz 1.15.1, para lo cual fue indispensable, en primera instancia, la estructuración de tablas con los insumos iniciales en el formato XMCD. Las tablas estructuradas inicialmente correspondieron a listado de criterios, criterios y pesos, listado de alternativas, desempeño o puntajes de los criterios en las alternativas o entidades poligonales, listado de perfiles o definición de categorías de ordenación y los perfiles o umbrales de criterios definidos para las categorías de ordenación de alternativas.

Definidas las relaciones de superación y los parámetros durante la fase de inferencia y exploración, se procedió a la implementación del modelo mediante el módulo Electre-Tri de QGIS 2.16.2. El módulo consta de una ventana con cuatro pestañas, en la primera se carga la capa vectorial poligonal, cuya tabla contiene en los registros las alternativas correspondientes a las entidades espaciales y en los campos incluyen las valoraciones para cada uno de los criterios; además de cargar la capa cartografía de criterios descrita

anteriormente, los atributos de la capa se despliegan y deben seleccionarse únicamente aquellos que corresponden a criterios, posteriormente se asigna el vector pesos y su dirección. En las sucesivas pestañas se definen los valores del perfil, es decir las valoraciones de los criterios que delimitan las categorías en las cuales van a ordenarse las alternativas y los umbrales de preferencia, indiferencia y veto. Posteriormente se especifican los demás parámetros estimados en la fase de inferencia y exploración de las relaciones de superación, los cuales corresponden al nivel de corte definido como el índice de credibilidad de menor valor compatible con las relaciones de superación y la lógica optimista o pesimista del modelo. Por último, se genera el mapa de decisión, el cual corresponde a una capa cartográfica cuyo único atributo contiene las categorías definidas para cada entidad espacial poligonal (Sobrie et al. 2013).

La Figura 2 muestra la sinopsis del modelo presentado, el cual corresponde a un proceso analítico jerárquico que estructura el problema de decisión en niveles, de acuerdo a la comprensión y perspectiva del decisor sobre la situación (Munda, 1998); en orden ascendente y para el modelo presentado, las alternativas o entidades espaciales se ordenaron en función de un conjunto de criterios ponderados por la evaluación ambiental estratégica, y que a su vez respondieron al objetivo de la zonificación minero-ambiental.

Resultados

Las tablas 3-7 presentan las estimaciones del vector de pesos, la reclasificación y normalización de los atributos de los criterios en las alternativas o entidades poligonales del área de estudio, cuya escala de medición es ordinal en todos los casos, salvo la síntesis de equipamiento (equip) que corresponde a

numérica discreta (Tabla 5). El grado de inconsistencia de los juicios del decisor fue estimado con el IC, donde el promedio de λ (24,679) indicó valoraciones consistentes en la matriz R, puesto que sus valores fueron próximos y nunca menores a n (24); el IC calculado fue de 0,029, el cual fue posteriormente computado en el cálculo del RC, con un valor de IA correspondiente a

1,658, cuya cifra es reportada por Alonso y Lamata (2006) implementando 500.000 matrices aleatorias para 24 criterios. El RC resultante fue 0,018, valor inferior a 0,1, por lo cual se considera que el vector de pesos presenta una inconsistencia admisible. A continuación se describen las evaluaciones ambientales de los criterios considerados en la modelación de la zonificación ambiental de la actividad minera en La Macarena.

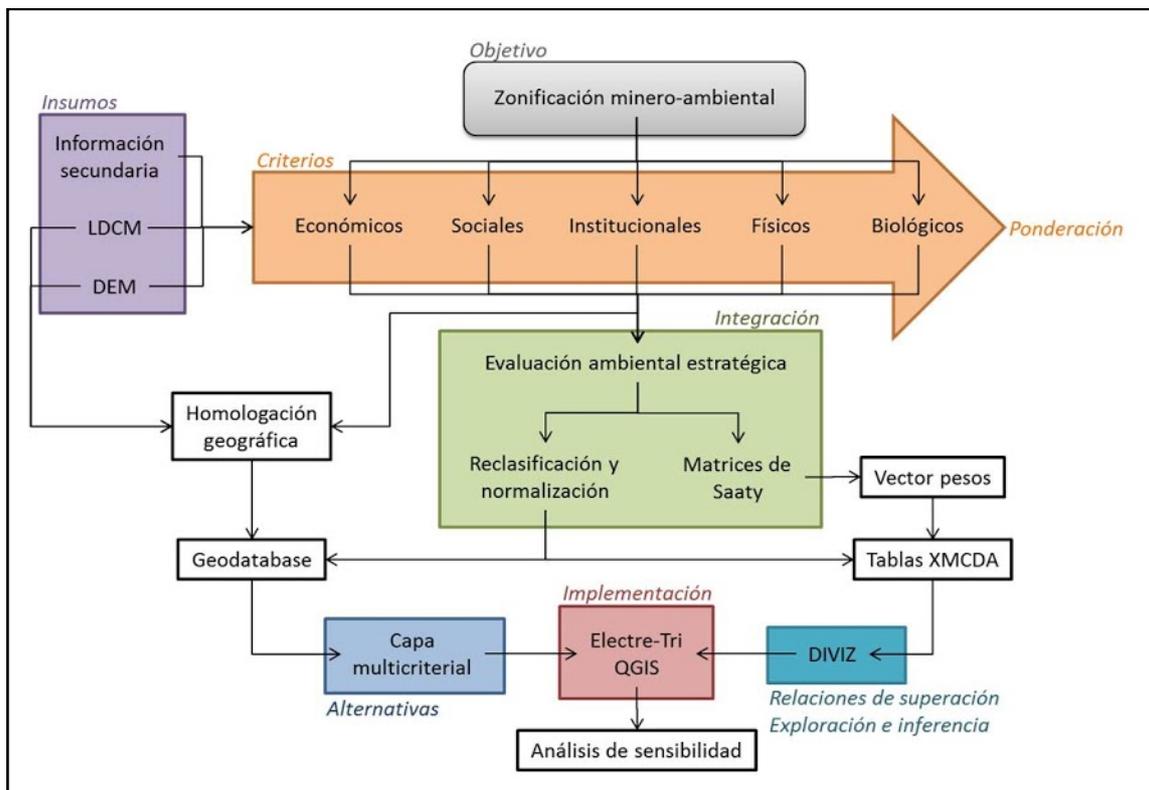


Figura 2. Sinopsis metodológica. Fuente: elaboración propia.

Criterios biológicos

Los impactos potenciales de la minería a las coberturas y usos del suelo se relacionan principalmente con la remoción de suelos, deforestación y pérdida de biodiversidad, lo cual consecuentemente, disminuye la conectividad ecológica, disponibilidad de hábitats y distribución de especies; condiciones reforzadas por la generación de ruido, gases y partículas en suspensión (Garay,

2013a,b). Los servicios ecosistémicos afectados incluirían el aprovisionamiento (madera, presas de caza, frutos silvestres, plantas medicinales) principalmente en áreas intervenidas donde no se han afectado la estructura y función de los ecosistemas; aunque la extracción maderera se inicia de forma selectiva, ésta se transformaría en tala generalizada a mediano plazo y en la conversión del suelo para otras actividades

productivas. Estas modificaciones al uso del suelo deterioran la disponibilidad y calidad de recursos y servicios ambientales al aumentar la erosión, la sedimentación de los cuerpos de agua, fraccionamiento del paisaje, extinción de especies y alteración de ciclos biogeoquímicos (PNUMA & OTCA, 2009). A su vez, las actividades mineras afectarían potencialmente los servicios de regulación (hídrica, de nutrientes y climática por secuestro de carbono e influencia de cobertura) y servicios de soporte (producción primaria, formación y retención de suelo, recursos genéticos), principalmente en áreas protegidas o no intervenidas; y los servicios de adecuación de recursos agropecuarios (provisión de alimentos cultivados, control biológico de plagas, polinización, reducción de actividad fotosintética por partículas en suspensión) en áreas transformadas para producción agropecuaria y zonas circundantes (De Groot et al. 2002; Häyhä & Franzese, 2014).

Se distinguieron 15 tipos de cobertura y usos del suelo en La Macarena (Tabla 3), los cuales fueron ponderados, de mayor a menor en su orden, las coberturas naturales (boscosas, arbustivas y herbáceas), los bosques fragmentados, los mosaicos con áreas naturales y las áreas completamente transformadas. La cobertura natural de mayor extensión corresponde al bosque alto denso de tierra firme con el 24,8 % del área del Municipio, el cual se localiza principalmente dentro de los Parques Nacionales Naturales (PNN) Tinigua y La Macarena y dentro del resguardo indígena Llanos del Yará, seguido por el herbazal denso de tierra firme no arbolado con el 9,9 % del área, localizado en las sabanas fuertemente onduladas al Sur de la cabecera municipal y que se extienden más allá del río Tunia. Los bosques fragmentados suman el 18,5 % de la superficie de La Macarena, se encuentran diseminados como relictos entre las áreas con procesos de recientes de conversión de coberturas

naturales a potreros. En cuanto a los mosaicos con espacios naturales, predominan los pastos, que corresponden la cobertura dominante en el área de estudio con el 31,5 % del total. Los mismos evidencian procesos de deforestación para instaurar potreros cada vez más lejanos de los núcleos de población y vías fluviales y terrestres de comunicación, los cuales a su vez demuestran la ampliación de los frentes de colonización, principalmente hacia San José del Caguán, en el costado occidental del Municipio, y hacia San José del Guaviare en el costado Oriental (Figura 3).

Los eventuales impactos de la minería a los ecosistemas acuáticos se relacionan con la remoción de sedimentos, profundización de mantos y afectación del nivel freático, desvío de cauces, alteración de caudales y el vertimiento de contaminantes y partículas en suspensión, lo cual aumenta la turbidez, dureza y temperatura del agua, altera la dinámica fluvial y los niveles freáticos, disminuye la estabilidad de taludes, restringe la navegabilidad y disminuye la abundancia y diversidad de organismos acuáticos (Fierro, 2012). De acuerdo a lo anterior, los servicios ecosistémicos impactados incluirían el aprovisionamiento (pesca, agua), regulación (hídrica), adecuación de recursos de transporte (navegación) (De Groot et al. 2002; Häyhä & Franzese, 2014). La Tabla 3 muestra el vector de pesos y la respectiva reclasificación y normalización de los criterios biológicos considerados.

Criterios físico-químicos

Los criterios físico-químicos considerados en la zonificación minero-ambiental corresponden principalmente a las condiciones edafológicas y de susceptibilidad a eventos adversos. De acuerdo a estos criterios, los servicios ecosistémicos que podrían afectarse por la actividad minera corresponden a los de adecuación de recursos agropecuarios, principalmente por remoción de suelos, alteración de niveles freáticos y

vertimiento de sustancias acidificantes. A su vez, estas condiciones aumentan la susceptibilidad a incendios, desertificación, inundaciones y erosión en zonas bajo influencia minera.

La pendiente es un factor directamente proporcional de fenómenos como la erosión, la desertificación, la propagación de incendios y el drenaje del suelo. En La Macarena prevalecen las pendientes inferiores a 12 % con el 70,0 % del área, estas zonas se asocian a terrazas y planos de inundación en los márgenes de los ríos principales, vallecitos con predominio de bosques de galería, y lomeríos y mesetas localizadas principalmente al sur de los ríos Losada y Guayabero. Les siguen las pendientes de 12 a 40 % que

ocupan el 29,6 % del área considerada, estas pendientes están asociadas principalmente a las crestas de la Sierra de La Macarena y lomas entre los ríos Guayabero y Losada. Con menor representatividad, ocupando el 0,4 % del territorio, se encuentran las pendientes entre 40 y 70 %, las cuales forman filas y vigas de la cordillera Oriental en el extremo nor-occidental del Municipio. La degradación de un recurso limitado como el suelo puede conducir a la ruptura del equilibrio ecosistémico (López & Romero, 1998), la susceptibilidad a la erosión en La Macarena es nula en el 90,2 % del territorio, mientras que el área restante presenta algún nivel de susceptibilidad, particularmente en zonas de herbazales fuertemente ondulados.

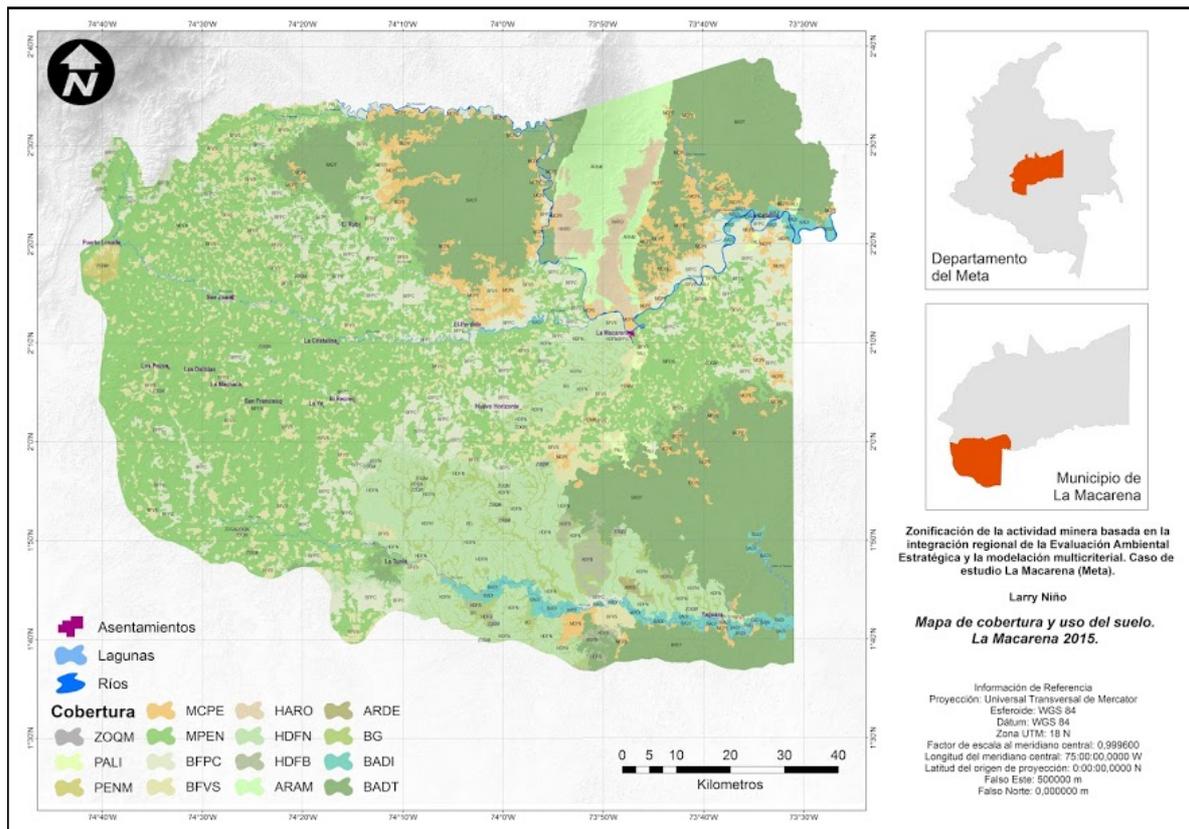


Figura 3. Cobertura y uso del suelo en La Macarena. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3: Vector de pesos de los criterios biológicos.

Criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Principales cursos de agua	0,1077	Curso de agua	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área sin influencia hídrica	1	0,00
Cobertura y uso del suelo	0,1399	Bosque alto denso de tierra firme (BADT)	15	1,00
		Bosque alto denso inundable heterogéneo (BADI)	14	0,93
		Bosque de galería (BG)	13	0,86
		Matorral denso (ARDE)	12	0,78
		Matorral abierto mesófilo (ARAM)	11	0,71
		Herbazal denso de tierra firme con arbustos (HDFB)	10	0,64
		Herbazal denso de tierra firme no arbolado (HDFN)	9	0,57
		Herbazal abierto rocoso (HARO)	8	0,50
		Bosque fragmentado con vegetación secundaria (BFVS)	7	0,43
		Bosque fragmentado con pastos y cultivos (BFPC)	6	0,36
		Mosaico de pastos con espacios naturales (MPEN)	5	0,29
		Mosaico de cultivos y pastos con espacios naturales (MCPE)	4	0,21
		Pastos enmalezados (PENM)	3	0,14
		Pastos limpios (PALI)	2	0,07
Zonas quemadas (ZOQM)	1	0,00		

Fuente: elaboración propia.

El efecto de la reducción de la cobertura vegetal es acumulativo en las cuencas hidrográficas, puesto que el volumen de agua que deja de percibir un área que ha sido deforestada es proporcional a la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, así como a la biomasa removida. Si disminuye la cobertura vegetal, a su vez se reduce la evapotranspiración y aumenta la erosión del suelo y el drenaje superficial, afectando la regulación del ciclo hidrológico y aumentando

el riesgo de inundaciones (Troncoso et al. 2007). Por otra parte, los humedales se hallan entre los ecosistemas más productivos y de mayor importancia ecológica del planeta, debido a que gran parte de su superficie se encuentra temporal o permanentemente anegada a lo largo del año, lo cual determina una elevada productividad y un importante papel funcional en numerosos procesos ecosistémicos. Además, albergan una biota particularmente rica y abundante tanto en

especies vegetales como animales, muchas de las cuales constituyen recursos esenciales para el hombre (Bó & Malvárez, 1999). En la zona de estudio, el 78,5 % del área corresponde a zonas no inundables, mientras que el área inundable ocupa el 14,6 % de La Macarena, en zonas circundantes a los ríos principales.

Las principales consecuencias de la desertificación corresponden a la reducción de los rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales y pérdida de biodiversidad; lo cual, desde el punto de vista social, genera empobrecimiento, migración, desplazamientos internos y deterioro de la calidad de vida de la población (Sierra et al. 2015). En la Macarena predominan las áreas no susceptibles a desertificación, las cuales ocupan el 97,0 % del área considerada, mientras que las áreas con alta susceptibilidad registran el 1,9 % del Municipio y se localizan principalmente en los herbazales fuertemente ondulados cercanos a la cabecera municipal.

La degradación de los ecosistemas ocasionada por la tala de árboles, los hace más susceptibles al fuego, puesto que aumenta la inflamabilidad de las áreas descubiertas y disminuye la precipitación como consecuencia de la disminución de la captación y retención de humedad. Adicionalmente, la tala y el cambio climático, que origina sequías prolongadas, incrementan los incendios forestales, generando pérdida de biomasa, extinciones y desplazamientos locales de fauna, emisión de partículas en suspensión y gases de efecto invernadero. Esto a su vez altera los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, afectan las tasas fotosintéticas y modifican el albedo; asimismo, afectan infraestructura y recursos agropecuarios, generan pérdidas humanas y económicas y costos de supresión (Amaya & Armenteras, 2012; Fernside, 2005). En la zona de estudio predominan las áreas con baja susceptibilidad a incendios con el 74,6 % del territorio, las áreas con susceptibilidad

muy alta ocupan el 5,5 % del área considerada, particularmente en zonas de herbazales fuertemente ondulados, mientras que la susceptibilidad alta se presenta en el 12,7 % de La Macarena, en áreas de pastizales introducidos en el frente de colonización de San Vicente del Caguán.

En La Macarena, los suelos con mejores condiciones para actividades agropecuarias y susceptibles a afectarse por la remoción originada en prácticas mineras corresponden a aquellos con fertilidad media, en el 5,2 % del territorio y ubicados en la vertiente oriental de la Sierra de La Macarena, al costado Sur del río Losada y entre los núcleos de población San Juan y La Cristalina. Existe predominio de suelos údicos presentes en el 86,5 % del área, los suelos con buen y excesivo drenaje se encuentran en el 4,6 % del Municipio, principalmente en la margen Norte del río Tunia; los suelos moderadamente profundos y profundos ocupan el 3,5 % del territorio, ubicados en el margen Norte del río Tunia; los suelos ácidos, presentes en la vertiente oriental de la Sierra de La Macarena y a lo largo de los ríos Tunia, Losada y Perdido, ocupan el 10,6 % del territorio y los suelos de bajo contenido de aluminio, presentes en el 3,4 % del área están asociados a afluentes menores de los ríos Guayabero, Losada y Tunia, donde frecuentemente soportan bosques de galería. La Tabla 4 muestra el vector de pesos y la respectiva reclasificación y normalización de los criterios físico-químicos considerados.

Criterios institucionales

Desde el ámbito nacional y municipal, se han protegido o restringido áreas de interés ambiental y cultural de actividades como la minería, que puedan alterar el valor ecológico, paisajístico o ancestral. El área de estudio incluye parte del Área de Manejo Especial La Macarena (AMEM), creada a través del decreto 1989 en 1989, con una extensión de 29.837,4 km² en los municipios de Lejanías,

El Castillo, Granada, Vista hermosa, Guamal, Cubarral, Puerto Lleras, Fuente de Oro, Mesetas, San Juan de Arama, Puerto Concordia, Uribe, Puerto Rico y La Macarena, pertenecientes al departamento del Meta; y San José, El Retorno y Calamar en el departamento del Guaviare. El AMEM está

conformada por los PNN Sierra de La Macarena y Tinigua, los PNN Picachos y Sumapaz, en la jurisdicción del Meta, y los distritos de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables de La Macarena, Ariari y Guayabero (Cordepaz, 2012).

Tabla 4. Vector de pesos de los criterios físico-químicos.

Criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Nivel de aluminio en el suelo	0,0300	Bajo	4	1,00
		Medio	3	0,70
		Medio y alto	2	0,30
		Alto	1	0,00
Nivel de acidez el suelo	0,0332	Acido	3	1,00
		Fuertemente ácido y ácido	2	0,50
		Fuertemente ácido	1	0,00
Profundidad del suelo	0,0366	Moderadamente profundo y profundo	5	1,00
		Moderadamente profundo	4	0,80
		Moderadamente profundo y superficial	3	0,50
		Superficial y moderadamente profundo	2	0,30
		Superficial	1	0,00
Nivel de drenaje del suelo	0,0405	Bueno y excesivo	7	1,00
		Bueno	6	0,80
		Bueno e imperfecto	5	0,70
		Bueno y pobre	4	0,50
		Pobre y bueno	3	0,30
		Pobre e imperfecto	2	0,20
		Pobre	1	0,00
Nivel de humedad del suelo	0,0447	Údico	4	1,00
		Údico y ácuico	3	0,70
		Ácuico y údico	2	0,30
		Ácuico	1	0,00
Nivel de fertilidad del suelo	0,0404	Media	2	1,00

criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Nivel de fertilidad del suelo	0,0424	Baja	1	0,00
Susceptibilidad a incendios	0,0545	Muy alta	5	1,00
		Alta	4	0,80
		Moderada	3	0,50
		Baja	2	0,30
		Muy baja	1	0,00
Susceptibilidad a desertificación	0,0601	Alta	3	1,00
		Baja	2	0,50
		Área no desertificable	1	0,00
Susceptibilidad a inundación	0,0668	Área inundable	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área no inundable	1	0,00
Nivel de erosión	0,0728	Moderada	3	1,00
		Ligera	2	0,50
		Área no erosionable	1	0,00
Nivel de pendientes	0,0804	41-70 %	6	1,00
		26-40 %	5	0,80
		13-25 %	4	0,60
		6-12 %	3	0,40
		3-5 %	2	0,20
		0-2 %	1	0,00

Fuente: elaboración propia.

El área de los PNN Sierra de la Macarena y Tinigua ocupan el 23,2 % del Municipio (Figura 1), en estos PNN dominan las coberturas naturales correspondientes a bosques altos densos de tierra firme con un 53,9 % del área, seguidos por matorrales abiertos mesófilos con el 12,6 %. Aunque se prohíben las actividades agropecuarias dentro de los parques, en el 16,3 % del área de los PNN en La Macarena se presentan coberturas correspondientes a mosaicos de zonas agropecuarias con espacios naturales, y el 0,2 % se encuentra ocupado por pasturas

introducidas. A su vez, se evidencian actividades de extracción selectiva de recursos ambientales y ampliación de la frontera agrícola en bosques fragmentados con vegetación secundaria, pastos y cultivos, algunos de ellos ilícitos, en el 8,4 % del área de parques en el Municipio. Asimismo, a pesar de las restricciones, el 0,9 % de los PNN en La Macarena han sido incluidos en solicitudes mineras, particularmente para la explotación de minerales de manganeso y demás concesibles durante el 2011. Por otra parte, y con respecto a las áreas de influencia

cocalera, el 6,2 % del área de los PNN en La Macarena ha sufrido afectación durante el periodo 2010-2013, particularmente en los márgenes de los ríos Perdido y Guayabero y en las inmediaciones de la trocha ganadera que va hacia Vistahermosa. De acuerdo al decreto 2278 de 1953, los bosques protectores son aquellos que por conveniencia se deben conservar con el fin de mantener cuencas abastecedoras de agua, embalses o acequias, o bien evitar desprendimientos de suelo y rocas, sujetar terrenos, mantener vías de comunicación, regularizar cursos de agua o como contribución a la salubridad; en estos bosques no se permite el aprovechamiento comercial de maderables ni remoción de suelo, su uso debe garantizar la conservación de la comunidad vegetal, las fuentes hídricas y la fauna. El Esquema de Ordenamiento Territorial EOT de La Macarena señala que el 6,1 % del área municipal está declarada como bosques protectores, particularmente en la región sur-oriental del área de estudio.

Las siete áreas de reserva forestal constituidas por la Ley 2 de 1959, tienen como objetivo el desarrollo de la economía forestal y la protección de suelos, aguas y biodiversidad; aunque no son áreas protegidas, la Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) ha desarrollado procesos de zonificación y ordenamiento, con el fin de generar los lineamientos ambientales como insumo planificador para distintos sectores productivos del país, al margen de generar cambios en el uso del suelo y modificaciones a la naturaleza de la reserva forestal. La Macarena incluye áreas de la reserva forestal de la Amazonía, zonificadas bajo la resolución 1925 de 2013; estas áreas de reserva ocupan el 5,6 % del municipio y pertenecen a la zonificaciones A y B. Las zonas A, localizadas al Sur del Municipio, buscan garantizar el mantenimiento de los procesos ecológicos

básicos necesarios para asegurar la oferta de servicios ecosistémicos, relacionados principalmente con la regulación hídrica y climática, la asimilación de contaminantes del aire y del agua, la formación y protección del suelo, la protección de paisajes singulares y de patrimonio cultural y el soporte a la diversidad biológica. Las zonas B, localizadas en los costados Oriental y Occidental del área de estudio, están caracterizadas por tener coberturas favorables para un manejo sostenible del recurso forestal, mediante un enfoque de ordenación y gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Los resguardos indígenas corresponden a territorios reconocidos a las comunidades indígenas que poseen títulos de propiedad privada colectiva, se rigen por un sistema normativo propio, con pautas y tradiciones culturales que orientan sus labores sociales y económicas. Los resguardos indígenas tienen el objetivo de facilitar el cumplimiento de la función social y ecológica de la propiedad por parte de las comunidades, de acuerdo a sus usos o costumbres, a la preservación del grupo étnico y al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes (Contraloría General de La República, 2012). La densidad poblacional nativa podría afectarse severamente por la creciente inmigración de otros grupos poblacionales hacia sus territorios por la minería, los cuales traen consigo cambios sociales, económicos y ambientales que propician en los indígenas su desintegración social y cultural, asimilación a otros grupos poblacionales y la incapacidad de auto-reproducirse (Brack & Yáñez, 1997). A su vez, los inmigrantes desencadenan a menudo brotes de enfermedades al transportar agentes etiológicos que entran en contacto con nativos sin vacunación, sin acceso a métodos de prevención y con costumbres que aumentan el riesgo de infecciones o contagios, tal es el caso de patologías que han aumentado su incidencia entre los nativos como la tuberculosis, cuya

transmisión es facilitada por costumbres culturales que incluyen el hacinamiento; y el VIH, cuyos métodos de prevención no son comunes entre los indígenas (PNUMA & OTCA, 2009).

El resguardo Llanos del Yari corresponde a un área de protección multiétnica que congrega a las etnias Pijao, Piratapuyo, Tucano, Nasa y colonos campesinos provenientes de La Macarena, Arauca, Vaupés y Tolima. Su territorio comprende una vasta zona de selva y sabanas, a orillas del río Tunia en la intersección de los departamentos del Meta, Caquetá y Guaviare (Vélez, 2012). En La Macarena, el resguardo Llanos del Yari ocupa el 11,5 % del territorio, en la zona sur-oriental del Municipio (Figura 1). La Tabla 5

muestra el vector de pesos y la respectiva reclasificación y normalización de los criterios institucionales considerados.

Criterios sociales

El aumento potencial de la densidad poblacional humana por efecto de las actividades mineras, incrementaría la demanda de bienes y servicios, tales como alimento, energía y agua, superando la capacidad de carga de los frágiles ecosistemas y promoviendo su degradación. A su vez, generaría inseguridad alimentaria al incrementar los costos de actividades agropecuarias ocasionadas por pérdida de servicios del ecosistema y su efecto en mayor demanda de agroquímicos.

Tabla 5: Vector de pesos de los criterios institucionales.

Criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Resguardos indígenas	0,0195	Resguardo indígena	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área sin resguardo	1	0,00
Áreas de reserva Ley 2 de 1959	0,0215	Reserva forestal	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área sin reserva	1	0,00
Bosques protectores declarados	0,0237	Bosque protector	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área sin bosque protector	1	0,00
Parques Nacionales Naturales	0,0261	Parque Nacional Natural	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área sin PNN	1	0,00

Fuente: elaboración propia.

Igualmente, se agudizarían los conflictos sociales por acceso al suelo, se incrementaría la vulnerabilidad frente al cambio climático y se extendería la incidencia de enfermedades tropicales como la fiebre amarilla, enfermedad de chagas, leishmaniasis y malaria (PNUMA & OTCA, 2009), así como aquellas patologías producidas por la emisión de partículas suspendidas y vertimiento de sustancias contaminantes a fuentes hídricas. La densidad poblacional del Municipio se concentra en el 1,4 % del territorio, particularmente en las veredas Altamira, El Centro, La Unión I, Los Pinos, Pailas, Playa Rica, San Juan de Lozada y Villa Rica, las cuales registran más de siete habitantes por km²; mientras que en la mayor parte del área de La Macarena predomina una densidad de 1 a 4 personas por km² en el 77,4 % del Municipio.

Los núcleos de población se han conformado en las riberas de los afluentes principales, particularmente en los ríos Guayabero, Losada y Tunia, y en la vía que conduce hacia San Vicente del Caguán. Fueron promovidos por las dinámicas comerciales rurales originadas por el cultivo de la coca desde la década de 1970 y por la articulación de medios de transporte fluvial y terrestre entre la población mayoritariamente rural, la cual suma el 87,8 % de la población del Municipio (Concejo Municipal La Macarena, 2012). Los impactos potenciales de las actividades mineras en núcleos urbanos se relacionan con afectación de infraestructura, particularmente vías de acceso; deterioro paisajístico, crecimiento urbano no planificado, pérdida del valor comercial del suelo, segregación urbana, incremento en la generación de residuos, precariedad de servicios públicos y surgimiento de focos de violencia, drogadicción y prostitución (MAVDT, 2005). De acuerdo a la información contenida en el EOT y al trazado de cuencas sobre el Aster GDEM, las cuencas abastecedoras de agua ocupan el 7,8 % del territorio de La

Macarena, correspondientes a afluentes menores de los ríos Losada y Guayabero (Figura 1); las actividades de minería en estas áreas podrían alterar el ciclo hidrológico por deforestación o remoción de suelo y disminuir la calidad del recurso por vertimiento de sustancias contaminantes.

El nivel de equipamiento en las veredas fue sintetizado como la suma de presencias de los estamentos correspondientes a establecimientos comerciales, mataderos, casas comunitarias, botiquines comunitarios, infraestructuras recreativas, establecimientos religiosos, cementerios, centros de salud y centros educativos. La mitad de los centros poblados cuentan con centros de salud, destacándose el ubicado en la cabecera municipal que cuenta con servicios de baja complejidad. En los demás centros de salud, la atención es de carácter básica, su infraestructura es deficiente y presentan intermitencia en la prestación de servicios debido a la escasez de dotación y personal médico. La ubicación de las veredas que cuentan con centros médicos dentro de su territorio, sigue el mismo patrón de densidad de poblamiento. La Macarena cuenta con tres Instituciones Educativas y seis Centros Educativos con 36 y 74 sedes respectivamente, la totalidad de Centros Educativos son de carácter académico; se cuentan en total 151 aulas, 151 docentes y 12 directivos, lo cual se considera insuficiente para el Municipio, donde se estima la existencia de 43 alumnos por docente (Alcaldía La Macarena, 2008). Las potenciales afectaciones de la actividad minera a bienes y servicios ofrecidos a la población corresponden a vandalismo, sobredemanda de servicios de salud y asistencia social, deterioro de infraestructuras públicas y deserción escolar. La Tabla 6 muestra el vector de pesos y la respectiva reclasificación y normalización de los criterios sociales considerados.

Criterios económicos

En La Macarena, es común la extracción de materiales de arrastre o agregados de río, correspondientes a balastro, arena piedra y gravilla, los cuales son usados para el mantenimiento de vías y construcción de viviendas (Sacristán, 2007). El potencial minero del Municipio es variado, en el área se encuentran conglomerados, cuarcita y areniscas de fácil explotación a tajo abierto y a bajos costos de exploración. Se evidencia abundancia de jaspes en las terrazas del río Guayabero y en las quebradas que descienden de la Sierra de La Macarena, también existe la posibilidad de encontrar diamantes en el sector del raudal Angostura del río Guayabero y las ollas de erosión, puesto que la zona corresponde a la formación Roraima, de la cual provienen los diamantes que explotan en Venezuela, Guayana y Brasil. Entre otros minerales presentes, están el hierro en forma de pisolitas, que alcanzan

hasta un metro de espesor y abarcan varios kilómetros de extensión; además es común la presencia de bauxita en pisolitas, estratificada entre areniscas y conglomerados, de distribución similar a la del hierro, razón por la cual su explotación puede llevarse a cabo fácilmente a tajo abierto. El asfalto en La Macarena se encuentra en dos formas, como manadero a través de diaclasas en las areniscas de las formaciones Losada y Roraima, y como impregnaciones de areniscas y arenas de las terrazas del río Guayabero (Paba & Van Der Hammen, 1959). De acuerdo al Catastro Minero Colombiano (CMC), en La Macarena se han otorgado siete títulos mineros de materiales de construcción y se han realizado 12 solicitudes que incluyen, además de materiales de construcción, asfaltos, minerales de manganeso, gravas, arenas y demás concesibles. Estos títulos y solicitudes ocupan 1,7 % del territorio, incluyendo zonas de PNN.

Tabla 6. Vector de pesos de los criterios sociales.

Criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Equipamiento	0,0137	1	1	0,00
		2	2	0,10
		3	3	0,30
		4	4	0,40
		5	5	0,60
		6	6	0,70
		7	7	0,90
		8	8	1,00
Cuencas abastecedoras	0,0150	Cuenca abastecedora	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Cuenca no abastecedora	1	0,00
Núcleos de población	0,0163	Núcleo de población	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30

		Baldío o disperso	1	0,00
Densidad de población	0,0179	>7 habitantes/km2	4	1,00
		5-7 habitantes/km2	3	0,70
		1-4 habitantes/km2	2	0,30
		Baldío	1	0,00

Fuente: elaboración propia.

La oferta ambiental, paisajística y acuícola generan un gran potencial eco-turístico como actividad económica en el Municipio, particularmente Caño Cristales y otros afluentes del río Guayabero son atracciones para cientos de turistas nacionales y extranjeros que visitan anualmente al PNN La Macarena y las veredas La Cachivera, Alto y Bajo Raudal, La Florida II, Altamira Y Aguazul. Las áreas con potencial turístico abarcan el 2,0 % del territorio (Figura 1), donde la minería podría afectar seriamente su valor paisajístico con actividades de deforestación, remoción de suelo, aumento de la turbidez de los atractivos hídricos, generación de partículas en suspensión y ruido.

La dinámica de establecimiento y abandono de cultivos ilícitos está asociada a la ruralización como proceso de transformaciones antrópicas de los espacios naturales, el frente de colonización que combina deforestación, cambios de cobertura del suelo a pastos para ganadería y cultivos de subsistencia e ilícitos avanza a través de hidrografía vulnerable y la presencia de bosques de tierra firme que constituyen nuevas áreas para el establecimiento de estas actividades. La influencia de esta actividad ilícita en la zona de estudio entre 2010 y 2013 abarca el 4,7 % del Municipio, lo cual es característico en paisajes de la región amazónica con suelos bien drenados, fuertemente ácidos y de baja fertilidad. Estos cultivos ilícitos se concentran en la región comprendida entre las estribaciones orientales

de la Sierra de La Macarena y el río Guayabero, especialmente dentro del PNN de la Sierra de la Macarena donde 12.816,8 ha han sido influenciadas por cultivos de coca (Secretaría de Planeación La Macarena, 2002; UNODC, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014). El 20,5 % de las veredas del Municipio tienen áreas afectadas por el cultivo ilícito, en particular la vereda Tres Chorros con el 71,4 % de su territorio, seguido por El Diamante con 67,0 % y La Unión II con 56,1 %. Las actividades mineras en zonas de influencia cocalera podrían acelerar la degradación ambiental, particularmente del suelo; a su vez, los recursos mineros serían de fácil co-optación por parte de grupo ilegales que además serían una seria amenaza para la seguridad del personal y las operaciones mineras. La Tabla 7 muestra el vector de pesos y la respectiva reclasificación y normalización de los criterios económicos considerados.

Modelo de zonificación

En la implementación del modelo en el módulo Electre Tri de QGIS, le fue cargada una capa cartográfica producto de la intersección de las 24 capas vectoriales de los criterios considerados. Esta capa cartográfica se constituyó por 5.578 entidades poligonales de mínimo 50 ha, las cuales corresponden a las alternativas a ordenar y cuyos atributos registran los valores normalizados de los criterios. Posteriormente, le fue asignado el vector de pesos a cada criterio y se definió la dirección concordante al sentido de la ordenación, que en este caso fue “máximo”

para todos, pues así se definió desde la valoración proporcional a las potenciales afectaciones de la actividad minera.

Los valores del perfil (b) para cada criterio se detallan en la Tabla 8, éstos definen las cuatro categorías en que fueron ordenadas las alternativas de acuerdo a las relaciones de superación con las valoraciones de los criterios y definidos como: áreas excluidas, áreas de restricciones mayores, áreas de restricciones medias y áreas de restricciones menores. Los perfiles fueron definidos de acuerdo con los índices de concordancia y discordancia globales, en función al desempeño de las alternativas, y a la distribución de las valoraciones normalizadas de los criterios. No fueron considerados valores de veto en el modelo, puesto que se consideraron válidas todas las afirmaciones de las relaciones de superación. Los límites de preferencia e indiferencia corresponden a los valores b1 y b3 del perfil (Tabla 7) y reflejan las diferencias entre las valoraciones y el perfil de los criterios para aceptar o invalidar condiciones preferentes. Finalmente, el nivel de corte fue estimado en 0,65 y la implementación fue realizada bajo la lógica optimista, el modelo resultante (Figura 3) corresponde a la zonificación de la actividad minera propuesto para La Macarena.

Las áreas excluidas por el modelo de zonificación minero-ambiental por su valor ecosistémico o fragilidad ambiental ocupan el 22,2 % del territorio de La Macarena, localizándose principalmente en las áreas naturales de los PNN, destacan por su importancia biológica las áreas de sabanas fuertemente onduladas, los márgenes de los ríos Tunia, Guayabero y Losada Alto y los caños Tutisera y Yarumales. Las áreas de restricciones mayores y que pueden demandar medidas de compensación ecológica ocupan el 24,4 % del área de estudio, al igual que las

áreas excluidas, se localizan principalmente en las áreas naturales de los PNN y las sabanas fuertemente onduladas, incluyendo los márgenes del río Perdido y parches boscosos al Norte del río Losada, los cuales pueden cumplir un importante papel en la conectividad ecológica del Municipio. La mayor proporción del territorio fue incluida en la categoría de áreas de restricciones medias con el 48,1 % de La Macarena, mientras que las áreas de restricciones menores se restringen al 5,2 % de la zona de estudio, distribuidas particularmente en áreas fuertemente transformadas en los frentes de colonización de San Vicente del Caguán y San José del Guaviare y en la zona de la trocha ganadera que va hacia Vistahermosa, la cual ha estado fuertemente influenciada por actividades cocaleras; las restricciones medias y bajas podrían asociarse con medidas de prevención y mitigación, más que con compensación ecológica (Figura 4).

Dada la imposibilidad de adelantar actividades mineras dentro de los PNN de acuerdo a la normatividad vigente, si se suprime esta zona del modelo la proporción de áreas excluidas de minería se reduce a 13,2 % del territorio, exceptuando las 147.705,2 ha de la categoría dentro de los PNN; aunque el área de las restricciones mayores dentro de los PNN asciende a 43.078,19 ha, la proporción de esta categoría aumenta al 27,2 % del área sin PNN. El área de restricciones medias en los PNN corresponde a 90.869,9 ha, sin embargo, la proporción de esta categoría asciende a 53,0 % en el modelo que exceptúa las áreas protegidas; finalmente, 2.536,6 ha en los PNN fueron categorizadas como de restricciones menores a las actividades mineras, lo cual representa un aumento de 1,4 puntos porcentuales de esta categoría en el modelo sin áreas protegidas.

Tabla 7. Vector de pesos de los criterios económicos.

Criterio	Peso	Atributo	Reclasificación	Normalización
Áreas con influencia cocalera	0,0074	Área cocalera	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área no cocalera	1	0,00
Sitios con potencial turístico	0,0092	Área turística	4	1,00
		Influencia a 1 km	3	0,70
		Influencia a 2 km	2	0,30
		Área no turística	1	0,00
Solicitudes y títulos mineros	0,0122	Área con interés minero	1	0,00
		Influencia a 1 km	2	0,30
		Influencia a 2 km	3	0,70
		Área sin interés minero	4	1,00

Fuente: elaboración propia.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad (Tabla 9) del modelo Electre Tri muestra que el vector de pesos admite variaciones altas en los criterios correspondientes a las dimensiones económica, social e institucional; mientras que los criterios físico-químicos y biológicos son mucho más sensibles a estas variaciones, particularmente la pendiente y la cobertura y uso del suelo. Se observa una relación directa entre el peso ponderado y la sensibilidad del modelo al criterio evaluado, evidenciada con una correlación negativa lábil (coeficiente de regresión lineal = 0,5) entre el vector de pesos y el porcentaje de variación.

Discusión

Modelos de múltiples criterios y ordenación del territorio

Los problemas de decisión espacial comúnmente involucran múltiples criterios, donde la evaluación de varios criterios, a

menudo en conflicto, toma parte en la evaluación de diversas políticas de desarrollo, incluyendo la minería. La conflictividad que caracteriza los objetivos y las preferencias de los participantes en el proceso de decisión y la evaluación de los criterios podría reducir la oportunidad de alcanzar una solución acordada por todos los actores. Por consiguiente, la investigación en la toma de decisiones espaciales es ampliamente requerida, pues considera la multiplicidad de criterios de los problemas territoriales, posibilita la interacción colaborativa de las distintas perspectivas de los decisores, permite la integración de conocimiento experto y empírico y enfoca la atención sobre la decisión sin caer en generalidades (Chakhar et al. 2005). Los procesos de decisión abiertos en el ordenamiento territorial requieren análisis múltiples y simulaciones, deben reflejar las negociaciones facilitadas por herramientas capaces de gestionar y tratar la

información eficientemente; por consiguiente, la interacción de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los análisis de múltiples criterios constituyen un recurso importante en el ordenamiento territorial, puesto que

permiten la síntesis, descripción y análisis de datos e información en el contexto espacial de las alternativas y los criterios (Joerin et al. 1998)

Tabla 8. Perfil de los criterios en la implementación del modelo Electre Tri.

Criterio		b1		b2		b3	
Cobertura y uso del suelo	Áreas de restricciones menores	0,15	Áreas de restricciones medias	0,45	Áreas de restricciones mayores	0,75	Áreas de exclusión
Principales cursos de agua		0,20		0,50		0,80	
Nivel de pendientes		0,10		0,30		0,70	
Nivel de erosión		0,20		0,40		0,60	
Susceptibilidad a inundación		0,20		0,50		0,80	
Susceptibilidad a desertificación		0,20		0,60		0,80	
Susceptibilidad a incendios		0,20		0,40		0,60	
Nivel de fertilidad del suelo		0,20		0,50		0,80	
Nivel de humedad del suelo		0,20		0,50		0,80	
Nivel de drenaje del suelo		0,25		0,60		0,75	
Profundidad del suelo		0,20		0,40		0,60	
Nivel de acidez el suelo		0,20		0,40		0,80	
Nivel de aluminio en el suelo		0,20		0,50		0,80	
Parques Nacionales Naturales		0,20		0,50		0,80	
Bosques protectores declarados		0,20		0,50		0,80	
Áreas de reserva Ley 2 de 1959		0,20		0,50		0,80	
Resguardos indígenas		0,20		0,50		0,80	
Densidad de población		0,20		0,50		0,80	
Núcleos de población		0,20		0,50		0,80	
Cuencas abastecedoras		0,20		0,50		0,80	
Equipamiento	0,20	0,50	0,80				
Solicitudes y títulos mineros	0,20	0,50	0,80				
Sitios con potencial turístico	0,20	0,50	0,80				
Áreas con influencia cocalera	0,20	0,50	0,80				

Fuente: elaboración propia.

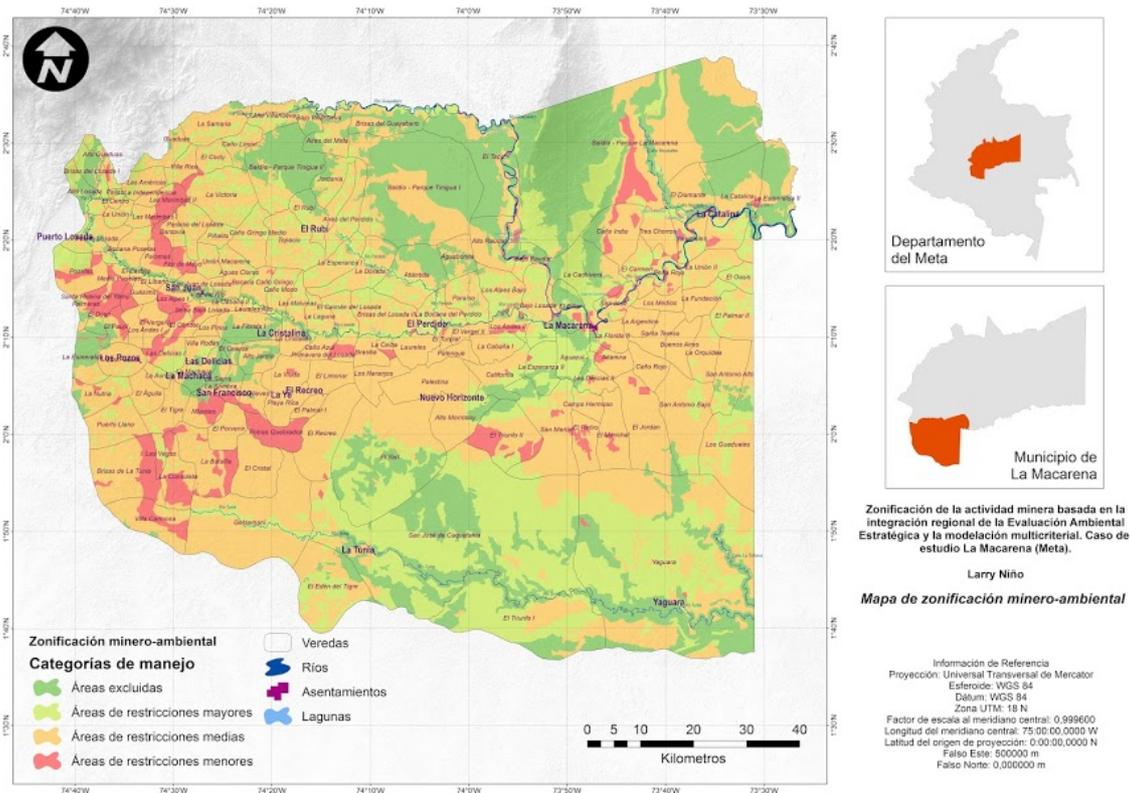


Figura 4. Zonificación minero-ambiental. Fuente: elaboración propia.

Las alternativas del modelo presentado son excluyentes y comparables entre sí. La naturaleza cualitativa de los criterios consideró una dificultad en la transformación a la escala de medida ordinal para el cálculo de las relaciones de superación y suponen un desafío en la objetividad de la valoración de la matriz de decisión y el dinamismo de las consecuencias futuras en escenarios cambiantes de la decisión. Las ponderaciones de los criterios no son fácilmente asignables, la subjetividad hace que este procedimiento incluya tanto la importancia de los criterios como el carácter compensatorio entre ellos; por consiguiente, las variaciones de la solución ante pequeños cambios en los valores del vector de pesos fueron reportados como intervalos de estabilidad, que indican los umbrales entre los cuales la zonificación no sufre modificaciones.

El análisis de sensibilidad muestra que el ordenamiento de las alternativas es afectado

por las ponderaciones de los criterios, evidenciando que la perspectiva del decisor podría cambiar radicalmente la zonificación de acuerdo a la dimensión de criterios considerada como prioritaria. En definitiva, los métodos con múltiples criterios no pretenden dar soluciones concluyentes a problemas discretos, puesto que el ordenamiento final de las alternativas puede alterarse subjetivamente de acuerdo a las valoraciones, ponderaciones, umbrales y demás parámetros que toman parte en la implementación del modelo. No obstante, aun cuando las metodologías de múltiples criterios se encuentran en etapa de estructuración y consolidación, constituyen un valioso aporte a la resolución de problemas reales de diversa naturaleza donde se busca la asignación, gestión y distribución de recursos; asimismo, los avances informáticos y de capacidad de cómputo han permitido avanzar en la resolución de las

limitaciones e inconvenientes, en parte anteriormente expuestos, y en la incursión de las técnicas analíticas de criterios múltiples en

la solución de problemas de todos los campos de la vida real (Escribano & García, 2002). .

Tabla 9. Análisis de sensibilidad sobre el vector de pesos de los criterios.

Criterio	Peso	Límite inferior de variación	Límite superior de variación	Rango de variación	Porcentaje de variación
Áreas con influencia cocalera	0,0074	0,0065	0,0078	0,0013	17,5676
Sitios con potencial turístico	0,0092	0,0076	0,0103	0,0027	29,1966
Solicitudes y títulos mineros	0,0122	0,0115	0,0132	0,0017	13,9165
Equipamiento	0,0137	0,0118	0,0145	0,0027	19,7171
Cuencas abastecedoras	0,0150	0,0132	0,0160	0,0028	18,7041
Núcleos de población	0,0163	0,0144	0,0174	0,0030	18,3794
Densidad de población	0,0179	0,0174	0,0188	0,0014	7,8297
Resguardos indígenas	0,0195	0,0177	0,0204	0,0027	13,8298
Áreas de reserva Ley 2 de 1959	0,0215	0,0205	0,0225	0,0020	9,2868
Bosques protectores declarados	0,0237	0,0219	0,0248	0,0029	12,2142
Parques Nacionales Naturales	0,0261	0,0242	0,0278	0,0036	13,7681
Nivel de aluminio en el suelo	0,0300	0,0295	0,0308	0,0013	4,3323
Nivel de acidez el suelo	0,0332	0,0327	0,0340	0,0013	3,9215
Profundidad del suelo	0,0366	0,0361	0,0378	0,0017	4,6392
Nivel de drenaje del suelo	0,0405	0,0400	0,0416	0,0016	3,9515
Nivel de humedad del suelo	0,0447	0,0442	0,0458	0,0016	3,5777
Nivel de fertilidad del suelo	0,0494	0,0477	0,0503	0,0026	5,2665
Susceptibilidad a incendios	0,0545	0,0540	0,0555	0,0015	2,7539
Susceptibilidad a desertificación	0,0601	0,0582	0,0608	0,0026	4,3292
Susceptibilidad a inundación	0,0668	0,0647	0,0675	0,0028	4,1887
Nivel de erosión	0,0728	0,0710	0,0735	0,0025	3,4354
Nivel de pendientes	0,0804	0,0798	0,0813	0,0015	1,8651
Principales cursos de agua	0,1077	0,1053	0,1083	0,0030	2,7843
Cobertura y uso del suelo	0,1399	0,1395	0,1408	0,0013	0,9289

Fuente: elaboración propia.

Integración SIG-MCDA

Durante las últimas décadas se ha evidenciado un notable progreso en la calidad y cantidad de investigaciones que integran SIG y MCDA en dos perspectivas, la tecno-positivista y la socio-política participativa; este campo multidisciplinario se ha consolidado como una sub-disciplina SIG gracias al reconocimiento de las ventajas de esta incorporación, correspondientes al SIG participativo y el soporte a la toma de decisiones espaciales. Los esfuerzos de integración SIG-MCDA han sido fundamentales para el desarrollo del paradigma de la toma de decisiones territoriales, en el cual las tecnologías de la información geográfica son directamente implementadas por decisores en políticas o escenarios de desarrollo. El mayor logro de la integración SIG-MCDA lo constituye la incorporación de juicios de valor por parte de los decisores, correspondientes a sus preferencias con respecto a la ponderación de criterios y valoración de alternativas, y la retroalimentación de sus implicaciones en la evaluación de políticas que pueden incrementar la confianza en los resultados (Malczewski, 2006). El nivel de integración SIG-MCDA puede darse a distintos niveles, no existe integración cuando la implementación del SIG y el MCDA son independientes y se transfiere la información de una herramienta a otra; en la integración débil se involucran dos sistemas en el acceso a información a través del intercambio de archivos, donde las salidas de un sistema pueden formatearse para ser usadas como entradas en el otro; en la integración fuerte los sistemas, además de tener una fuente común de datos, comparten una interfaz de usuario; finalmente, la integración completa aplica rutinas especificadas por el usuario con lenguajes de programación genéricos (Lidouh, 2013).

Si bien el presente trabajo se enfoca en el desarrollo metodológico de la decisión de ordenamiento minero, bajo la directriz de un único decisor y de acuerdo a la perspectiva tecno-positivista de la integración SIG-MCDA, es importante avanzar hacia la participación pública en la implementación del modelo de zonificación; a su vez, el nivel de integración se considera débil, puesto que la fase exploratoria MCDA de relaciones de superación se realizó en Diviz y la implementación SIG del mapa de decisión en QGIS con los parámetros estimados durante la primera fase, aunque las entradas de datos se diferenciaran únicamente en el formato de archivo, particularmente las tablas de desempeño de los criterios en cada una de las alternativas.

El mapa de decisión presentado se define como una versión avanzada del mapa geográfico convencional, el cual ha sido optimizado con el compendio de información preferencial del decisor, con relación al conjunto de la evaluación de los criterios en conflicto en una escala ordinal y destinada a visualizar la decisión espacial. Las diferencias entre el mapa de decisión y el convencional son diversas: la modelación cartográfica es un procedimiento automatizado sin interacción con los decisores, está orientada a la presentación, las preferencias de los decisores se reducen a una representación tabular sin una relación explícita a sus localizaciones y la temprana agregación simplificada en el proceso conlleva a pérdida de información preferencial; mientras que el proceso del mapa de decisión es controlado por el decisor, está orientado a la decisión, permite representación espacial de las preferencias de los decisores y la agregación basada en relaciones de superación en las últimas etapas del proceso permiten la integración de criterios cuantitativos y cualitativos al modelo (Chakhar et al. 2005; Procaccini et al. 2007).

Integración EAE-Electre Tri

La integración de la EAE en la formulación de la zonificación minero-ambiental fue reconocida como una herramienta significativa durante la decisión, particularmente en la generación del vector de pesos de los criterios, al integrar consideraciones ambientales, institucionales, sociales y económicas en la política pública minera de acuerdo a su definición como proceso sistemático de evaluación de consecuencias ambientales, en el marco de escenarios de desarrollo, con el fin de asegurar su incorporación temprana en la toma de decisiones considerando aspectos de relevancia social y económica (Chaker et al. 2006). El procedimiento de la EAE está estrechamente ligado a procesos de toma de decisiones, sus evidencias constituyen un instrumento de apoyo que proporciona una perspectiva detallada de los potenciales impactos ambientales relacionados con la implementación de políticas como la minera y donde se provee de suficiente información para estimar la aceptabilidad de los impactos o proponer la viabilidad de modificaciones, mitigaciones o compensaciones a las actividades extractivas; puesto que la información requerida por el PNOM es espacial, la descripción geográfica de la distribución de los impactos determina el modo en que son percibidos por parte de los decisores, la población afectada y el público en general, contrariamente a la estimación de valores de indicadores agregados y generalizados para toda la unidad territorial (Geneletti et al. 2007).

De acuerdo a la jerarquía de mitigación (Sarmiento et al. 2015) y a la legislación vigente que señala los deberes ambientales a cargo del Estado (Güiza, 2011), se planteó la zonificación minero-ambiental, donde las áreas de restricciones menores pueden ser intervenidas con medidas para evitar impactos desde el inicio de la actividad extractiva, como la distribución de infraestructura, y medidas para minimizar la

duración, intensidad y magnitud de los impactos directos, indirectos y acumulativos que no puedan evitarse totalmente. Las áreas de restricciones medias, además de las medidas implementadas en las áreas de restricciones menores, serían objeto de actividades de reparación o restauración, con el objetivo de rehabilitar ecosistemas degradados o restaurar aquellos eliminados después de la exposición a los impactos que no pueden ser evitados ni minimizados. Las áreas con restricciones mayores, podrían requerir de compensaciones adecuadas dirigidas a la reconstrucción del patrimonio natural, social y económico, priorizando la gestión de servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de poblaciones vulnerables (Andrade et al. 2012).

Conclusiones

Se realizó la zonificación minero-ambiental de La Macarena con la integración de la EAE y el análisis de criterios múltiples Electre Tri, se presentan las áreas que por su valoración ambiental o fragilidad deben ser excluidas de esta actividad de acuerdo al principio de precaución y aquellas donde podrían adelantarse procesos extractivos en tres niveles restrictivos; esta ordenación territorial podría asistir la localización de centros de extracción de minerales en espacios geográficos compatibles con el desarrollo sostenible de las poblaciones humanas. El modelo propositivo presentado corresponde a una herramienta analítica, dinámica y multivariante que da respuesta a la necesidad del PNOM, donde el acopio, cruce y análisis de información de potencialidades, restricciones y condicionantes para el desarrollo de la minería, a una escala regional y en escenarios complejos, son de carácter prioritario.

La EAE se evidencia como una aproximación metodológica para la toma de decisiones a escalas regionales, particularmente en la

ponderación integrada de criterios de acuerdo al mantenimiento del capital natural y la valoración de la sostenibilidad como elementos de planificación territorial, donde además de la problemática ambiental se contempla el contexto social y económico. A su vez, el mapa de decisión aventaja a la modelación cartográfica convencional, al incluir las valoraciones del decisor de forma interactiva y modelar espacialmente la decisión final en escala ordinal.

El análisis de sensibilidad mostró que la ponderación de criterios es un factor determinante en la implementación del modelo planteado, lo cual requiere de métodos robustos en la estimación de consistencias que evidencien la manifestación de no comparabilidad en las relaciones de superación. La definición de las matrices de Saaty y posterior cálculo de la razón de consistencia corresponden a procedimientos adecuados para suplir estos requerimientos metodológicos.

Si bien el desarrollo del presente trabajo estuvo bajo el razonamiento de un único decisor, la implementación de la metodología podría enriquecerse con la ponderación y validación de criterios por parte de expertos temáticos en cada una de las dimensiones propuestas; lo cual podría disminuir la subjetividad y sesgos inherentes a los modelamientos de múltiples criterios. Asimismo, pueden establecerse procesos de participación comunitaria que permitan la inclusión de las perspectivas y necesidades socio-económicas de las comunidades locales en escenarios de sostenibilidad territorial.

La disponibilidad de información espacial, correspondiente a la representación de los criterios a escalas apropiadas, es un factor determinante en la implementación del modelo. La carencia de información cartográfica del potencial mineral o geología económica en el área de estudio constituyó el

principal limitante en el desarrollo del presente trabajo, puesto que junto al CMC, constituye uno de los insumos de mayor importancia en el ordenamiento minero y es un elemento clave en la estimación durante la EAE del rendimiento económico de la explotación y el beneficio social de las rentas y los empleos generados. Asimismo, la EAE no incluyó la valoración de alternativas políticas ya definidas o en proceso de elaboración como se aborda en procedimientos habituales. El propósito fundamental de la EAE en este trabajo fue la revisión normativa y de las condiciones ambientales de sostenibilidad de la minería para establecer el ordenamiento de un posible desarrollo de extracción mineral en el área de estudio; en síntesis se contribuyó a definir un marco de condiciones ambientales y socioeconómicas que deberían considerarse en un escenario donde la minería sería posible como factor de desarrollo en La Macarena.

Literatura citada

- Alcaldía La Macarena. 2008. Diagnóstico General del Municipio La Macarena 2008 (Plan de Desarrollo Municipal). Alcaldía La Macarena, La Macarena, Meta, 83 p.
- Alonso, J. & M. Lamata. 2006. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* 14: 445-459.
- Amaya, D. & D. Armenteras. 2012. Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá DC (Colombia), entre 2001 y 2010. *Acta Biológica Colombiana* 17: 143-157.
- Andrade, G., Rodríguez, M. & Wills, E. 2012. Dilemas Ambientales de la Gran Minería en Colombia. *Revista Javeriana* 148: 17-23.
- Arcila, O. 2009. Coca, guerrilla, colonización y narcotráfico en La Macarena. *Revista de la Universidad Nacional* 21: 75-80.
- Banco Mundial. 2002. Globalización, crecimiento y pobreza. Alfaomega. México, D.F. 187 p.

- Banco Mundial & IDRC. 2003. *Grandes Minas y la Comunidad: efectos socioeconómicos en Latinoamérica, Canadá y España*. Alfaomega. Bogotá, Colombia. 363 p.
- Barba, S. 1987. Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta. *Investigaciones Económicas* 11: 279-308.
- Bó, R. & A. Malvárez. 1999. Las inundaciones y la biodiversidad en humedales. Un análisis del efecto de eventos extremos sobre la fauna silvestre. Pp. 147-68. En: *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*, MAB-ORCYT. Montevideo, Uruguay.
- Brack, A. & C. Yáñez 1997. *Amazonia Peruana, Comunidades Indígenas, Conocimientos, Tierras Tituladas*. GEF/PNUD/UNOPS. Lima, Perú. 349 p.
- Cailloux, O., B. Mayag, P. Meyer V. & Mousseau, V. 2013. Operational tools to build a multicriteria territorial risk scale with multiple stakeholders. *Reliability Engineering & System Safety* 120: 88-97.
- Carrasco, L. R., C. Larrosa, E. J. Milner-Gulland & D. P. Edwards. 2014. A double-edged sword for tropical forests (Contrary to expectation, high-yielding tropical crops may cause forest loss in the tropics). *Science* 346: 38-40.
- Carvajal, L. & J. Zuluaga. 2006. Priorización de zonas de retiro con análisis multiobjetivo: aplicación en la Cuenca de la Quebrada Santa Elena. *Gestión y Ambiente* 9: 103-120.
- Chaker, A., K. El-Fadl, L. Chamas & B. Hatjian, B. 2006. A review of strategic environmental assessment in 12 selected countries. *Environmental Impact Assessment Review* 26: 15–56.
- Chakhar, S., Mousseau, V., Pusceddu, C. & Roy, B. 2005. Decision map for spatial decision making in urban planning. *The Ninth International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*. Londres, UK. 18 p.
- Concejo Municipal La Macarena. 2012. *Acuerdo 16 Plan de Desarrollo (Plan de Desarrollo Municipal)*. La Macarena, Meta, Municipio La Macarena. 98 p.
- Contraloría General de La República. 2012. *Los pueblos indígenas de Colombia y los recursos estatales asignados*, Contraloría General de La República, Colombia, 39 p.
- Cordepaz. 2012. *Ordenamiento Territorial y Ambiental en el Área de Manejo Especial de La Macarena*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Colombia, 144 p.
- De Groot, R., M. Wilson & R. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics* 41: 393-408.
- Escribano, M. & R. García. 2002. Dificultades de la puesta en práctica de los métodos de decisión multicriterio discretos. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA* 1: 196-206.
- Fernside, P. 2005. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e control. *Acta Amazônica* 36: 395-400.
- Fierro, J. 2012. *Políticas mineras en Colombia*. Instituto Latinoamericano para una Sociedad y un Derecho Alternativos ILSA. Bogotá, Colombia. 264 p.
- Forman, E. & M. Selly. 2001. *Decision by objectives: how to convince others that you are right*. World Scientific. 403 p.
- Fülöp, J. 2004. *Introduction to decision making methods*. BDEI-3 Workshop. Citeseer. Washington. 15 p.
- Garay, L. 2013a. *Fundamentos para superar el modelo extractivista (Vol. I)*. Contraloría General de la Nación. Bogotá, Colombia. 210 p.
- Garay, L. 2013b. *Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos (Vol. II)*. Contraloría General de la Nación. Bogotá, Colombia. 341 p.
- Geneletti, D., S. Bagli, P. Napolitano & A. Pistocchi. 2007. Spatial decision support for strategic environmental assessment of land use plans. A case study in southern Italy. *Environmental Impact Assessment Review* 27: 408-423.
- Güiza, L. 2011. *Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia*. *Opinión Jurídica* 10: 123-139.
- Häyhä, T. & P. Franzese. 2014. *Ecosystem services assessment: A review under an ecological-economic and systems*

- perspective. *Ecological Modelling* 289: 124-132.
- Herrera, R. 2014. El papel de la Evaluación Ambiental Estratégica en la planificación del ordenamiento de la actividad minera (Insumos para el desarrollo del Plan Nacional de Ordenamiento Minero). Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, Colombia. 846 p.
- Jiménez, J. 2002. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA* 1: 28-77.
- Joerin, F., Golay, F. & Musy, A. 1998. GIS and multicriteria analysis for land management. *Citeseer. COST C4 Final Conference*. Suecia. 10 p.
- Lidouh, K. 2013. Integration of Multi-Criteria Tools in Geographical Information Systems. PhD dissertation. Université Libre de Bruxelles, Bélgica. 158 p.
- Lima, A. & V. Salaza. 2011. Multi criteria decision making models: an overview on electre methods. *Centro De Investigação Em Gestão E Economia Universidade Portucalense*. Porto, Portugal. 42 p.
- López, F. & A. Romero. 1998. Erosión y desertificación: implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de geografía* 28: 77-89.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science* 20: 703-726.
- MAVDT. 2005. Guía Metodológica para la Incorporación de la Actividad Minera en los Procesos de Ordenamiento Territorial. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia. 64 p.
- Munda, G. 1998. Teoría de Evaluación Multicriterio: una breve perspectiva general. Pp. 1-30 p. En: *Evaluación ambiental integrada: evaluación multicriterio*. Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona.
- Murcia, U. (ed.). 2009. Fichas técnicas de los patrones de las coberturas de la tierra de la Amazonia colombiana. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas- Sinchi. Bogotá, Colombia. 172 p.
- Paba, F. & T. van Der Hammen. 1959. Sobre la geología de la parte Sur de La Macarena. Servicio Geológico Nacional, Bogotá, Colombia. 30 p.
- PNUMA & OTCA. 2009. Perspectivas del medio ambiente en la Amazonía, Geoamazonía. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. Ciudad de Panamá, Panamá. 167 p.
- Procaccini, C., S. Chakhar & C. Pusceddu. 2007. Extending decision map concept to support participative spatial multicriteria decision making. Pp. 11-14. En: *XXI Association of European Schools of Planning Conference*. Nápoles, Italia.
- Ros, J. 2011. Introduction to Decision Deck-Diviz: Examples User Guide. Terragona, Universitat Rovira i Virgili. 60 p.
- Saaty, T. 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research* 48: 9-26.
- Saaty, T. 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces* 24: 19-43.
- Sacristán, F. 2007. Construyendo Agenda 21 para el Municipio de La Macarena "Una construcción colectiva para el Desarrollo Sostenible de la Amazonia Colombiana". Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas-Sinchi. Bogotá, Colombia. 60 p.
- Sánchez, F. 1997. Globalización, reformas y competitividad en la minería de América Latina y el Caribe. *Comision Economica para America Latina y el Caribe CEPAL*. Santiago, Chile. 68 p.
- Santos, M. 1996. *Metamorfosis del espacio habitado*. Oikos Tau. Barcelona. 118 p.
- Sarmiento, M., W. Cardona, R. Victurine, A. López, A. Carneiro, P. Franco & M. Jiménez. 2015. Orientaciones para el diseño de un plan de compensaciones por pérdida de biodiversidad. *Wildlife Conservation Society*. 44 p.
- Secretaría de Planeación La Macarena. 2002. Esquema de Ordenamiento Territorial de La Macarena (Plan de Desarrollo Municipal). La Macarena, Meta, Alcaldía La Macarena. 83 p.

- Sierra, T., López, H. & Tamaris, C. 2015. Evaluación de la susceptibilidad a la desertificación en el municipio de Cartagena, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)* 5: 185-195.
- Sobrie, O., M. Pirlot & F. Joerin, F. 2013. Intégration de la méthode d'aide à la décision ELECTRE TRI dans un système d'information géographique open source. *Revue internationale de géomatique* 23: 13-38.
- Tervonen, T., J. Figueira, R. Lahdelma, J. Dias & P. Salminen. 2009. A stochastic method for robustness analysis in sorting problems. *European Journal of Operational Research* 192: 236-242.
- Troncoso, R., A. Carneiro & J. Tomasella. 2007. Amazônia, desflorestamento e água. *Ciência Hoje*, 239: 30-37.
- UNODC. 2010. Transformación socioeconómica y biofísica asociadas con cultivos ilícitos en la región Sur del Meta-Guaviare 1990 - 2009. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Bogotá, Colombia. 153 p.
- UNODC. 2011. Cultivos de Coca Estadísticas Municipales Censo 31 de diciembre de 2010 (Proyecto SIMCI II). Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Bogotá, Colombia. 113 p.
- UNODC. 2012. Colombia Censo de Cultivos de Coca 2011. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Bogotá, Colombia. 112 p.
- UNODC. 2013. Colombia Monitoreo de Cultivos de Coca 2012. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Bogotá, Colombia. 117 p.
- UNODC. 2014. Colombia Monitoreo de Cultivos de Coca 2013. Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. Bogotá, Colombia. 136 p.
- UPME. 2014. Plan Nacional de Ordenamiento Minero PNOM en extenso (Documento Anexo a Resolución UPME 0256 de 2014). Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá, Colombia. 217 p.
- Vélez, M. 2012. Colonización, memoria y resistencia. Construcción del territorio Yaguara II (Llanos del Yarí, Colombia) desde el destierro. *Boletín de Antropología* 27: 68-88.
- Vetschera, R. 1986. Sensitivity analysis for the ELECTRE multicriteria method. *Zeitschrift für Operations Research* 30: B99-B117.