

Identificación de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja (Colombia) por medio de Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio

Identification of potentially urbanizable areas in the City of Tunja (Colombia) using geographic information systems and multi-criteria evaluation

GUALDRON, Diego F. ¹

REYES, Pedro S. ²

VILLATE, José J. ³

Resumen

El conflicto entre zonas de expansión urbana y zonas de protección de la ciudad de Tunja, genera una mala planeación territorial que supone una afectación ambiental al territorio. El objetivo del estudio es encontrar mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja, vinculándolos mediante un modelo que relaciona las restricciones en el uso del suelo y la idoneidad del mismo para ser urbanizado.

Palabras clave: Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Sistemas de Información Geográfica (SIG), planeación territorial, zonas potencialmente urbanizables.

Abstract

The conflict between urban expansion zones and protection zones of the city of Tunja, shows a bad territorial planning that supposes an environmental affectation to the territory. The objective of the study is to find, through the use of Geographical Information Systems (GIS) and the Hierarchical Analytical Process (AHP), the potentially urbanizable areas of the city of Tunja, linking them using a model that relates the restrictions on land use and the suitability of it to be urbanized.

key words: Hierarchical Analytical Process (AHP), Geographic Information Systems (GIS), territorial planning, potentially urbanizable areas.

1. Introducción

La expansión urbana y el desarrollo sostenible son algunos de los principales asuntos a evaluar por parte de las autoridades competentes frente al ordenamiento territorial, con el fin de garantizar el correcto desarrollo de los centros urbanos, ya que en los últimos años se ha evidenciado un incremento descontrolado en el crecimiento de las ciudades, el cual en muchas ocasiones se realiza de una forma desorganizada.

¹ Docente universitario. Escuela Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. diego.gualdron@uptc.edu.co

² Profesional de laboratorio. Programa Ingeniería Civil. Fundación Universitaria Juan de Castellanos. psreyes@jdc.edu.co

³ Docente universitario. Escuela Ingeniería Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. jose.villate@uptc.edu.co

El crecimiento poblacional y de las ciudades es actualmente uno de los temas de mayor importancia para la sociedad, pues la necesidad de tener urbes cualificadas con todas las condiciones físicas y socio-económicas para soportar un aumento demográfico que en algunas partes del mundo es de tipo exponencial, se ha convertido en uno de los principales retos en el ámbito del urbanismo (Catellanos, 2010).

Desde el punto de vista geográfico la planificación territorial supone, principalmente el establecimiento de los usos más apropiados para cada porción del territorio. La decisión sobre cuáles son estos usos depende, entre otros factores, de razones y criterios derivados de la conservación del ambiente natural y debe tener en cuenta tanto la vocación intrínseca de cada punto del territorio, determinada por su aptitud para cada uso o actividad, como el impacto potencial que tendrá sobre el medio ambiente la realización de una determinada actividad en este punto del territorio (Bosque & Garcia, 2000).

El desarrollo urbano trae consigo la invasión de zonas rurales, conflictos del uso del suelo, afectación en las rondas y cauces de ríos, pérdida de ecosistemas en zonas protegidas, generando efectos secundarios como: pérdidas del paisaje y desplazamiento de especies de su ecosistema, afectación de zonas protegidas, pérdida del espacio abierto, expansión descontrolada, entre otros, los cuales representan una amenaza para el equilibrio económico, social y ambiental de una región.

Tunja como capital del departamento de Boyacá ubicada a 130 kilómetros al noroeste de Bogotá, con una extensión total de 121.4920 km² (Tunja, 2014) y una población para el 2017 de 167.991 habitantes (DANE, 2018), no es ajena al fenómeno de crecimiento urbano, dado que en los últimos años el desarrollo de la ciudad ha sido considerado y vertiginoso, lo que ha acarreado problemáticas en la planeación de las zonas dispuestas para su crecimiento, tales como la sobre posición de las zonas de protección y las zonas de expansión urbana definidas en el plan de ordenamiento territorial (POT), efecto que conlleva a una afectación negativa de las zonas de protección, pérdida del espacio abierto y representa una amenaza para el equilibrio ambiental y el desarrollo sostenible de la ciudad (Moreno, Rodriguez, & Lopez, 2018).

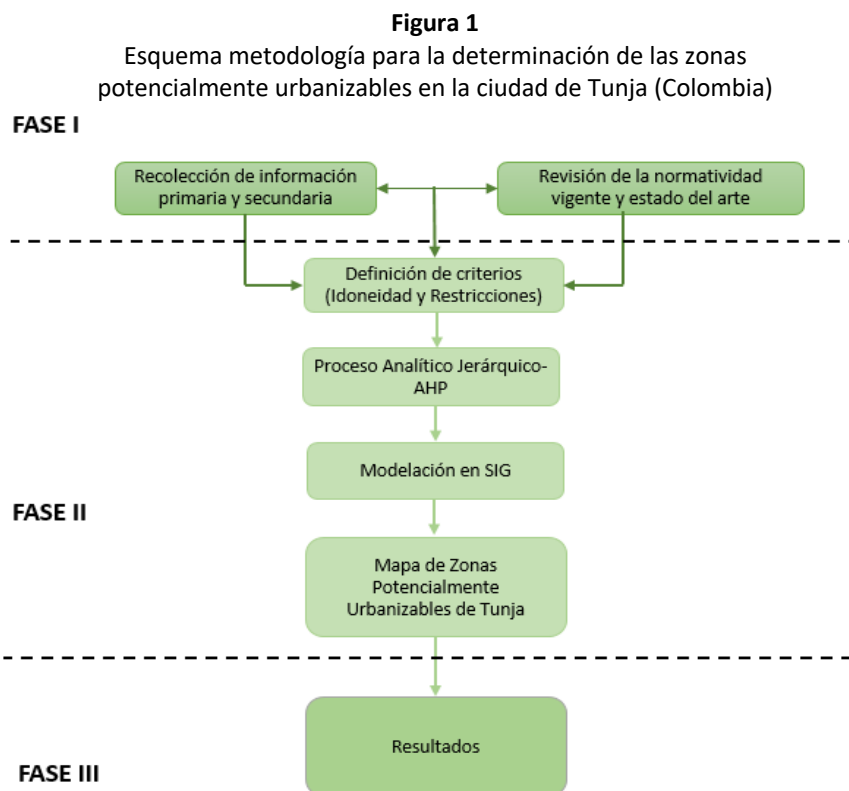
Las zonas destinadas para el uso residencial deben poseer ciertas características de habitabilidad, las cuales deben estar siempre relacionadas con la salud y seguridad de la población y la necesidad de satisfacer ciertas demandas en cuestión de equipamiento; estas características deben garantizar a las personas disfrutar de una buena calidad de vida y permitir a los habitantes acceso a trabajo, educación, cultura, salud y esparcimiento.

El definir un área específica como apta o potencialmente apta para urbanizar, implica estudiarla empleando variables propias de la zona tales como áreas con amenaza, equipamientos, zonas industriales, vías urbanas y rurales entre otras, que deben ser analizadas en conjunto y caracterizadas según su importancia; es por esto que la combinación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en la determinación de las zonas potencialmente urbanizables, pueden brindar una herramienta para la toma de decisiones que permitan mitigar los efectos negativos de una expansión acelerada y planeada de manera deficiente tales como la inundación en edificaciones asentadas en rondas de ríos, saturación de la malla vial, asentamiento en zonas geológicas determinadas geomorfológicamente como cárcavas y conflictos entre zonas de protección y zonas de expansión urbana (Da Silva & Cardozo, 2015).

El propósito de esta investigación, es obtener el mapa de las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja, para tal fin, se realizó una revisión de la normatividad vigente referente a la planeación del territorio y la recolección de información secundaria para la realización del análisis, para esto se desarrollaron dos modelos que enmarcan las restricciones y la idoneidad que enmarcan las condiciones para que una zona pueda ser urbanizada. En estos modelos se incluyó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para asignar la ponderación de las variables, obteniendo de esta manera dos raster, que al superponerlos permite visualizar las zonas potenciales para urbanizar.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se proponen tres fases metodológicas las cuales pueden ser observadas en la figura 1. En la primera fase se realiza la revisión del estado del arte, así como la búsqueda y obtención de información. La segunda fase hace referencia a la definición de criterios que influirán en la EMC y en el análisis de la información en el SIG, la fase 3 corresponde al análisis de los resultados pertinentes a la investigación.



Fuente: Los autores

2.1. Fase I

La fase se desarrolló con la recopilación de la información requerida: información primaria correspondiente a catastro de la ciudad, equipamientos, vías, entre otros, que fue suministrada por la oficina de planeación de la alcaldía de la ciudad, y la información secundaria se recolectó a través de diferentes portales oficiales correspondiente a modelos digitales de elevación, zonas de protección, zonas de amenazas y la revisión del estado del arte, que incluyó la búsqueda de investigaciones realizadas sobre los SIG, EMC, con el propósito de ajustar la metodología a utilizar, de igual manera se revisó normatividad nacional acerca de los planes de ordenamiento territorial (POT).

2.2. Fase II

Se establecieron las capas correspondientes a las restricciones e idoneidad, teniendo en cuenta la información geográfica oficial, prestando especial atención a las áreas de protección, suelos ya urbanizados, ubicación de equipamientos y zonas industriales. Mediante el AHP se calcularon los pesos de los parámetros de idoneidad para cada criterio y subcriterio definido, para superponer las restricciones, obteniendo así, las zonas potencialmente urbanizables.

La información recolectada en formato shapefile se procesó y estandarizó para posteriormente ser convertida a formato raster, mediante el software ArcGIS, con el fin de realizar la reclasificación y el cálculo de los pesos en la

AHP. Para la asignación de la importancia de las variables se utilizó la metodología de panel de expertos, la cual “es una herramienta heurística, por lo que sus resultados tienen un mayor grado de subjetividad, sin embargo, es una herramienta práctica para resolver estadísticamente problemas de identificación, evaluación, valoración y asignación de riegos bajo información empírica” (DNP, 2014, p. 2) Para el estudio se evaluaron los conceptos emitidos por diferentes especialistas, para en función de su experiencia y discernimiento, determinar los valores de la reclasificación y la importancia que se dan a cada criterio y subcriterio en el estudio. Se contó con la opinión de especialistas agrónomos, geotécnicos, biólogos, de infraestructura vial y ordenamiento territorial egresados de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Universidad Católica de Colombia, Universidad de los Andes, Fundación Universitaria Juan de Castellanos y funcionarios de la oficina asesora de planeación de la ciudad de Tunja.

2.2.1. Restricciones

Las restricciones desde el punto de vista ambiental se refieren a la “limitación total impuesta para la realización de un proyecto sobre un área geográfica determinada en razón de las características ambientales” (Sanint & Sanín, 2010, p. 33) Sin embargo, para esta investigación fue necesario tener en cuenta restricciones adicionales propias del área de estudio definidas por la infraestructura física existente, las restricciones o criterios limitantes se definieron con base en información del POT suministrada por la oficina asesora de planeación de la ciudad de Tunja. Esta información fue fusionada por medio del álgebra de mapas para obtener un único raster con valores binarios donde las zonas restringidas toman un valor de 0 y las zonas sin restricción valores de 1. Las variables utilizadas para las restricciones son:

- Suelos de protección urbano y rural: Incluye áreas de uso forestal, reserva ambiental, bosque protegido, suelos de infiltración para recarga de acuíferos, rondas de ríos, protección de fauna, zonas de restauración morfológica y rehabilitación del suelo, terrenos susceptibles a actividades mineras y áreas destinadas a la disposición de residuos líquidos y sólidos.
- Áreas con amenaza alta de inundación y erosión.
- Áreas con amenaza antrópica.
- Áreas destinadas a plantas de beneficio y faenado.
- Polígono minero existente.
- Zonas ya urbanizadas.
- Vías urbanas, rurales y zonas industriales.
- Espacio público y equipamientos.

2.2.2. Criterios de idoneidad para urbanizar

La idoneidad para urbanizar hace referencia a la posibilidad de usar un área específica teniendo en cuenta el cumplimiento de los requisitos locativos y los efectos en el medio provocados por la implantación y funcionamiento de la actividad (Cantinazo, 2013). Con base en la información disponible, los lineamientos establecidos en el POT de la ciudad de Tunja y la normatividad vigente, se determinaron los criterios para realizar el análisis de idoneidad con sus respectivos subcriterios, los cuales fueron valorizados en una escala de 1 a 5, siendo 5 el valor correspondiente a una mayor idoneidad para urbanizar y 1 el valor de menor idoneidad. Los criterios utilizados fueron los siguientes:

Físicos: Contemplan aquellos factores propios de las condiciones de la zona de estudio como lo son las pendientes, geología y cobertura del suelo.

Pendiente: Fue clasificada con base en el Manual de Diseño Geométrico de Vías del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), según el criterio de los expertos: un Ingeniero Civil especialista en infraestructura vial y Magister en

Ciencias y Sistemas de Información Geográfica y un Ingeniero de Vías y Transporte Magister en ingeniería (infraestructura vial). Se establecieron cuatro tipos de terreno que dependen de la topografía que predomine en la zona de estudio, a continuación, se describen los diferentes tipos de terreno encontrados en el manual:

Terreno plano: Cuyas pendientes longitudinales son normalmente menores de tres por ciento (3%).

Terreno ondulado: Sus pendientes longitudinales se encuentran entre tres y seis por ciento (3% - 6%).

Terreno montañoso: Las pendientes longitudinales que predominan en este tipo de terreno se encuentran entre seis y ocho por ciento (6% - 8%).

Terreno escarpado: Generalmente sus pendientes longitudinales son superiores a ocho por ciento (8%).

En la ciudad de Tunja se encontraron pendientes desde el 0% hasta 66%, debido a esto se creó un nuevo rango para otorgar la valoración de idoneidad tipo 1. Para el análisis se determinaron los terrenos planos y ondulados como los más idóneos para desarrollar nuevos proyectos urbanos y con base en esto, se asignó la valoración correspondiente para los otros tipos de terreno. Esta clasificación puede ser observada en la tabla 1.

Tabla 1
Asignación de valores por reclasificación
del subcriterio Pendiente

Pendiente (%)	Valoración
0 – 3 Terreno Plano	5
3 – 6 Terreno Ondulado	4
6 – 8 Terreno Montañoso	3
8 – 14 Terreno Escarpado	2
> 66	1

Fuente: Los autores

Geología: La clasificación de este criterio se presenta en la tabla 2, se realiza según el criterio de los expertos: un Ingeniero Civil Magister en Geotecnia de la Universidad de los Andes, un Ingeniero Civil Magister en Ingeniería con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, quienes, basados en las formaciones geológicas encontradas en la ciudad de Tunja y la composición de cada una de ellas, dan su concepto para determinar la valoración de idoneidad correspondiente a cada formación.

Tabla 2
Asignación de valores por reclasificación del subcriterio Geología

Geología	Valoración
Formación Bogotá: Compuesta por arcillolitas abigarradas, areniscas arcillosas blancas o amarillas.	3
Formación Guaduas: Se compone por arcillolitas carbonaceas, areniscas y arcillas abigarradas y presencias de mantos de carbón en la parte inferior.	4
Depósitos Aluviales: Conformados por gravas, gránulos de arenisca blanca y matriz arcillosa, cherts, arcilla amarilla, arena arcillosa, limos, arcilla y arenas en la parte superior.	1
Grupo Guadalupe: Compuesto por porcelanitas, cherts y fosforita esporádica, en su parte intermedia cuenta con presencia de arcillas y areniscas.	4
Formación Tilatá: Compuesta por gredas, capas arenosas y cascajos, presencia de material arcilloarenoso.	2
Formación Conejo: Esta formación tiene presencia de shales carbonosos y silíceos de color gris oscuro, intercalaciones de areniscas silíceas de grano fino, niveles de lutitas y areniscas cuarzosas.	5

Fuente: Los autores

Cobertura del suelo: la clasificación se determinó mediante el concepto de los expertos: un Ingeniero Agrónomo Magister en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia y un Biólogo de la Universidad Pedagógica

y Tecnológica de Colombia, quienes indicaron las características y el uso habitual que tiene cada cobertura de suelo existente en la ciudad de Tunja y con base en estos conceptos, se determinó la valoración de idoneidad para cada una de ellas, tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3
Asignación de valores por reclasificación del subcriterio Cobertura del Suelo

Cobertura	Valoración
Tierras desnudas y degradadas: Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema. Se incluyen las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación, o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.	3
Herbazal: Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación), el cual se desarrolla en áreas que no están sujetas a períodos de inundaciones, donde no existe presencia de elementos arbóreos y/o arbustivos, o en caso de existir en ningún caso representarán más del 2 %.	5
Tejido urbano continuo: Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano.	5
Tejido urbano discontinuo: Son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren artificialmente la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación. Esta unidad puede presentar dificultad para su delimitación cuando otras coberturas se mezclan con áreas clasificadas como zonas urbanas.	5
Pastos limpios: Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastizales con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70%, son evidentes prácticas de manejo como limpieza, enclavamiento y/o fertilización, etc., estas prácticas impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.	1
Zonas verdes urbanas	4
Mosaico de pastos con espacios naturales: Esta cobertura está constituida por las superficies ocupadas principalmente por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. Las coberturas de pastos representan entre el 30% y el 70% de la superficie total del mosaico. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustos, herbazales, bosque de galería o ripario, pantanos y otras áreas no intervenidas o poco transformadas y que debido a limitaciones de uso por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales: Comprende superficies ocupadas por cultivos y pastos en combinación con coberturas naturales. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre el 30 % y el 70 % de la superficie total de la unidad. Los espacios naturales están conformados por las áreas ocupadas por relictos de bosque natural, arbustales, bosque de galería o riparios, vegetación secundaria o en transición, pantanos u otras áreas no intervenidas o poco transformadas, que debido a limitaciones de uso, o por sus características biofísicas permanecen en estado natural o casi natural.	1
Tubérculos	1
Bosque fragmentado: Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales con evidencia de intervención humana aunque que mantienen su estructura original. Se pueden dar la ocurrencia de áreas completamente transformadas en el interior de la cobertura, originando parches donde hubo presencia de coberturas antrópicas como pastos y cultivos pero que han sido abandonadas para dar paso a un proceso de regeneración natural del bosque en los primeros estados de sucesión vegetal. Los parches de intervención deben representar entre el 5% y el 50% del total de la unidad.	1
Arbustal: Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbustivos, los cuales forman un dosel irregular, pero que puede presentar elementos arbóreos dispersos cuya cubierta representa más del 70% del área total de la unidad. Esta formación vegetal no ha sido intervenida o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y sus características funcionales (IGAC, 1999).	1
Bosque denso: Corresponde a vegetación de tipo arbóreo caracterizada por un estrato más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más del 70% del área total de la unidad, con altura del dosel superior a 15 metros y que se encuentra localizada en zonas que no presentan procesos de inundación periódicos.	1
Zonas de extracción minera	1
Mosaico de pastos y cultivos: Es una unidad que comprende una asociación de pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2

Cobertura	Valoración
Aeropuertos	1
Plantación forestal	1
Mosaico de cultivos: Es una unidad que comprende cultivos anuales, transitorios o permanentes, en los cuales los tamaños de parcelas son muy pequeños y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intricado para representarlos cartográficamente de manera individual.	2
Suelos de uso agropecuario mecanizado o intensivo	1
Suelos de uso agropecuario semi - mecanizado o semi-intensivo	1

Fuente: Los autores

Accesibilidad: La accesibilidad expone la posibilidad de acceder e interrelacionar a las personas con el territorio y a la vez con servicios primordiales para el desarrollo de las actividades y necesidades básicas de la población. Los criterios de accesibilidad que se tuvieron en cuenta para el análisis son los siguientes:

Cercanía a parques, centros de salud y colegios: La valoración de idoneidad será mayor en cuanto las zonas potencialmente urbanizables estén más cerca de estos equipamientos, debido a que son establecimientos que brindan servicios de primera necesidad para la población. La clasificación para este criterio se determinó con base en la NTC 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura, Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes escolares, en donde se estipula que los nuevos asentamientos urbanos deben estar en una distancia no mayor a 500 m en caso de situaciones críticas. En la tabla 4 se puede ver la valoración otorgada a este subcriterio.

Tabla 4

Asignación de valores por reclasificación del subcriterio
Cercanía a parques, centros de salud y colegios

Cercanía a parques, centros de salud y colegios(m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 250	4
250 – 500	3
500 – 4000	2
> 4000	1

Fuente: Los autores

Cercanía a vías (urbanas y rurales): Entre más cerca se este de la malla vial, será más favorable la valoración que se le dé a una zona, debido a que los desplazamientos de la población hacia diferentes partes de la ciudad serán más sencillos. La definición de estos rangos se tomó como referencia la NTC 4595, obteniendo los valores consignados en la tabla 5.

Tabla 5

Asignación de valores por reclasificación del
subcriterio Cercanía a vías urbanas y rurales

Cercanía a vías urbanas y rurales (m)	Valoración
0 – 150	5
150 – 370	4
370 – 590	3
590 – 810	2
> 810	1

Fuente: Los autores

Cercanía a zonas ya urbanizadas: La clasificación de este subcriterio está basada en la importancia de la cercanía a espacios o zonas ya ocupadas por el hombre, ya que esto garantiza una mayor interacción entre los pobladores

que habitan estos lugares, mejor acceso a diferentes servicios como salud, recreación y cultura. Las zonas más próximas a áreas ya urbanizadas serán más favorables para nuevos asentamientos, para los rangos de distancia a zonas ya urbanizadas y sus valoraciones se tomó como referencia la NTC 4595, los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6
Asignación de valores por reclasificación del subcriterio Cercanía a zonas ya urbanizadas.

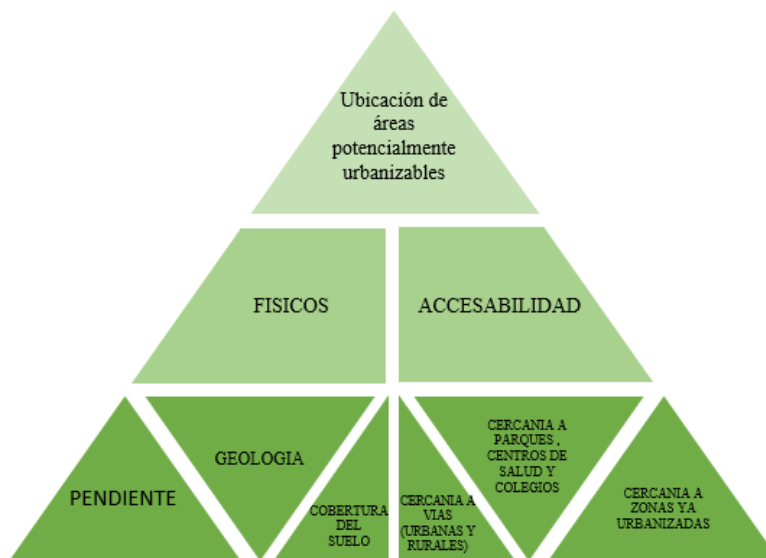
Cercanía zonas ya urbanizadas (m)	Valoración
0 – 500	5
500 – 1500	4
1500 – 3000	3
3000 – 6000	2
> 6000	1

Fuente: Los autores

2.2.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

“Es un método matemático creado por Thomas Saaty para evaluar alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios” (Osorio & Orejuela, 2008, p. 247). “El método parte de la comparación de pares de criterios a través de una matriz cuadrada basándose en los juicios subjetivos de expertos que tiene como objetivo resolver una temática de manera particular” (Ordoñez & Cabrera, 2011-2012, p. 3), por tal razón es ideal para dar solución a distintas problemáticas territoriales. Para la aplicación del método se realiza una jerarquización en la que se definen los criterios físicos y de accesibilidad, así como los subcriterios utilizados para el estudio, aspectos presentados en la figura 2.

Figura 2
Jerarquización de criterios para el AHP



Fuente: Los autores

Luego se realizó una comparación por pares según los valores establecidos por Saaty para cuantificar la importancia de un criterio con respecto a otro, la cual se presenta en la tabla 7. A partir de las matrices, se asignaron valoraciones correspondientes a cada criterio y subcriterio, y se calculó el radio de consistencia RC, el

cual “debe ser menor al 10% para evitar posibles incoherencias y contradicciones a la hora de evaluar la importancia de los criterios en cada matriz” (Saaty, 2008, p. 86).

Tabla 7
Escala de comparación de Saaty

Valor Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen de igual manera a los objetivos
3	Importancia moderada	El criterio A es ligeramente favorecido sobre el criterio B
5	Importancia fuerte	El criterio A es fuertemente favorecido sobre el criterio B
7	Importancia muy fuerte	El criterio A es severamente favorecido sobre el criterio B
9	Importancia extrema	El criterio A es en extremo más importante que el criterio B
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando sea necesario un término medio

Fuente: (Escala de comparación de Saaty.
Adaptado de “Decision making with the analytic hierarchy process”,
por SAATY, T, 2008, International journal of services sciences.
vol.1, n° 1, p. 86. Copyright 2008 por la International journal of services sciences)

Para el cálculo del radio de consistencia RC se tuvieron en cuenta las siguientes ecuaciones (Saaty, 2008):

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\tau_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Donde τ_{max} corresponde al máximo valor propio de la matriz de comparaciones y se calcula multiplicando la sumatoria de la Matriz de Comparación de Criterios por el Vector de Prioridades W que representa el peso que tiene cada criterio o subcriterio en el objetivo general. El valor de n corresponde al tamaño de la matriz. La tabla 8 presenta el valor de RI Índice aleatorio Saaty, que proporciona los valores según el tamaño de la matriz.

Tabla 8
Índice aleatorio RI

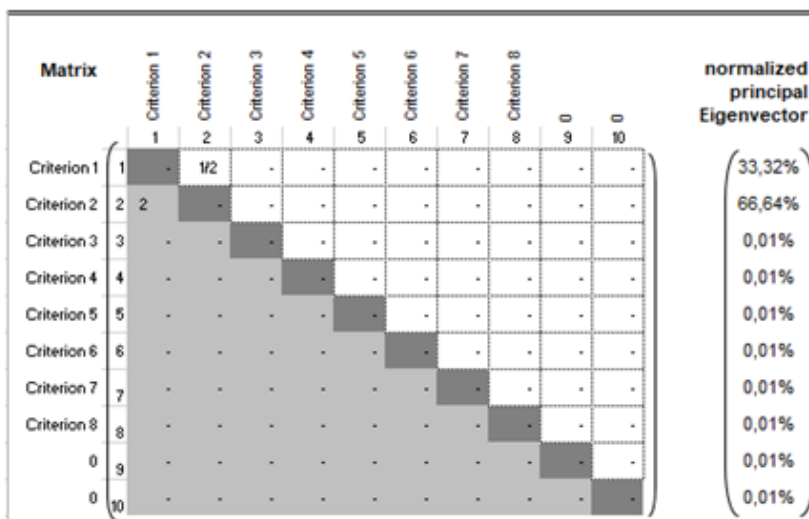
Tamaño de la matriz (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio (RI)	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484

Fuente: Índice aleatorio RI
Adaptado de “Decision making with the analytic hierarchy process”,
por SAATY, T, 2008, International journal of services sciences. vol.1, n° 1, p. 86.
Copyright 2008 por la International journal of services sciences)

Para el cálculo de las valoraciones de los criterios y subcriterios se utilizó la AHP del BPMSG (Business Performance Management) en donde se relaciona, una matriz, de la cual se obtienen las ponderaciones establecidas para cada criterio y subcriterio evaluado por los profesionales consultados. En la figura 3 se presenta un ejemplo de la ponderación realizada para los criterios utilizando el BPMSG.

Figura 3
Matriz de comparación de criterios
Hoja de Excel para el AHP del BPMSG

Table	Criterion	Comment	Weights	Rk
1	Criterion 1	FISICOS	33,3%	2
2	Criterion 2	ACCESIBILIDAD	66,6%	1
3	Criterion 3		0,0%	
4	Criterion 4		0,0%	
5	Criterion 5		0,0%	
6	Criterion 6		0,0%	
7	Criterion 7		0,0%	
8	Criterion 8		0,0%	
9		for 9&10 unprotect the input sheets and expand the	0,0%	
#		question section ("*" in row 66)	0,0%	



Fuente: Los autores

Una vez realizada la ponderación de cada criterio y subcriterio establecidos, se obtiene como resultado los pesos finales para cada uno de ellos, en la tabla 9 se relacionan los valores obtenidos para el estudio.

Tabla 9
Pesos encontrados para criterios
y subcriterios según el AHP

Criterios	Pesos	Subcriterios	Pesos locales	Pesos globales
Fisicos	33%	Pendiente	21%	6,93%
		Geología	24%	7,92%
		Cobertura	55%	18,15%
Accesibilidad	67%	Cercanía a parques, centros de salud, colegios.	16%	10,52%
		Cercanía a vías (urbanas y rurales)	59%	39,80%
		Cercanía a zonas ya urbanizadas	25%	16,68%
Σ	100%		Σ	100%

Fuente: Los autores

Al calcular los pesos globales de cada subcriterio presentados en la tabla 9, se procedió a crear el modelo en ArcGIS, obteniendo el raster que represente la idoneidad para urbanizar en la ciudad de Tunja. Los raster de los criterios de accesibilidad se obtuvieron utilizando la herramienta de Distancia Euclidiana, la pendiente fue el

resultado del Modelo Digital de Elevación (DEM), mientras que la geología y cobertura se convirtieron de polígono a raster.

Después de reclasificar cada subcriterio en una escala de 1 a 5, se utilizó la herramienta de ArcGIS Weighted Overlay, para realizar la ponderación de las variables con base en las valoraciones globales encontradas con el método AHP. El resultado corresponde a un mapa de idoneidad para urbanizar.

2.2.4. Superposición de mapa restricciones y mapa de idoneidad

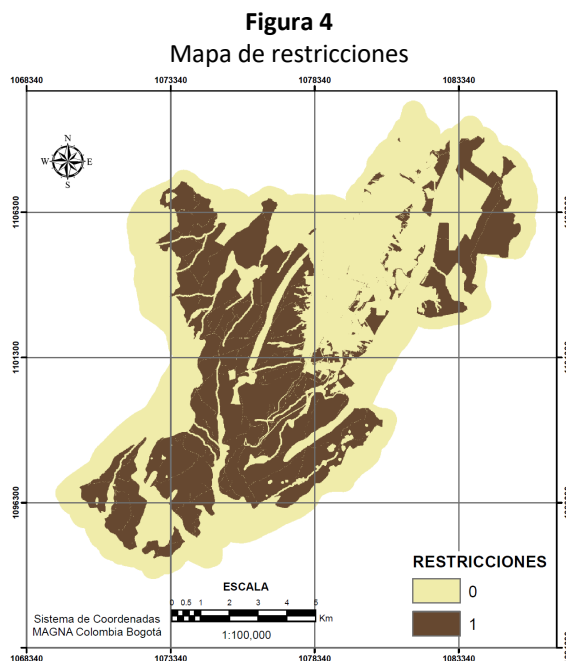
A partir del álgebra de mapas, se realizó la superposición del raster de restricciones con el mapa de idoneidad, por medio de una multiplicación espacial de raster, se obtiene el mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja. De esta manera se enlazaron los criterios de idoneidad y las restricciones para encontrar una solución a la demanda de nuevos espacios para urbanizar en la ciudad, que no solo cumpla con las necesidades de la población, sino que respete los espacios naturales y suelos de protección establecidos dentro del POT y garantice una disminución del impacto ambiental que se genere a futuro con dichos procesos de expansión urbana.

3. Resultados

Los resultados de la investigación corresponden a la fase III, donde se obtuvieron tres mapas con las características definidas en la fase II tales como, zonas restringidas para urbanizar y zonas idóneas valorizadas de acuerdo al grado de idoneidad para urbanizar. Por último, el mapa de las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja, que es el producto de la superposición del mapa de restricciones e idoneidad.

3.1. Mapa de restricciones

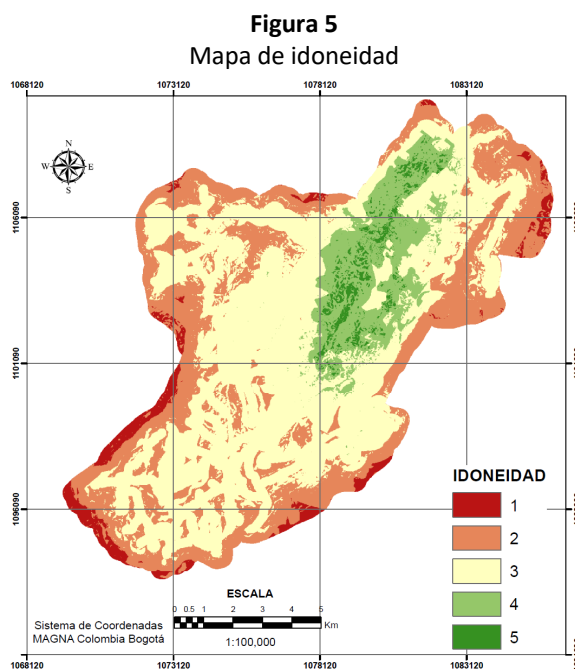
Según el mapa de restricciones, 625 Ha presentan limitantes de algún tipo, presentadas en el mapa en tono claro y valoración de 0, por lo que no se recomienda realizar ningún tipo de urbanización en ellas. La mayoría de estas zonas restringidas se encuentran en el casco urbano de la ciudad y en las zonas perimetrales. 555 ha no presentan restricción y se ubican en zonas aledañas al casco urbano y en la zona rural de la ciudad, señaladas en el mapa con tono oscuro y valoración de 1. Finalmente se encontró que un 53% del área total de la ciudad presenta restricciones, dejando 47% del territorio sin algún tipo de restricción para realizar alguna expansión urbana. En la figura 4, se muestra el mapa de restricciones obtenido para el estudio.



Fuente: Los autores

3.2. Mapa de idoneidad

Las zonas clasificadas como idóneas se encuentran dentro del casco urbano de la ciudad, señaladas en el mapa con tonos verde oscuro y claro, con áreas de 272 Ha y 143 Ha respectivamente, para un total de 415 Ha; las restantes 765 Ha de la ciudad no presentan condiciones propicias para urbanizar. Las zonas que cumplen con los requerimientos de idoneidad en la ciudad representan un 35% del territorio. En la figura 5, se muestra el mapa de idoneidad y la distribución de las zonas con base a su clasificación, en la cual la idoneidad del terreno aumenta en función del número establecido en la leyenda presentada:

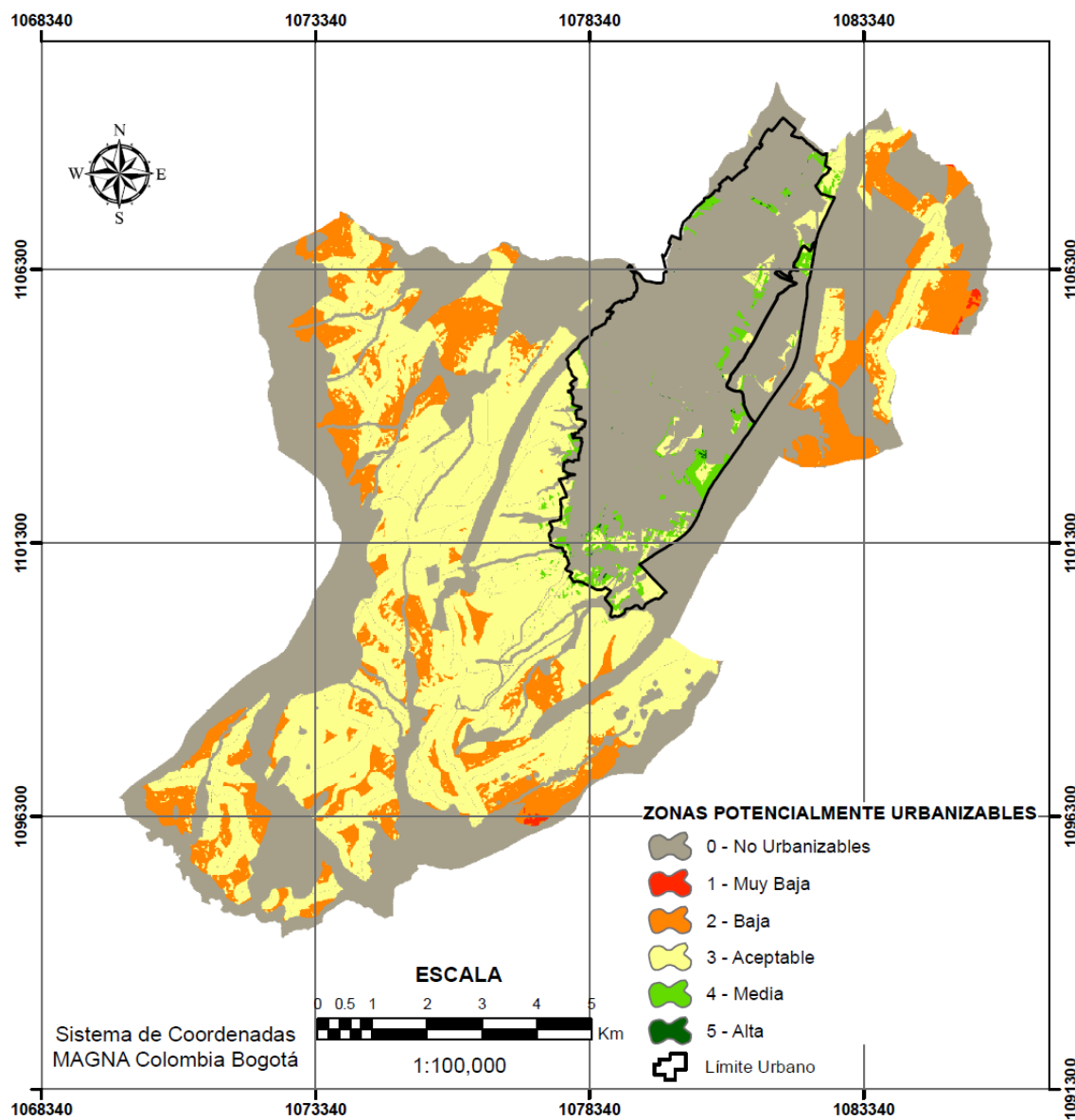


3.3. Mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja

Se encontró que las zonas potencialmente urbanizables con clasificaciones 5 (alta) y 4 (media) tienen un área total de 768,19 Ha, distribuidas en su mayoría de sur a norte en el costado oriental de la ciudad; dicha área equivale a un 6,5% del territorio. Aquellas zonas con clasificación 3 (aceptable) presentan un área de 4090 Ha, las cuales representan un 35% del área total de la ciudad y se encuentran en su mayoría en la zona rural.

El área sin potencial de urbanismo es de 6944 Ha, lo que representa un 59% de la ciudad, ubicada dentro del casco urbano y en la periferia de la capital boyacense. En la figura 6, se da a conocer el mapa de las zonas potencialmente urbanizables de la ciudad de Tunja.

Figura 6
 Mapa de zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja

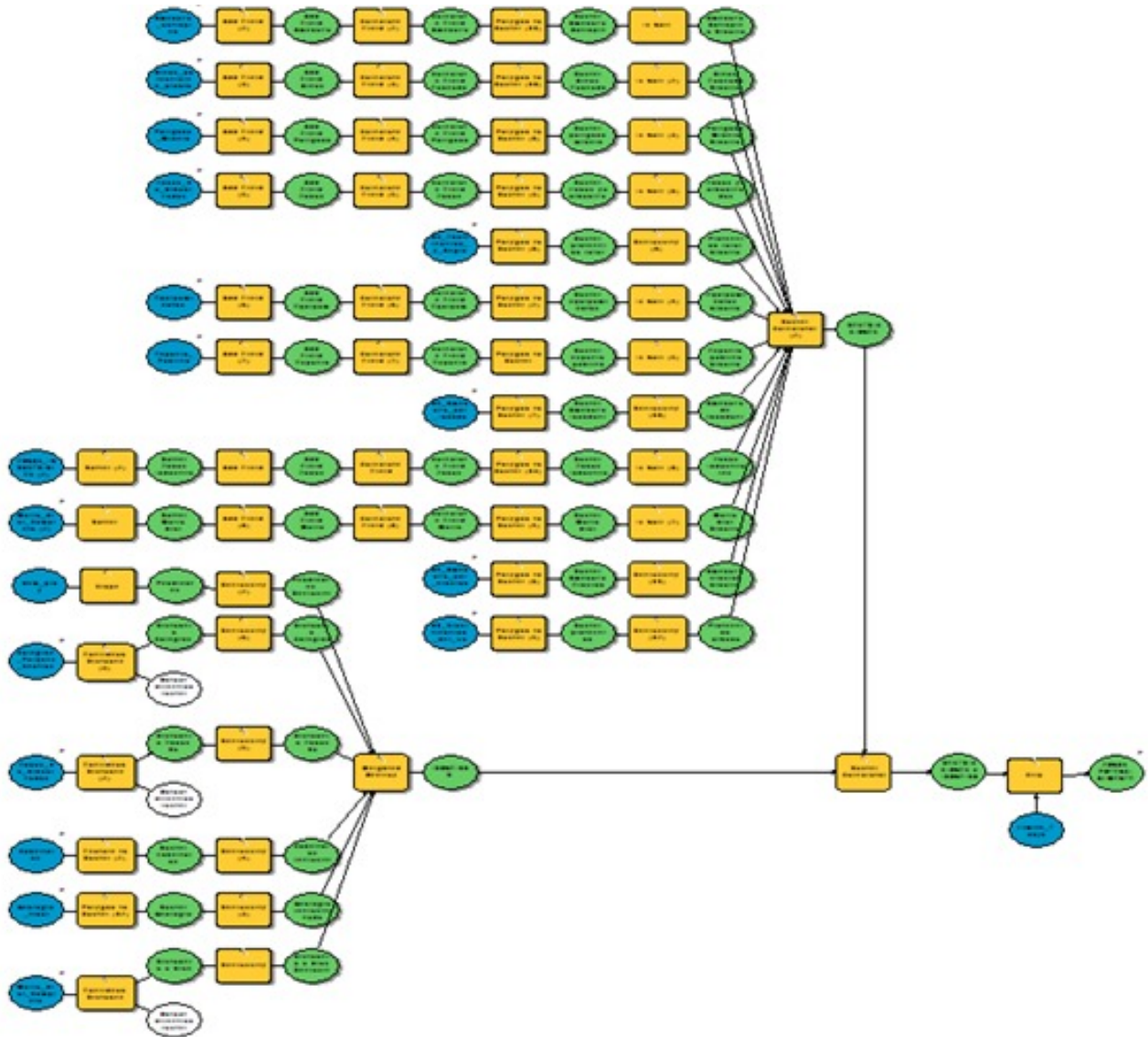


Fuente: Los autores

3.4. Modelo zonas potencialmente urbanizables en ArcGIS

La figura 7 presenta el modelo obtenido en el software ArcGIS donde se relaciona la información recolectada para realizar el análisis, en dicho modelo se efectuaron reclasificaciones, análisis de pendientes, determinación de distancias euclidianas, zonas de influencia, asignación de criterios de valorización y la conformación de los mapas. Este modelo es totalmente automatizado y podrá ser implementado por los entes territoriales para proyectar las zonas de expansión de acuerdo a la información de cada municipio.

Figura 7
Modelo zonas potencialmente urbanizables en la ciudad de Tunja



Fuente: Los autores

4. Conclusiones

La integración de los SIG con la EMC dinamizó el procesamiento de la información y de las variables asociadas al análisis del panel de expertos, y permitió modelar la información alfanumérica con una estructura de datos simple, facilitando su análisis espacial. Generando una herramienta práctica para la gestión del territorio, que puede ser empleada para la optimización de la toma de decisiones por parte de los entes territoriales.

Se requiere la determinación de un polígono adecuado para zonas de expansión con el fin de no realizar una afectación importante a la parte rural de la ciudad, debido a que las zonas con potencialidad de expansión urbana se localizan fundamentalmente en el área rural de la ciudad, clasificada como aceptable para urbanizar, con una extensión de 4858,19 Ha.

El empleo de esta metodología requiere la determinación de los criterios, subcriterios y valores de las matrices de comparación propios de cada municipio o zona a estudiar, ya que estos varían según el lugar, el tipo y cantidad

de información disponible, Por lo tanto, no es recomendable el uso de la información base empleada en este estudio, dado que esta se ajusta a las condiciones y características propias de la ciudad de Tunja.

La metodología planteada en la investigación puede ser utilizada por las autoridades competentes en el tema de planeación territorial, para la planificación e identificación de zonas idóneas, no solo para lugares de expansión urbana o posible urbanización, sino para localización de equipamientos, nuevas infraestructuras, entre otras, dada la facilidad y versatilidad de la implementación que la convierte en una herramienta para la optimización de la gestión del territorio.

La sectorización realizada establece las áreas que presentan conflictos de urbanización, información que permite a los ciudadanos evitar la adquisición de predios en zonas donde se presentan restricciones constructivas.

Al realizar este tipo de análisis se garantiza que se realice una expansión urbana de manera responsable, sin realizar afectaciones negativas de tipo ambiental, social o económico, lo que permite que estas expansiones se hagan de forma sostenible, fomentando el desarrollo óptimo de las urbes.

Referencias bibliográficas

- Bosque, J., & Garcia, R. C. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anuales de la geografía de la Universidad Complutense*, 49_67.
- Cantinazo, R. P. (2013). *El camp de Túria .Reflexión sobre su modelo territorial*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/tesinacampdeturia/contenido/aptitud-territorial>
- Catellanos, D. F. (2010). Aplicación de los sistemas de información geográfica en el ordenamiento territorial. *Ventana informatica*, 39-53.
- Da Silva, C., & Cardozo, O. (2015). Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso de suelo residencial en Resistencia (Argentina). *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*, 23-40.
- DANE. (2018). *Resultados censo nacional de población y vivienda 2018, Sogamoso, Tunja, Boyacá*. . CNPV.
- DNP. (2014). *Nota técnica 6: Guía para la realización de paneles de expertos en la valoración de riesgos transferibles en proyectos de asociación público privada*. Bogota.
- INVIAS. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte.
- Moreno, R. A., Rodríguez, R. H., & López, J. C. (2018). *Empresarios del sector privado de la construcción dentro del proceso de urbanización en el municipio de Tunja 1974-2014*. Tunja: In Vestigium Ire.
- Ordoñez, P., & Cabrera, P. (2011-2012). *Lección 6. Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica*. Colombia: UNGIS.
- Osorio, J. C., & Orejuela, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, 247-252.
- Saaty, T. (2008). *Decision making with the analytic hierarchy process*. S/N: International journal of services sciences.
- Sanint, E. Á., & Sanín, A. (2010). Determinación de restricciones y posibilidades ambientales para la expansión del transporte de gas natural en Colombia. *Gestión y ambiente*, 131-148.
- Tunja, M. d. (2014). *Decreto 241 de 2014. Plan de ordenamiento territorial*. Tunja: Alcaldía de Tunja.