



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**FORMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA
METODOLÓGICA PARA EL SEGUIMIENTO Y
EVALUACIÓN DE ZONAS VERDES EN LA
COMUNA DE BELÉN DEL MUNICIPIO DE
MEDELLÍN**

María Guadalupe Londoño Quintero

Ana Lucía Elorza Parra

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2020



**Formulación de una estrategia metodológica para el seguimiento y evaluación de
zonas verdes en la comuna de Belén del municipio de Medellín**

María Guadalupe Londoño Quintero

Ana Lucía Elorza Parra

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Especialistas en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesores (a):

Ing. Juan Carlos Valdés Quintero, PhD.

Línea de Investigación:

Gestión y Manejo De Zonas Verdes y Bosque Urbano

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería.

Medellín, Colombia

2020

FORMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA METODOLÓGICA PARA EL SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE ZONAS VERDES EN LA COMUNA DE BELÉN DEL MUNICIPIO DE MEDELLÍN

María Guadalupe Londoño Quintero¹ Ana Lucía Elorza Parra² Juan Carlos Valdés Quintero³

Resumen

La ausencia y deterioro de los espacios verdes y el arbolado urbano han puesto en alerta a las diferentes entidades encargadas de la planificación y el ordenamiento territorial de las grandes ciudades; la necesidad de definir criterios claros y objetivos para la selección de zonas verdes es por lo tanto una de las grandes apuestas dentro de los procesos de gestión ambiental urbanos. En el presente estudio se plantea una aproximación de un modelo para la selección de zonas verdes potenciales en la Comuna 16 (Belén) del Municipio de Medellín a partir de variables de tipo biofísico y socioeconómico, utilizando técnicas de análisis jerárquico multicriterio, el software ArcGIS y su herramienta Model Builder para realizar la modelación y simulación de las variables involucradas en la problemática. El Cerro Nutibara y el borde occidental de la comuna son sitios de especial interés para la gestión de espacios verdes en el área de estudio, sus diversas condiciones biofísicas, problemáticas sociales como las complejidades de invasión, minería ilegal, procesos de gentrificación y crecimiento urbano acelerados han ocasionado que la gestión del espacio público verde no sean la prioridad en las entidades encargadas de la gestión ambiental.

Palabras claves: Zonas verdes, adecuabilidad, biofísico, socioeconómico, modelo, Jerarquización, espacio verde, arbolado urbano, gentrificación.

Abstract

The absence and degradation of green spaces and urban trees have alerted the different entities responsible for planning and territorial ordering of large cities; the need to define clear and objective criteria for the selection of green areas is therefore one of the great bets within urban environmental management processes. In the present study, an approximation of a model for the selection of potential green areas in Comuna 16 (Belén) of the Municipality of Medellín is proposed based on biophysical and socioeconomic variables, using multicriteria hierarchical analysis techniques, the ArcGIS software and its Model Builder tool to perform the modeling and simulation of the variables involved in the problem. Cerro Nutibara and the western edge of the commune are sites of special interest for the management of green spaces in the study area, its various biophysical conditions, social problems such as the complexities of invasion, illegal mining, gentrification processes and accelerated urban growth. have caused the management of green public space not to be the priority in the entities in charge of environmental management.

Key words: Urban greening, suitability, biophysical, socioeconomic, model, hierarchy, green space, urban trees, gentrification.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad más del 50 por ciento de la población mundial vive en las grandes ciudades y se espera que para el 2050 esta cifra continúe creciendo hasta alcanzar valores superiores al 70% por ciento (Salbitano et al., 2017). Los acelerados procesos de expansión urbana se

caracterizan por modificar las condiciones biofísicas de los ecosistemas naturales donde estos se desarrollan, lo cual trae consigo una serie de impactos negativos sobre el capital natural y el sistema socio ecológico urbano (Bonilla-Bedoya et al., 2019).

La enorme dependencia que existe entre el ser humano y su medio natural es innegable, es por

¹ Ingeniera Forestal, Estudiante Especialización Medio Ambiente y Geo informática, Universidad de Antioquia

² Ingeniera Forestal, Estudiante Especialización Medio Ambiente y Geo informática, Universidad de Antioquia

³ Ing. PhD, Asesor de trabajo de grado, Profesor Titular PCJIC

ello que el concepto de sistema socio – ecológico se hace fundamental para comprender un fenómeno tan complejo como lo es la urbanización. Los sistemas socio ecológicos son una estructura compleja donde interactúan de una manera resiliente y sostenible los elementos de los subsistemas ecológico y socioeconómico mediante una serie de relaciones adaptativas variables que giran en torno a un “stock” de recursos naturales o capital natural, el cual es el encargado de soportar todas las funciones y procesos ecológicos que permiten a los ecosistemas generar ese flujo de servicios y beneficios que las personas requieren para su supervivencia (Frank, 2017). De acuerdo con Laterra et al. (2011) las funciones ecosistémicas se definen como todos esos procesos que soportan la provisión de determinado servicio ecosistémico (ej., Ciclos biogeoquímicos, control de la erosión, secuestro de carbono, entre otros.) los cuales, son considerados como todos aquellos procesos asociados al funcionamiento de los ecosistemas de los que se derivan beneficios directos o indirectos para la sociedad (ej., Control de la contaminación, seguridad alimentaria, etc.).

En general todas las ciudades tienen en común tres tipos de infraestructuras diferentes: La infraestructura “gris” representada en las diversas edificaciones, pavimentos, andenes, etc., la infraestructura “verde” denominada como zonas que comprenden árboles, arbustos, pastos, bosques, jardines, entre otros espacios y la infraestructura “azul” que representa todos los ríos, lagos, quebradas y otros cuerpos de agua (Salbitano et al., 2017). A pesar de que el ser humano obtiene la mayoría de bienes y servicios necesarios para su supervivencia de la naturaleza, los procesos de urbanización han girado en torno al desarrollo de la infraestructura gris y han dejado de lado el medio natural, comprometiendo con ello el equilibrio del sistema socio - ecológico urbano y por ende el bienestar de las personas. En una apuesta por restaurar ese equilibrio mediante la promoción de medios de vida sostenibles, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) reconoce dentro varios de los

Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNDP, 2017) la importancia de la vegetación existente en las áreas urbanas y el papel clave de esta para la consecución de un medio ambiente sano para las personas. Por tal motivo, la comprensión de las funciones, servicios ecosistémicos y los beneficios que se derivan de la infraestructura verde urbana se han convertido en un elemento clave dentro de los procesos de planeación urbano regionales de las grandes ciudades.

La vegetación existente en las áreas urbanas provee de múltiples beneficios a sus habitantes como la regulación de la escorrentía superficial, regulación del microclima urbano, almacenamiento y secuestro de carbono, soporte a la biodiversidad urbana y regional, mitigación de los efectos del fenómeno de isla de calor de urbano, etc. (Conway et al., 2019). Sin embargo, todo ese flujo de bienes y servicios en ocasiones se ve condicionado por factores de índole socioeconómico como lo son el nivel de ingreso, el grado de escolaridad, la estratificación económica del sector, procesos de gentrificación, entre otros; lo cual ocasiona que el beneficio derivado de las zonas verdes no sea percibido por todas las personas de la misma forma. En ese sentido, uno de los mayores retos a los que se enfrentan hoy en día las administraciones y los entes de control territorial y ambiental es encontrar y proyectar sitios que cumplan con las condiciones óptimas para el establecimiento de espacios verdes funcionales y accesibles para todos los ciudadanos.

Es importante resaltar que la selección de áreas potenciales para el establecimiento de zonas verdes en las grandes ciudades debe hacerse siempre bajo la premisa “que la ciudad es un sistema socio ecológico por excelencia” (Frank, 2017), y en tal sentido, los criterios de selección deben incluir variables tanto biofísicas como socioeconómicas con el fin de conservar así el equilibrio del sistema y obtener un resultado exitoso. En el presente trabajo se plantea una aproximación hacia un modelo de datos con un enfoque metodológico para la selección de zonas verdes, adaptado a las condiciones biofísicas y

socioeconómicas de la comuna 16 (Belén) del Municipio de Medellín.

El objetivo general del presente estudio es estructurar un modelo metodológico para la selección de zonas verdes (potenciales y establecidas) adaptado a las condiciones biofísicas y socioeconómicas de la comuna 16 (Belén) del Municipio de Medellín, Colombia. Para esto se plantea identificar el papel del bosque urbano en los procesos de planeación, específicamente en la línea de manejo y gestión del espacio público; revisar diferentes modelos de delimitación y priorización de zonas verdes a partir de un conjunto de variables y técnicas de análisis representativas, acordes a las condiciones biofísicas y socioeconómicas. Finalmente, se hace necesario definir y caracterizar los geodatos que soportan las variables seleccionadas para realizar la simulación de un modelo que permita obtener una aproximación a la definición de áreas prioritarias en el establecimiento de zonas verdes en el área de estudio.

2 ANTECEDENTES

La preocupación acerca de la función de los bosques urbanos surge a partir de la expansión urbana no planificada, que como resultado deja la sobreexplotación de los recursos naturales en estas áreas.

Desde el ámbito global, la Agenda 2030 aporta los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) invita al desarrollo sostenible de las regiones a partir de la erradicación de la pobreza y abordaje del cambio climático. El ODS número 11 acerca de “conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” posibilitó la inclusión en la agenda urbana la necesidad de una estrategia mundial para la urbanización en las décadas siguientes. El bosque urbano definido por (Salbitano et al., 2017) como “redes o sistemas que comprenden los montes, grupos de árboles y árboles individuales ubicados en las zonas urbanas y sus alrededores”, se convierte en un factor clave porque además de ser un aporte para los espacios verdes urbanos, aportan a la cohesión

social, la salud humana y el desarrollo económico.

A nivel local, la forma de aproximarse a esa tendencia ha sido la implementación de planes maestros de zonas verdes y manuales de silvicultura Urbana. Para el caso del municipio de Medellín resulta muy importante el capítulo 3 del Manual de Silvicultura Urbana para Medellín (Alcaldía De Medellín, 2015), donde trata acerca de la gestión de la infraestructura verde a diferentes escalas en el municipio permitiendo contextualizar los diferentes espacios y planear el desarrollo de la Infraestructura verde. Allí se tienen en cuenta las áreas verdes contempladas en el Plan de Ordenamiento Territorial (Acuerdo 48 del 2014) como la Estructura Ecológica Principal y Complementaria, así como áreas verdes diseñadas a pequeña escala que tienen como objetivo principal la conectividad espacial y funcional y la oferta de servicios ecosistémicos.

Es por esto que la infraestructura verde para el municipio de Medellín se encuentra clasificada según la función que cumplen en tres grandes clases: Estructura Ecológica (EE), la Red de Conectividad Ecológica (RCE) y las Áreas Verdes diseñadas a pequeña escala (AVPE).

A una escala macro, el municipio define la EE que a su vez se divide en Estructura Ecológica Principal (EEP) y Complementaria (EEC). La EEP se define como espacios con interés estratégico para la ciudad e importancia ecosistémica, asociados comúnmente al sistema orográfico e hidrográfico, a nodos y enlaces estructurantes de la red de conectividad, Sistema Metropolitano de Áreas Protegidas y áreas con interés ambiental, científico y paisajístico. En la comuna de Belén. La EEP está representada por el Cerro Nutibara, Áreas de conservación y protección ambiental en la parte alta de la comuna, enlaces estructurantes de la Red de conectividad ecológica y retiros a las quebradas La Picacha, Altavista y una red de caños.

La EEC está conformada por relictos de vegetación natural y transformada que complementan y conectan la EEP, se caracteriza

por presentar mosaicos de vegetación en diferentes estadios, está conformada por Zonas para la prevención de inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa, Zonas priorizadas por captura de carbono y almacenamiento de biomasa, zonas de recargas de acuíferos y área para aprovisionamiento de alimento y productos forestales.

A escala meso, la infraestructura verde, está englobada en los proyectos que se desarrollan en la ciudad y que hacen parte de la Red de Conectividad Ecológica. En el municipio de Medellín estos espacios están comúnmente asociados al subsistema de espacio público, esparcimiento y encuentro, subsistema de movilidad y predios privados, sujetas a intervenciones para su mejora. En la comuna objeto de estudio, esta infraestructura está representada en separadores de vías, glorietas, parques de barrios y sectores privados como zonas verdes de urbanizaciones, colegios y universidades.

Por último, la escala micro hace referencia a las áreas verdes diseñadas a pequeña escala, como cubiertas ajardinadas, jardines verticales, jardineras, pérgolas. En cantidad, estas son las áreas más comunes dado que están ligadas principalmente a las zonas residenciales.

Como lo mencionan Calaza et al., (2018) un punto de partida para la gestión de los bosques urbanos y periurbanos es el uso de planes maestros, donde se traza una línea base recurriendo a la georreferenciación a diferentes escalas de esta infraestructura. Por supuesto se supondrá mayor detalle en la escala micro, y a menor detalle para la infraestructura macro que en el caso particular es la estructura ecológica (EE). Para la comuna 16 del municipio de Medellín la planeación está dirigida principalmente en la parte alta donde se encuentran áreas de planeación estratégica para lo que se ha definido el Cinturón verde Metropolitano o Borde Urbano Rural en la zona Suroccidental; proyectos a menor escala son aquellos de georreferenciación del arbolado

urbano, mantenimiento y siembra en zonas verdes a pequeña escala.

3 METODOLOGÍA

El enfoque metodológico del presente estudio consiste en la construcción de un modelo de idoneidad o adecuabilidad que incluye variables de tipo biofísico y socioeconómico, para ello se generaron dos submodelos, uno a partir variables de tipo biofísico y otro a partir de variables de tipo socioeconómico, los cuales, serán combinados para obtener el producto final. Para cada modelo se aplicará un análisis jerárquico de pesos ponderados, la representatividad de cada variable será definida mediante un Proceso de Análisis Jerárquico, con la aproximación realizada por Saaty (2008) para el cual se contó con el apoyo de profesionales expertos en el campo de la gestión y manejo del arbolado urbano y zonas verdes. A continuación, se describen de manera detallada el área de estudio y las fases metodológicas para el modelo final y los submodelos que lo componen.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Medellín se encuentra dividido en 16 comunas y 249 barrios cuyos límites administrativos y territoriales actuales se encuentran definidos en el Decreto 346 del 2000 (Figura 1). La comuna 16 (Belén) se encuentra ubicada hacia el extremo sur occidental de la ciudad y se subdivide a su vez en 21 barrios representados en una extensión de 865,02 hectáreas (Municipio de Medellín, 2014)

La zona se caracteriza por presentar pendientes de suaves a moderadas en gran parte de su territorio (0-25%), con excepción de algunos sectores como Altavista, Las Violetas y El Rincón ubicados hacia la parte occidental de la comuna donde es posible observar terrenos mucho más inclinados (>60%). Los cuerpos de agua más representativos de la zona son: La quebrada Altavista, la quebrada La Picacha, la quebrada Casa Diana y El Saladito los cuales, se encuentran su mayoría contaminados y presentan un régimen

hídrico con alteraciones notorias en las temporadas invernales asociadas a procesos erosivos y de deforestación en las partes altas de sus cuencas. Esto es el resultado de actividades como la inadecuada extracción de materiales de cantera, depósitos de aguas negras e invasión de las zonas de retiro para construcción de vivienda informal, zonas de depósito etc. Predominan los

suelos derivados de rocas dioríticas y granodioríticas del Stock de Altavista, depósitos aluviales o coluviales asociados a cuerpos de agua y los suelos residuales de acumulación de escombros y lodos recientes derivados de la intervención antrópica de la zona (Municipio de Medellín, 2011).

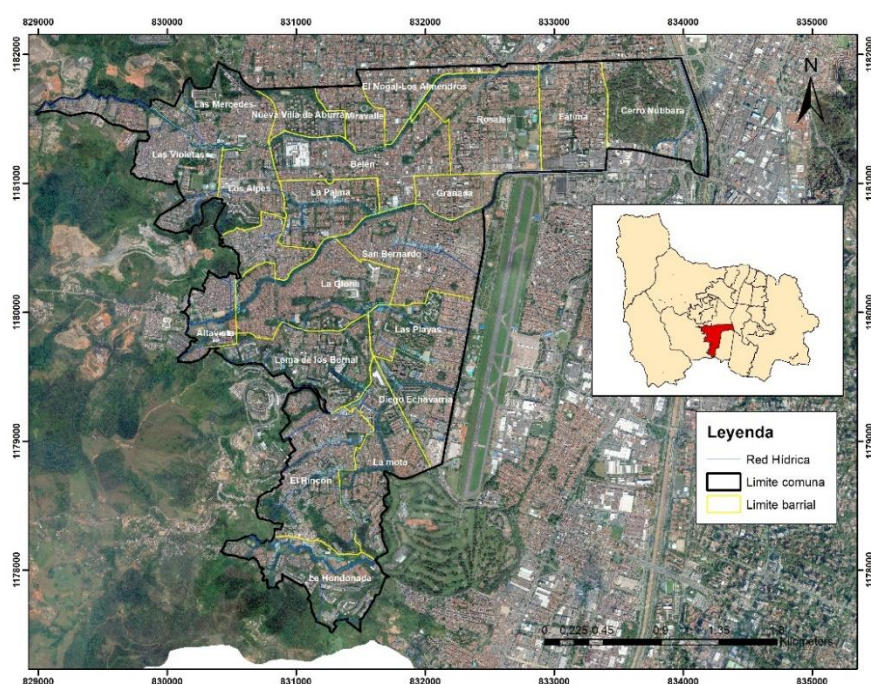


Figura 1. Localización de la comuna 16 (Belén) en el municipio de Medellín
Fuente: Elaboración propia

La comuna de Belén tiene una población de 197.593 habitantes, los cuales corresponden a un 7,8% de la población total del municipio de Medellín (Municipio de Medellín, 2015). El perfil socioeconómico de la zona corresponde en general al de una clase social media – alta, su población se encuentra distribuida desde el estrato 1 hasta el estrato 5, siendo el estrato 3 el más representativo de todos (Municipio de Medellín, 2018). A pesar de que Belén es considerado una de las zonas con mayor potencial de crecimiento urbanístico en la ciudad de Medellín, la existencia de grandes brechas a nivel socioeconómico ha promovido procesos de urbanización complejos e inequitativos que han generado presiones bastantes fuertes sobre los recursos naturales y ecosistemas de la zona.

3.2 PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO SAATY

Considerando que el modelo a proponer está compuesto por múltiples variables (biofísicas y socioeconómicas) es necesario establecer la forma en la que se jerarquizan las entradas del modelo, de manera que permita aportar a la solución del problema. En este caso, se emplea una de las aproximaciones más extendidas en el marco de la decisión multicriterio discreta, la del Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process) de Thomas Saaty (2008)

La metodología propuesta por (Saaty, 2008) se ha utilizado ampliamente, dado que se le asigna tres

ventajas en la toma de decisiones, que son: Establece jerarquías, establece prioridades e incluye el principio de consistencia lógica. Este análisis permite organizar la información entorno a un problema en particular, la descompone y permite su análisis por partes y posteriormente sintetiza las soluciones por partes en una conclusión.

El establecimiento de jerarquías, con el uso de esta metodología está dado en la medida de obtener un objetivo lo cual permite evaluar de manera subjetiva la importancia relativa de cada uno de los criterios para la resolución del problema en cuestión.

El establecimiento de prioridades parte de la comparación binaria entre los elementos teniendo en cuenta unas escalas determinadas, donde se confronta cada par de elementos posible y se establece cual es preferible ante el otro y en que magnitud mediante una escala común, lo cual permite la combinación de criterios cuantitativos y cualitativos. AHP utiliza una escala con valores de 1 a 9 para establecer la preferencia de un criterio sobre el otro, usándose el número 1 para indicar que los dos criterios, variables, alternativas que están siendo comparadas contribuyen de igual manera al cumplimiento del objetivo y el número 9 cuando uno de los elementos de la comparación pareada es absolutamente más importante que la otra en el cumplimiento del objetivo. En la Tabla 1 se explican las diferentes escalas empleadas, no sin antes aclarar que esta escala no supone una cantidad o proporción, sino que en una forma de ordenar los elementos.

Tabla 1. Escala para el establecimiento de prioridades entre las variables en el proceso de análisis jerárquico

Calificación	Descripción
1	Igual
3	Moderada
5	Fuerte
7	Muy fuerte o demostrada
9	Extrema
2, 4, 6, 8	Cuando se necesita un valor entre las anteriores calificaciones

El anterior proceso se lleva a cabo mediante una matriz de comparaciones pareadas de alternativas, criterios o, como en este caso, variables. Se define como sea A una matriz de magnitud $n \times n$ y a_{ij} el elemento en la posición i, j de A , donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y $j = 1, 2, 3, \dots, n$ y además, a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se compara con la columna j . Se caracteriza además por que cuando $i=j$ el valor a_{ij} es igual a 1, puesto que corresponde a la comparación de una variable consigo misma, así:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

y además se cumple que $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$, así:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Por último, está el principio de consistencia lógica, que se refiere a la capacidad de establecer relaciones entre ideas u objetos, buscando congruencia en la forma de relacionarlos y se desglosa entre transitividad y proporcionalidad. La transitividad se refiere a que si estoy comparando más de dos elementos y si A es mejor que B y B es mejor que C , entonces se espera que A sea mejor que C ; la proporcionalidad se refiere a la proporcionalidad de las preferencias, es decir, si A es tres veces mejor que B y B es dos veces mejor que C , se espera que A sea seis veces mejor que C . Cuando estos dos principios se cumplen, se dice que la matriz que calificación es consistente. Esto matemáticamente significa, que una matriz A es consistente si $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ para $i, j, k = 1, 2, 3, \dots, n$.

3.3 SUB MODELO BIOFISICO

El desarrollo del sub modelo biofísico inicia a partir de algunas funciones ecosistémicas que se les atribuyen a las zonas verdes desde las

diferentes herramientas de gestión y manejo del bosque urbano que fueron revisadas y cómo estas pueden representarse o relacionarse con los geodatos disponibles. Es de resaltar que no es objeto de este estudio realizar el modelamiento o valoración de las funciones ecosistémicas o servicios relacionados a partir de las variables incluidas en el modelo y que estas fueron seleccionadas por ser las más recurrentes o más ampliamente estudiadas en lo que a la gestión de zonas verdes y arbolado urbano concierne.

El proceso de recolección de información se inició a partir de la revisión del Plan Maestro de Zonas Verdes del Valle de Aburrá, el cual es la directriz vigente para la gestión y manejo de las zonas verdes y el arbolado urbano, adicionalmente se realizó la consulta del Manual de Silvicultura Urbana y los estudios de conectividad ecológica que ha realizado el Área Metropolitana y el Municipio de Medellín. Posterior a la revisión de los documentos ya mencionados se realizó la solicitud y búsqueda de la información en formato digital y la cartografía básica asociada, es de resaltar que el proceso de adquisición de la información se realizó durante la emergencia sanitaria del COVID-19 y por lo tanto los esfuerzos de las diferentes entidades administrativas estaban enfocados hacia otras actividades, por tal motivo la remisión de datos se limitó a la información disponible en el portal de datos abiertos del Municipio de Medellín (<https://www.medellin.gov.co/geomedellin/index.hyg#divOpenData>) en donde se reportan de manera legal y verificada por la respectiva administración los productos cartográficos y los geodatos de los diferentes proyectos en formato shapefile o ráster. La cartografía base utilizada fue obtenida del Plan de Ordenamiento Territorial del 2014 vigente para el Municipio, dicho documento cuenta con una geodatabase pública en la cual se soportan los procesos de planeación y ordenamiento territorial, servidores web de uso público y diversos procesos de contratación.

La clasificación empleada para cada una de las variables se realizó con base en la información

contenida en el POT y en las diferentes fuentes de información consultadas, esto con el fin de garantizar que los resultados obtenidos fueran compatibles con las diferentes herramientas de gestión y proyectos de intervención de zonas verdes vigentes del municipio, evitando así tener que realizar procesos de unificación de criterios y resultados que a futuro pudieran volverse un limitante administrativo y técnico para la implementación del modelo. Es de resaltar que en el desarrollo del presente trabajo no se realizó ningún proceso orientado a modificar la calidad e integridad de los datos fuente y que los diferentes procesos y métodos de geoprocetamiento se realizaron con el fin de llevar la información a un formato funcional dentro del modelo planteado. A continuación, en la tabla Tabla 3 se presentan las funciones seleccionadas, las variables incluidas en el modelo, la clasificación, la justificación de uso y la literatura consultada.

3.4 SUB MODELO SOCIOECONÓMICO

El desarrollo del sub modelo socioeconómico inicia a partir del reconocimiento de los múltiples beneficios que le son atribuidos a los espacios verdes en los diferentes elementos de planeación y ordenamiento territorial vigentes para la comuna de Belén. Las variables empleadas para el desarrollo del sub modelo fueron identificadas a partir de un análisis detallado del Plan de Desarrollo Local 2015-2027 de la comuna 16 y de las estrategias de intervención enfocadas a incrementar y potenciar la percepción que las personas tienen de dichos beneficios. Es de resaltar que no es el objeto de este estudio realizar una valoración de los servicios ecosistémicos asociados a dichos beneficios y que la información y las variables empleadas corresponden a las que se relacionan de una manera más recurrente con toda la gestión ambiental de las zonas verdes y el arbolado urbano.

El proceso de recolección de información para el componente socioeconómico inició con la revisión de las distintas herramientas de ordenamiento territorial y gestión ambiental

vigentes para la comuna 16, respecto al tema socioeconómico es importante mencionar la pobre disponibilidad de cartografía e información espacializada que posee el Municipio. Por esta razón, gran parte de la información empleada fue extraída de documentos técnicos como los Informes de Calidad de Vida, proyecciones poblacionales disponibles en la página web de la Alcaldía y el portal de datos abiertos del Municipio de Medellín (Tabla 4). Es de resaltar que las categorías y los rangos de clasificación definidos para el submodelo conservan en gran medida las tipologías definidas en los diferentes documentos técnicos utilizados como insumos para extraer la información, evitando con esto procesos de validación que pudieran a futuro dificultar la articulación del modelo con otros instrumentos de gestión.

3.5 MODELO DE ADECUABILIDAD

Se plantea integrar los resultados de los submodelos biofísico y socioeconómico, con el fin de obtener una mejor representación del grado de adecuabilidad de las zonas verdes en la comuna 16 del municipio, enfocándose en maximizar el beneficio y mantener o mejorar la función de las zonas verdes. A continuación, se describen el geoprocesamiento de las variables empleadas.

3.6 INDICE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)

En la teledetección la relación entre las bandas del Infrarrojo cercano y el Rojo permiten la comprobación del vigor o la falta de vitalidad de la vegetación (Manrique, 1999). En este caso se emplea el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) descrito por primera vez por Rowse et al., (1973). Se utiliza este insumo para evaluar y validar el resultado del Modelo de adecuabilidad final propuesto, esto es, comparar las áreas de mayor prioridad para el

establecimiento de zonas verdes y el estado de la vegetación actual en dichas áreas.

3.7 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.7.1 Submodelo biofísico (MBF)

Una vez se obtuvo información que se consideraba de utilidad para el modelo a proponer se evaluó su completitud y consistencia espacial, de manera que se pudiera representar para todo el territorio. Además, se tuvo en cuenta el tipo de dato (punto, línea, polígono) obtenido lo cual define el procesamiento buscando obtener un valor de atributo para toda la extensión de la comuna a analizar. Como se mencionó anteriormente, los datos fueron consultados en fuentes oficiales locales, por lo que se da prelación a la clasificación preexistente, conservando las clases y tipos de áreas abogados en los fundamentos técnicos para cada tema y con el fin que sean compatibles con los modelos de gestión actualmente vigentes en el territorio. Basados en estas clases se asignó una calificación de Muy baja a Muy alta siendo muy baja aquellas zonas donde las características biofísicas son menos adecuadas para la selección de zonas verdes y Muy alta donde las características biofísicas de la zona representan condiciones deseables para la selección de zonas verdes potenciales. Luego se asignaron valores de 1 a 5 como se muestra en la Tabla 2

Tabla 2. Escala de calificación empleada para la clasificación de las variables en el modelo

Calificación	Valor
Muy baja	1
Baja	2
Media	3
Alta	4
Muy alta	5

Se describe el procesamiento realizado para cada variable.

Tabla 3. Descripción de las variables biofísicas utilizadas para la selección de zonas verdes potenciales en la comuna 16 del Municipio de Medellín

Función	Variable	Campo/ Dato usado	Clasificación	Criterio	Justificación de uso	Literatura
Reducción de la escorrentía superficial	Red hídrica	Jerarquía	Drenajes y corredores principales	Alta	Los bosques riparios representan un elemento importante dentro la red de conectividad ecológica del Valle de Aburrá, son considerados enlaces estructurantes por su función de soporte a la biodiversidad urbana, adicionalmente cumplen un papel indispensable la protección de los cuerpos de agua asociados pues contribuyen a la disminución de la escorrentía superficial, aporte de contaminantes, etc.	(Bartesaghi-Koc, Osmond, & Peters, 2019) (Kong, Yin, Nakagoshi, & Zong, 2010)(Uy & Nakagoshi, 2008) (M'Ikiugu, Kinoshita, & Tashiro, 2012) POT Medellín Acuerdo 048 de 2014
			Drenajes y corredores secundarios	Muy alta		
	Retiros a ríos y quebradas	Faja de retiro	60 m	Muy alta		
			30 m	Muy alta		
			25 m	Alta		
			20 m	Alta		
			15 m	Media		
			10 m	Media		
Control de la erosión	Pendientes	Pendiente promedio por zonas	0% - 10%	Muy baja	La presencia de árboles en las partes altas de las cuencas y taludes contribuye a la disminución de procesos erosivos y por ende a la estabilización de taludes, conservación del suelo y cuerpos de agua.	(Sass, Lodder, & Lee, 2019) (Bartesaghi-Koc et al., 2019)
			11% - 25%	Baja		
			26% - 40%	Media		
			41% - 60%	Alta		
			>60%	Muy alta		
Regulación del microclima urbano	Registros del Sistema del Árbol Urbano (SAU)	Densidad de árboles por ha	< 15,9	Muy alta	La presencia de árboles en el entorno urbano puede contribuir significativamente a la disminución de la sensación térmica, regulación de corrientes de viento, depósito de contaminantes en las láminas foliares y disminución de la contaminación por ruido.	(Fan, Johnston, Darling, Scott, & Liao, 2019) (Bartesaghi-Koc et al., 2019)
			15,9 – 79,6	Alta		
			79,6 – 175,0	Media		
			175,0 – 286,7	Baja		
			>286,7	Muy baja		
Hábitat	Zonas verdes asociadas al sistema hidrográfico	Nivel	Nivel Zonal / Corregimental	Muy alta	El conocimiento de la infraestructura verde existente en el área de estudio presenta oportunidad para la mejora del ecosistema urbano, puesto que ya está consolidados y pueden implementarse medidas para su preservación y mejora	(AMVA, 2007b)
			Nivel Comunal/ Suburbano Nivel 1	Muy alta		
			Nivel Barrial / Suburbano Nivel 2.	Alta		
			Nivel Vecinal / Veredal.	Media		
	Zonas verdes asociadas al sistema de movilidad	Categoría	Zona verde componente de la sección vial	Baja	En este caso, se incluye el sistema articulador de la movilidad para definir las zonas verdes. Se da preferencia a aquellas áreas para movilidad no	(AMVA, 2007b)

Función	Variable	Campo/ Dato usado	Clasificación	Criterio	Justificación de uso	Literatura
			Separador	Muy baja	motorizada, debido al efecto del ruido, contaminación y barrera espacial que suponen las vías.	
			Sendero peatonal	Alta		
			Pasaje peatonal	Alta		
			Paseo urbano	Alta		
	Red de conectividad ecológica	Elemento	Áreas de Interés Recreativo y Paisajístico	Alta	El sistema ecológico urbano, al tratarse de un sistema compuesto por fragmentos aislados requiere de áreas que estructuren y permitan la conectividad entre sí.	(AMVA, 2007b) POT Medellín Acuerdo 048 de 2014
			Enlace Estructurante	Alta		
			Nodo Estructurante	Alta		
			Nodos y enlaces estructurantes proyectados	Muy alta		

Tabla 4. Descripción de las variables socioeconómicas utilizadas para la selección de zonas verdes potenciales en la comuna 16 del Municipio de Medellín.

Beneficio	Variable	Campo/ Dato usado	Clasificación	Criterio	Justificación de uso	Fuente
Espacios para la recreación y cultura	Espacio público proyectado	Categoría	Ecoparque	Muy alta	La vegetación asociada a los espacios verdes es indispensable para la consecución de un medio ambiente sano para las personas. Múltiples beneficios como la recreación, el contacto con la naturaleza, disminución de los niveles de estrés, etc. Son ampliamente reconocidos y se consideran indicadores de calidad de vida y desarrollo urbano.	(AMVA, 2007a) (Sass et al., 2019) (Sáenz Ruiz et al., 2015)
			Parque recreativo	Alta		
	Espacio público existente	Categoría	Ecoparque	Muy alta		
			Parque cívico	Media		
			Parque recreativo	Alta		
			Plaza	Media		
			Zona verde recreacional	Alta		
Confort térmico y disminución de la contaminación por ruido	Malla Vial	Tipo	Autopista urbana	Baja	La vegetación asociada a los diferentes tipos de vías puede contribuir a la disminución del fenómeno de isla de calor de urbano al ejercer un efecto de enfriamiento del asfalto y otras superficies impermeables asociado a evapotranspiración de los árboles y otros tipos de vegetación asociada. Adicionalmente puede influir en la dispersión y disminución del ruido generado por el tráfico urbano.	(Hiemstra, Saaroni, & Amorim, 2017) (AMVA, 2007b) (Rey Gozalo, Barrigón Morillas, Montes González, & Atanasio Moraga, 2018)
			Sistema Metro	Alta		
			Vías arterias	Media		
			Vías colectoras	Alta		
			Vías peatonales	Muy alta		
			Vías de servicios	Muy alta		
		Uso actual	Comercio	Media		

Beneficio	Variable	Campo/ Dato usado	Clasificación	Criterio	Justificación de uso	Fuente
Incremento del valor de las propiedades	Uso del predio/inmueble		Equipamiento	Alta	La presencia de espacios verdes y zonas arborizadas usualmente no presenta una distribución equitativa en el espacio y se encuentra estrechamente relacionada con factores de índole socioeconómico como el uso del suelo urbano, densidad poblacional, estratificación, etc. En la actualidad el valor socioeconómico de la infraestructura verde es ampliamente reconocido y es considerado un elemento clave dentro del paisajismo urbano. La presencia de zonas verdes y arborizadas es considerada un ítem adicional dentro de los procesos de avalúos catastral y valoración de algunos inmuebles, predios, etc. pues de estas se derivan múltiples servicios y beneficios para la población.	(Escobedo, Adams, & Timilsina, 2015)
			Espacio publico	Alta		
			Industrial	Media		
			Lotes no urbanizables	Muy alta		
			Lotes urbanizables	Muy alta		
			Recreativo y deporte	Alta		
			Residencial	Alta		
	Estratificación socioeconomica	Estrato	Estrato 0	Muy alta		
			Estrato 1	Muy alta		
			Estrato 2	Alta		
			Estrato 3	Media		
			Estrato 4	Media		
			Estrato 5	Media		
			Estrato 6	Media		
Salud física y mental	Densidad poblacional	Habitantes por km2	2955-4654	Muy baja	La presencia de zonas verdes y arborizadas promueve un medio ambiente sano para la personas y se le atribuyen posibles efectos terapéuticos como la disminución de estrés, depresión, ansiedad, etc. El Banco Interamericano de Desarrollo reconoce la importancia de tener un mínimo de espacio público verde por persona (Indicie de Espacio Público Verde), sin embargo las zonas con densidades poblacionales elevadas no cumplen con este indicador y suelen corresponder a zonas industriales, marginadas o de un estrato socioeconómico muy bajo.	(Abelt & McLafferty, 2017) (AMVA, 2007a)
			4655-16769	Baja		
			16770-24169	Media		
			24170-31998	Alta		
			31999-46867	Muy alta		

Red hídrica (RH): Se clasifica según la magnitud del cuerpo de agua en Drenajes y Corredores principales y secundarios. En la primera clase se encuentra el Río Medellín y las quebradas Altavista, La Picacha y La Guayabala, en la segunda se encuentran quebradas y caños de menor orden distribuidos por la comuna. La calificación realizada se basó en la importancia de la protección de los cuerpos de agua para la disminución de la escorrentía superficial, por lo cual se asignó un mayor valor a los drenajes secundarios. A partir de los valores asignados se creó un ráster donde las áreas que no tenían influencia de la red hídrica tomaron valores de 0.

Retiros a ríos y quebradas (RCA): Se tomó información oficial para el municipio de Medellín, donde se presenta el Río Medellín, sus afluentes y los respectivos retiros a las corrientes de agua en el suelo urbano. Estás actualizados según la Resolución 126 de 2016, Gaceta 4402 y la Resolución 201950036863 de 2019, Gaceta 4604, ambas del Departamento Administrativo de Planeación (DAP). Se calificó de media a alta según la distancia al cuerpo de agua, siendo muy alta aquellas áreas que por su cercanía están en el área de influencia directa de la red de drenaje y media aquellas que se encuentran a mayor distancia. Se realizó una transformación de vector tipo polígono a ráster y posteriormente se reclasificó con el fin de asignar valores de 0 a las zonas que no estaban definidas y procurar que al hacer el álgebra de mapas no se anularan por la ausencia de dato para una variable en sitios determinados.

Pendientes (P): A partir de la clasificación de Zona Homogéneas Físicas Urbanas del municipio de Medellín y de su clasificación por rangos de pendiente, se asignó una calificación de muy baja a muy alta dependiendo del valor porcentual de la pendiente. En aquellas zonas donde las pendientes son mayores se asignaron valor de muy alta adecuabilidad para zonas verdes, teniendo en cuenta que la vegetalización de las partes altas y/o de alta pendiente de las cuencas contribuye a la disminución de procesos erosivos y protección de las fuentes hídricas. A medida

que la pendiente disminuye se calificó con valores más bajos, dando prioridad a otras variables biofísicas en estas áreas. Posteriormente se convirtió de polígonos a ráster para facilitar el cruce de mapas.

Densidad de árboles/ha (DA): A partir del censo del Sistema de Árbol Urbano SAU, se obtuvo la ubicación puntual de los árboles de la ciudad. Se calculó la densidad de árboles para la extensión de la comuna 16, en la que cada celda representa la cantidad de árboles por unidad de área, posteriormente se clasificó por Natural breaks en 5 clases, asignando muy alta adecuabilidad en aquellas zonas en que la densidad de árboles fue menor y muy baja donde actualmente hay mayor densidad, puesto que la ausencia de árboles tienen relación con el aumento de la contaminación auditiva por la ausencia de barreras, la disminución de polución por la interceptación en las láminas foliares, aumento en la sensación térmica debido a la ausencia de sombra, entre otras.

Zonas verdes asociadas al subsistema hidrográfico (ZVSH): En el POT se clasifican según su extensión y ubicación. Considerar las zonas verdes actualmente definidas, posibilita el mejoramiento del espacio público existente, se asignaron valores de adecuabilidad altos y muy altos, debido a que áreas reconocidas como zonas verdes, tienen el potencial de ser intervenidas y mejoradas funcionalmente. Se realizó una transformación de vector tipo polígono a ráster y posteriormente se reclasificó con el fin de asignar valores de 0 a las zonas que no estaban definidas y procurar que al hacer el álgebra de mapas no se anularan por la ausencia de dato para una variable en sitios determinados.

Zonas verdes asociadas al subsistema de movilidad (ZVSM): las zonas verdes contenidas se calificaron de muy bajas a altas, aquellas con mejor calificación fueron en las que se favorece la movilidad no motorizada. Esta mayor adecuabilidad se presenta así en contraste con las que están asociadas a vías secundarias y principales motorizadas debido al efecto de ruido,

contaminación atmosférica y la barrera física que representan las vías para la movilidad entre zonas verdes de pequeños animales.

Red de conectividad ecológica (RCE): Este insumo hace referencia a un estudio de conectividad ecológica propuesto para el municipio de Medellín (Acuerdo 048 de 2014). De acuerdo a la clasificación en la comuna 16 se presentan Áreas de interés recreativo y paisajístico, Enlaces Estructurantes, Nodos Estructurantes y Nodos y enlaces estructurantes proyectados. La visión de las zonas verdes, desde la función hacen que estas áreas sean calificadas con los mejores valores de adecuabilidad, por lo que se clasificaron en altas las 3 primeras y en muy alta la última ya que son zonas proyectadas y se articula de una manera adecuada a la presente propuesta. Las áreas que no corresponden a la Red se mantuvieron con valores en cero (0) para permitir que otras variables indicaran su adecuabilidad para el establecimiento de zonas verdes potenciales.

Una vez se obtuvo la asignación de valores para cada una de las variables a emplear se procedió a hacer el álgebra de mapas, donde los insumos fueron los ráster descritos anteriormente, con valores entre 1 y 5, indicando menor y mayor adecuabilidad, respectivamente. Esta operación consistió en una suma de variables ponderadas según la importancia dada por el panel de expertos consultados, así:

$$MBF = aRH + bRCA + cP + dDA + eZVSH + fZVSM + gRCE$$

Donde a, b, c, d, e, f y g son los pesos ponderados de cada variable dentro del modelo, como resultado del proceso de análisis jerárquico.

3.7.2 Submodelo socioeconómico (MSE)

Las variables socioeconómicas se calificaron y clasificaron según la percepción del beneficio percibido por la comunidad. Se obtuvieron datos de espacios públicos existentes y proyectados, vistos como áreas de encuentro social; la distribución de la malla vial como indicador de

movilidad de la población y como áreas con alta adecuabilidad para el mejoramiento de la red de Zonas verdes de la ciudad desde la percepción de disminución de isla de calor; el uso actual de los predios pensados como un potencial de áreas subutilizadas o susceptibles de establecimiento de zonas verdes; la estratificación socioeconómica en búsqueda de la equidad en la distribución de zonas verdes desde el punto de vista funcional; y la densidad poblacional desde el punto de vista del índice de espacio verde definido por el BID.

Para la calificación de las variables se empleó la escala utilizada en la tabla 1, es decir de Muy baja a Muy alta y con valores de 1 a 5.

Espacio Público Proyectado (EPP): En la comuna 16 se presentan dos categorías de espacio público proyectado; la primera es la de Ecoparque entre las que se encuentran Parques del Río y los ecoparques de las Quebradas La Picacha y Altavista, así como Ecoparque Alto los Jaramillos, Morro Pelón, Cerro El Ajizal-Alto El Manzanillo y las microcuencas de las Quebradas La Guayabala, La Picacha y Altavista. La segunda categoría corresponde a los Parques Recreativos proyectados a nivel corregimental como el Lote el Castillo, a nivel barrial como Cementerio de Belén y Belén las Mercedes, a nivel comunal el Parque La Hondonada y Plan Parcial Loma de los Bernal, a nivel municipal el Plan Parcial Ciudadela Rincón y a nivel Regional o metropolitano el Parque Recreativo El Rodeo. Dado que estas categorías se relacionan directamente con el objeto del presente trabajo, se incluyen en el modelo, asignando valores de adecuabilidad Alta para los parques recreativos y de Muy alta para los Ecoparques. Posteriormente se convierte de polígono a ráster con los valores de la tabla 1 y se reclasifica, para asignar el valor de 0 a las áreas distintas a los espacios públicos proyectados, con el fin de poder incluir para dichas zonas los valores asignados en otras variables.

Espacio Público Existente (EPE) : Se presentan cinco categorías diferentes Ecoparque, Parque cívico, Parque recreativo, Plaza y zona verde recreacional, siendo Ecoparque Cerro Nutibara y Zonas verdes recreacionales las de mayor extensión. Pensando el espacio público como gran potencial para el mejoramiento y propuesta de zonas verdes toman calificaciones de Medias a Muy altas según la categoría. Se asignó mejor calificación a aquellas áreas con menor cantidad de piso duro y donde en la actualidad existen condiciones para su implementación. Se convirtió la información de polígonos a raster, considerando el campo de valor con números de 1 a 5 y valores de 0 en las áreas diferentes a espacio público existente.

Malla vial (MV): A partir de los elementos vectoriales de Zonas Homogéneas Físicas Urbanas se extrajo información del tipo de vías que predominan en cada zona de la comuna 16 de Medellín, encontrando las categorías de Autopista urbana, Sistema Metro, Vías Arterias, Vías colectoras, Vías Peatonales y Vías de servicios. En este caso se asignaron calificaciones desde Baja hasta Muy alta adecuabilidad, siendo las de mayor importancia aquellas donde predomina el flujo peatonal y las vías de servicios.

Uso o destinación del predio (UDP): Con base en el elemento vectorial “shape” de Zonas físicas homogéneas urbanas de Medellín se calificó según el uso reportado. En la comuna 16 se presentan zonas con usos Comerciales, Equipamientos, Espacios Públicos, Industriales, Lotes no urbanizables, Lotes urbanizables, Recreativos y para el deporte y Residenciales. Se asignaron calificaciones de media en zonas comerciales e industriales, suponiendo menor disponibilidad para zonas verdes nuevas; zonas para recreación y deporte, espacio público y equipamientos con adecuabilidad alta y zonas de lotes urbanizables y no urbanizables muy altas, dado que tienen alto potencial para convertirse en zonas verdes nuevas o para mejorar las existentes.

Estratificación socioeconómica (ES): A partir del shapefile de Estratificación socioeconómica del municipio de Medellín se extrajo la información para la comuna de interés. Los estratos socioeconómicos menores se presentaron con valores de adecuabilidad mayor para el establecimiento de zonas verdes visto desde el punto de vista de equidad en su distribución y sus beneficios. Los estratos socioeconómicos más altos se calificaron con valores medios, puesto que el establecimiento de zonas verdes es una necesidad general, aunque en menor proporción en sitios mejor planificados.

Densidad Poblacional (DP): Se presenta por barrio la densidad poblacional. Posteriormente se convirtió a ráster y se clasificó de Muy bajo a Muy alto (valores de 1 a 5) a partir de una reclasificación de 5 clases por el método estadístico Natural Breaks.

Posteriormente se realizó álgebra de mapas, tomando como insumo la información socioeconómica rasterizada, con valores entre 1 y 5, indicando menor y mayor adecuabilidad, respectivamente. Esta operación consistió en una suma de variables ponderadas según la importancia dada por el panel de expertos consultados, así:

$$MSE = hEPP + iEPE + jMV + kUDP + lES + mDP$$

Donde h, i, j, k, l y m son los pesos ponderados de cada variable dentro del modelo, como resultado del proceso de análisis jerárquico.

3.7.3 Modelo de adecuabilidad final (MAF)

Una vez se obtuvo los resultados de los submodelos biofísico y socioeconómico se procedió a combinarlos, asignando un peso igual para cada uno, como se presenta en la siguiente ecuación.

$$MAF = 0.5 MBF + 0.5 MSE$$

Cabe aclarar que el procesamiento de información descrito en este aparte se realizó en el software ArcGIS, versión 10.7.1, bajo una

licencia educativa suministrada por la Universidad de Antioquia, y los procesos fueron organizados y ejecutados mediante la

herramienta Model Builder. En la Figura 2 se presenta el diagrama de los submodelos y modelo final.

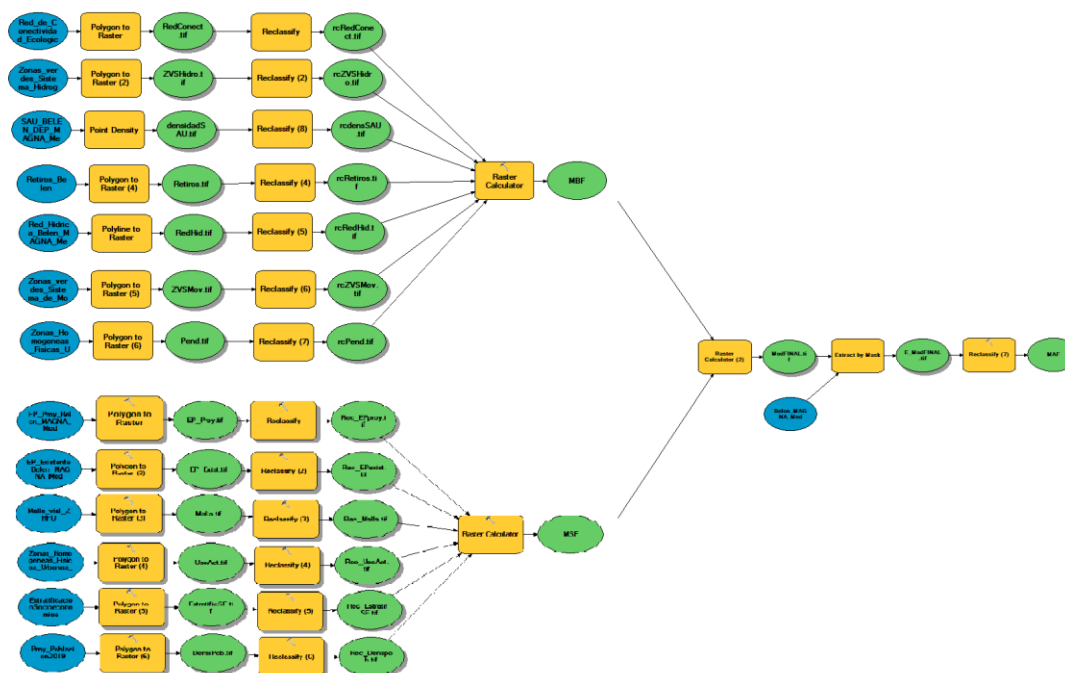


Figura 2. Diagrama del modelo planteado.
Fuente: Elaboración propia

3.7.4 Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

A partir de un ortofotomosaico del municipio de Medellín con una resolución espectral de 4 (R, G, B, NIR) para el año 2010 con resolución espacial de 0.15 m se calculó el NDVI siguiendo la siguiente ecuación, donde NIR es la banda del infrarrojo cercano y R es la banda del Rojo.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Este índice varía de -1 a 1, Merg et al. (2011) proponen una clasificación para los valores del NDVI donde valores menores a 0.1 corresponden a suelos sin vegetación, Nubes y cuerpos de agua, valores entre 0.1 y 0.2 áreas de Vegetación Ligera, valores entre 0.2 y 0.4 Vegetación mediana y valores mayores a 0.4 Vegetación alta. Por su parte (Canada Centre for Remote Sensing, n.d.) establece que valores del NDVI muy altos

indican vegetación saludable debido a la alta reflectancia de la luz infrarroja y relativamente baja reflectancia de la luz roja. Estos conceptos se retoman en el análisis de los resultados.

4 RESULTADOS

4.1 PROCESO DE ANÁLISIS JERARQUICO

Se tuvo en cuenta el criterio de 10 profesionales con experiencia en la planificación del territorio y en el manejo de zonas verdes urbanas. Se plantearon las variables a emplear y cada una de los expertos procedió a calificar pares de variables donde elegía cual era más importante para el objetivo propuesto y posteriormente daba una proporción de la importancia sobre la otra variable. En la Figura 3 se presenta el resultado de los pesos ponderados por grupo de variables,

empleados en la modelación. Como resultado de este análisis jerárquico se encontró que, de las variables biofísicas consideradas, la de mayor importancia resultó ser la Red de Conectividad Ecológica y la de menor ponderación la pendiente

mientras que para el submodelo socioeconómico la variable de mayor peso fue la densidad poblacional y la de menor fue el tipo de malla vial presente en las zonas.

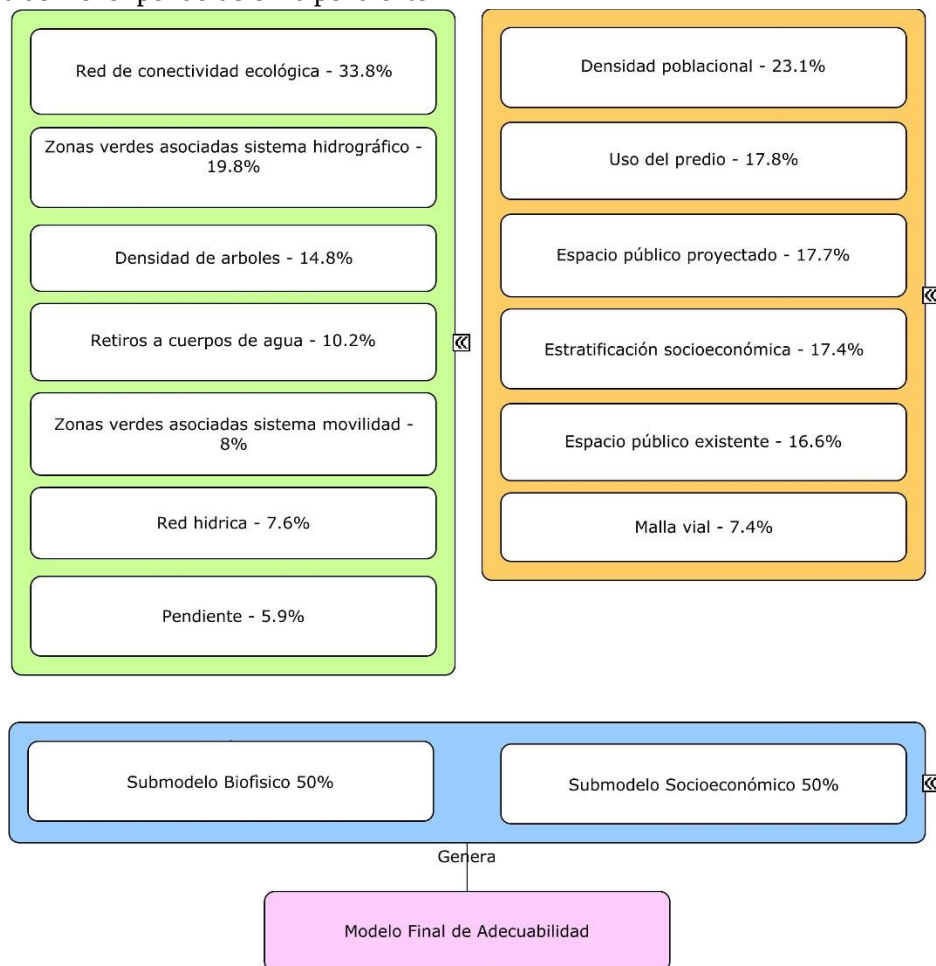


Figura 3. Ponderación de variables utilizadas en la modelación.

Fuente: Elaboración propia

4.2 SUBMODELO BIOFÍSICO

Los resultados del modelo biofísico se presentan (Figura 4) en una escala de color de semáforo donde las tonalidades de verde, representan la menor adecuabilidad es decir valores cercanos a 1 y los colores naranja y rojo representan los sectores con mayor adecuabilidad para el establecimiento y/o intervención de zonas verdes. Era de esperarse que las áreas asociadas al sistema hidrográfico presentaran mayores valores

puesto que parámetros como retiros, mayores pendientes y zonas verdes ya establecidas en el territorio aportan mayor peso. Sin embargo, resulta de gran importancia aquellas áreas coloreadas de color amarillo, puesto que visualmente representan retos y dan pie al análisis puntual.

En el área donde se ubica el cerro Nutibara, uno de las áreas de protección urbana declarada al interior de la comuna de interés, es posible

observar que las variables biofísicas evaluadas con el objetivo de seleccionar zonas verdes potenciales, en general toman valores medios, principalmente por su importancia en la red ecológica de la ciudad, que resultó ser la variable de mayor importancia durante el análisis. De igual manera, el área alrededor del Caño la Mota, es un punto de interés para la planeación de zonas verdes urbanas, dada su cercanía a cuerpos de

agua y su ubicación que lo convierte en un enlace en la red de conectividad. Otras áreas cuya adecuabilidad es mayor, coinciden con la existencia de zonas verdes, arborizadas en el área de estudio, las cuales pueden ser propuestas para su potenciación y mejoramiento a partir de estrategias de planeación.

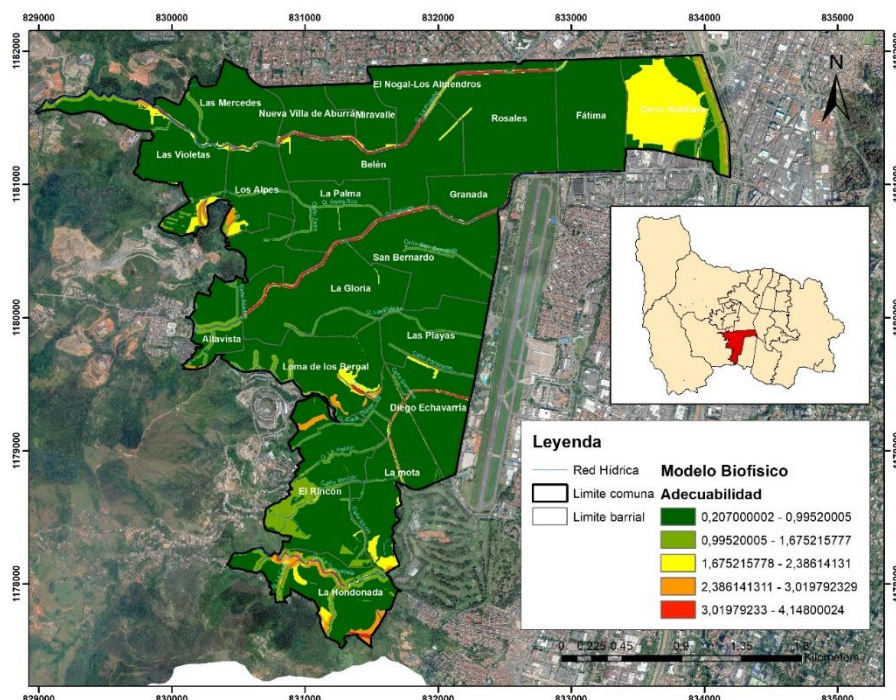


Figura 4. Resultado del submodelo biofísico para la selección de zonas verdes potenciales en la comuna 16 del municipio de Medellín

4.3 SUBMODELO SOCIOECONÓMICO

Posterior al procesamiento de los datos y los valores descritos en la Tabla 4 para el componente socioeconómico, se obtuvo un mapa de idoneidad o adecuabilidad de sitio para la ubicación de zonas verdes potenciales en la comuna 16 (Belén). El mapa resultado se divide en cinco categorías que van de cero a cinco y se representan con una escala de semáforo. Las áreas representadas en color verde oscuro corresponden a las áreas menos idóneas, mientras que las áreas representadas en color rojo, corresponden a las áreas más idóneas para el establecimiento de zonas verdes potenciales, es

decir aquellos donde son más requeridas (Figura 5).

En general las áreas donde más se requiere el establecimiento de zonas verdes se encuentran ubicadas hacia la zona sur occidental de la comuna, siendo El Rincón y La Loma de los Bernal los sectores más críticos. Los barrios ubicados hacia la zona norte occidental presentan en general valores intermedios, mientras que los barrios ubicados hacia la zona centro y norte oriental presentan valores bajos, con excepción de La Mota, San Bernardo y Cerro Nutibara donde también es posible evidenciar valores intermedios de idoneidad.

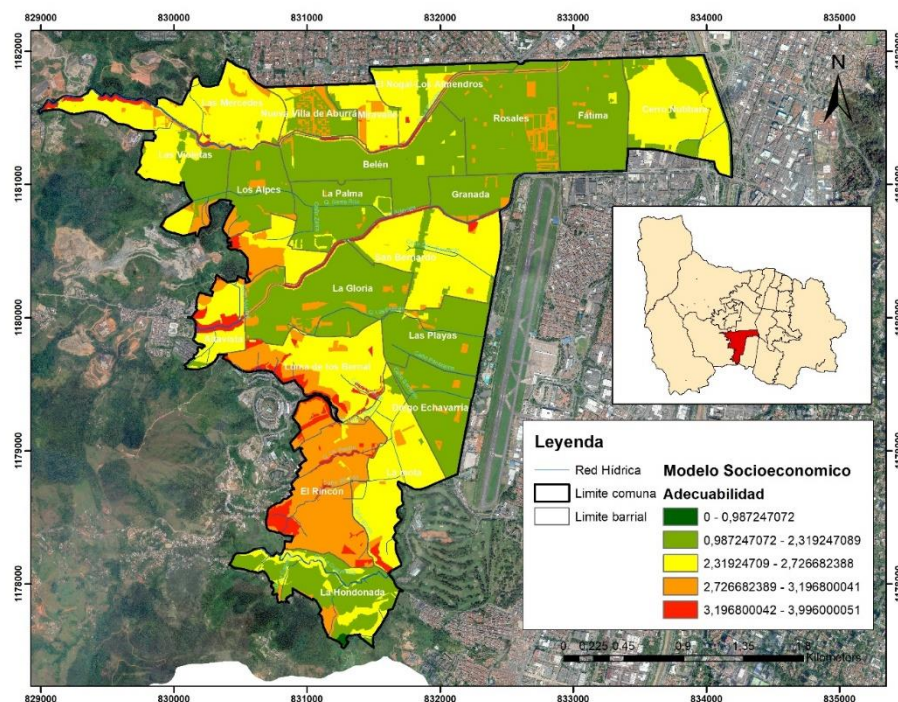


Figura 5. Resultado del submodelo socioeconómico para la selección de zonas verdes potenciales en la comuna 16 del municipio de Medellín

4.4 MODELO DE ADECUABILIDAD FINAL

Luego de combinar el submodelo biofísico con el sub modelo socioeconómico (Figura 6) se obtuvo el mapa de idoneidad o adecuabilidad de sitio final para la comuna de Belén, al igual que los mapas de los submodelos anteriores, también presenta una calificación de cero a cinco representada en escala de semáforo donde las áreas verdes son aquellas con un valor más bajo de idoneidad y las rojas corresponden a aquellas

zonas con valores mayores, de acuerdo a todas las variables empleadas en la construcción del modelo final para el establecimiento de zonas verdes. Las zonas más críticas se reducen a relictos pequeños concentrados principalmente hacia la zona occidental de la comuna y los cuerpos de agua más representativos de la misma. Sectores como El Rincón, La Loma de los Bernal y El Cerro Nutibara siguen siendo representativos en el mapa al presentar valores de idoneidad medios a altos, mientras que otros barrios como Fátima, Belén y La Palma presentan valores muy bajos.

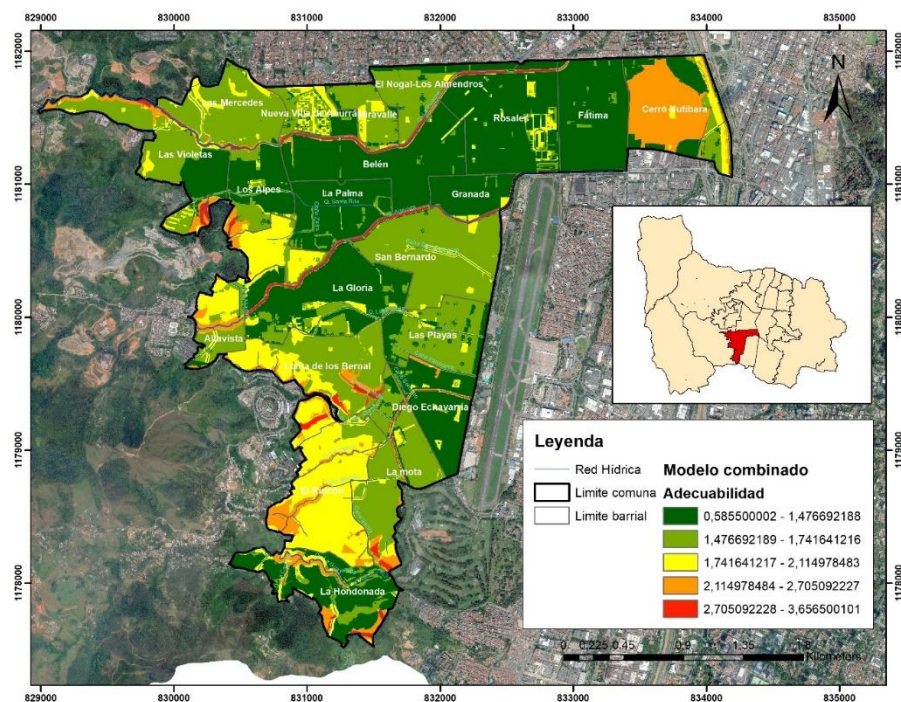


Figura 6. Resultado del modelo de adecuabilidad final para la selección de zonas verdes potenciales en la comuna 16 del municipio de Medellín.

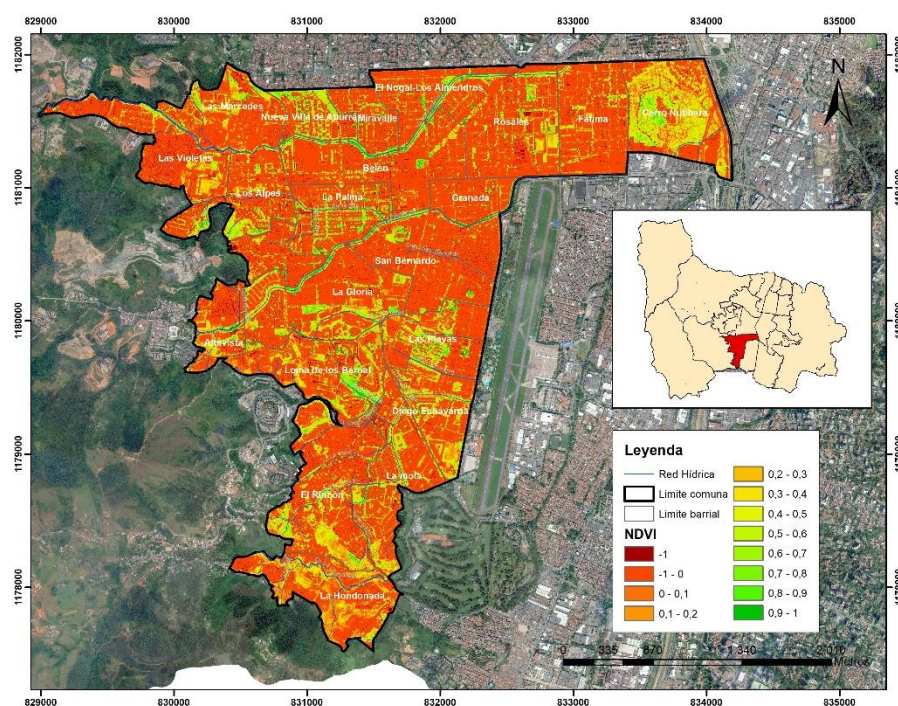


Figura 7. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) para el área de estudio

4.5 INDICE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI)

El mapa de NDVI para la zona de estudio se presenta en la Figura 7. Se observa que los mayores índices se presentan en el área del Cerro Nutibara y los retiros de las quebradas La Picacha y Altavista representando la vegetación asociada a esas áreas. Como es de esperarse, la mayoría de la extensión está en valores menores a 0.1 dado que se trata de una matriz de infraestructura gris.

5 DISCUSIÓN

A partir del análisis de los resultados obtenidos se puede deducir que la comuna de Belén es un territorio de contrastes muy marcados, tanto a nivel biofísico como socioeconómico y que la unión de ambos es indispensable para poder obtener un modelo adecuado en lo que a la gestión de la zonas verdes y arbolado urbano respecta. Partiendo de un primer submodelo enfocado solo a variables de tipo biofísico (Figura 4), es importante resaltar que la comuna de Belén comparte todo su costado occidental con el corregimiento de Altavista, esta condición geográfica hace que la gestión, manejo y control ambiental de este territorio sea mucho más compleja que la de otras comunas pues debe ser articulada con la realizada por CORANTIOQUIA, entidad responsable del control y manejo ambiental de la zona rural. Los bajos niveles de adecuabilidad que se evidencian en los resultados del submodelo biofísico pueden ser atribuibles al hecho de que parte de los ecosistemas estratégicos de esta comuna no se encuentran ubicados directamente en la zona urbana sino en el corregimiento de Altavista, un ejemplo de ello son las cabeceras de las quebradas: La Picacha, La Altavista, La Guayabala y La Pabón (Municipio de Medellín, 2014). Las zonas de alta pendiente, bosques riparios y fajas de retiro más anchas se encuentran fuera de la extensión espacial utilizada en la modelación y por lo tanto le restaron significancia al resultado final del submodelo. Es importante señalar que a pesar de que en general

se obtuvieron valores muy bajos de adecuabilidad, el Cerro Nutibara figura como una de las áreas con mayor potencial para el establecimiento de zonas verdes, su representatividad dentro de la modelación está relacionada con la gran densidad de árboles establecidos en su jurisdicción, pendientes representativas y calificación de nodo dentro de la Red de Conectividad Ecológica Urbana (AMVA, 2007 & UNAL, 2009). A pesar de la poca relevancia que evidencia este sub modelo, es importante señalar que el proceso de análisis jerárquico que se desarrolló para definir los pesos ponderados de las variables en el modelo se orientó a la premisa de conservar y potenciar diversas funciones ecosistémicas asociadas a las zonas verdes, esta primera aproximación del modelo sugiere que estos ecosistemas estratégicos ubicados por fuera deberían ser los ejes orientadores de la planeación ambiental en la zona urbana de esta comuna.

La comuna de Belén presenta un grado de mixtura considerable en lo que a condiciones socioeconómicas respecta, al analizar los resultados obtenidos en el sub modelo socioeconómico es posible evidenciar que una distribución equitativa de los espacios verdes ha sido compleja dadas las realidades sociales del territorio (Figura 5). La comuna de Belén presenta niveles socioeconómicos mucho más bajos, con excepción de sectores como La Loma de Los Bernal, hacia la zona occidental del territorio que colinda con el corregimiento de Altavista (Municipio de Medellín, 2015). La presencia de ladrilleras, focos de minería ilegal de material de cantera, procesos erosivos y de deforestación, entre otros, son algunos de los fenómenos que se encuentran en la zona de transición urbano-rural de la comuna y que, en conjunto con problemas de orden público, fenómenos de invasión, densidades poblacionales muy elevadas, etc., hacen que la gestión de los espacios verdes sea mucho más compleja y muy necesaria hacia este sector (Municipio de Medellín, 2014). Dentro de los resultados del submodelo socioeconómico llama la atención que

ningún barrio o sector presento valores muy bajos de adecuabilidad, esto parte del hecho de que el enfoque del proceso de análisis jerárquico que se realizó para la selección de pesos ponderados dentro del modelo, se enfocó hacia la premisa de que las zonas verdes son un bien común y que todos sin importar clase o condición social deberían poder disfrutar de sus beneficios.

A pesar de que de ambos sub modelos se obtienen elementos clave que deberían ser tenidos en cuenta dentro de un plan de manejo y gestión de zonas verdes y arborizadas, ninguno por si solo permite explicar la realidad del territorio y sus verdaderas potencialidades. La condición innegable del sistema socio ecológico que tienen las ciudades hace que cualquier proceso de planeación y gestión ambiental o territorial sea inviable si no se articulan los dos componentes. Los resultados obtenidos para el modelo combinado final presentan un escenario mucho más equilibrado que refleja de manera relativamente acertada las realidades del territorio (Figura 6). A pesar, que en general no hubo áreas con niveles de adecuabilidad muy altos, es de resaltar que el Cerro Nutibara sea una de las zonas con un valor de adecuabilidad alto según la modelación combinada. Esto es atribuible al hecho de que este Cerro Tutelar es un elemento referente dentro del paisaje del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, cuenta con una categoría de Área de Recreación y Parque Ecológico Metropolitano y es considerado uno de los nodos estructurantes principales dentro de la Red de Conectividad Ecológica de la ciudad; sin embargo el desconocimiento de su ecosistema, la baja diversidad biológica y una cobertura vegetal dominada en un 65% por especies vegetales introducidas como el ciprés, eucalipto y el Urapán, lo hacen un ecosistema pobre, estructuralmente deteriorado (solo cuenta con un estrato arbóreo superior muy antiguo y uno herbáceo dominante) y con una funcionalidad ecológica en declive (AMVA, 2011). Por tal motivo es un área potencial para la reconfiguración de nuevas zonas verdes y arboladas que sean funcionales no solo desde el

punto de vista socioeconómico sino también ecológico. La planeación actual de cerro es un claro ejemplo de una gestión ambiental enfocada solo hacia las personas sin tener en cuenta la funcionalidad del ecosistema, es necesario entonces priorizar acciones como la restauración ecológica con especies nativas articuladas a procesos de educación ambiental, que incrementen no solo los valores de uso asociados a estos espacios sino también la conciencia por el capital natural crítico que estos representan.

Dentro las zonas con valores de adecuabilidad altos, se encuentran también sectores como Belén Rincón y Altavista los cuales se caracterizan por presentar procesos de planeación y ordenamiento territorial desordenados que han dificultado el establecimiento de zonas verdes y proyectos de arborización. Barrios como La Loma de Los Bernal, a pesar de pertenecer a un estrato socioeconómico mucho más alto que los barrios mencionados anteriormente, resulta representativa dentro de los resultados obtenidos probablemente por ser una de las zonas con mayor proyección y desarrollo urbano dentro de las cuales se pueden desarrollar procesos interesantes de reconfiguración de los espacios verdes existentes y establecer nuevas áreas verdes que puedan ser vistas como un elemento articulador dentro de la planeación urbana de la comuna de Belén.

Al comparar los resultados del NDVI con los resultados del modelo de adecuabilidad final es posible observar que las áreas con mayor nivel de adecuabilidad en general coinciden con las zonas donde el valor del índice es más alto (Figura 6 y Figura 7). A pesar de que la imagen utilizada tiene 10 años de antigüedad y no sería muy preciso utilizarla para realizar análisis funcionales y de estado fitosanitario de la vegetación, el resultado de este índice es un primer indicio de la marcada dominancia de la infraestructura gris frente a la infraestructura verde urbana y de la fuerte necesidad que existe en la comuna de Belén de realizar enriquecimientos de los espacios verdes preexistentes como una primera medida de

intervención orientada a mejorar no solo la calidad de los ecosistemas estratégicos y zonas verdes, sino también de las personas. Sitios estratégicos como El Cerro Nutibara, algunos parques cívicos y zonas verdes de uso recreativo-deportivo muestran valores de NDVI entre 0,1 y 0,6 los cuales sugieren que la vegetación establecida en dichas áreas podría no estar en buenas condiciones o ser vegetación madura. La validación de esto estaría sujeto a verificaciones de campo que no fueron realizadas en el presente estudio.

La construcción y resultados de este modelo es indiscutiblemente un primer paso para definir posibles zonas verdes y arboladas en la comuna de Belén, sin embargo, debe ser articulada con otras herramientas de gestión del espacio público verde como los programas de remoción de piso duro, proyectos macro dentro del ámbito metropolitano como Mas Bosques para Medellín (Hoyos Estrada, 2009), el Cinturón Verde Metropolitano y demás Proyectos Urbanos Integrales del Ámbito de Ladera vigentes en esta zona para poder ser viable dentro de los procesos de planeación urbano regionales. A pesar de que tanto a nivel biofísico como socioeconómico se tiene una primera aproximación de la realidad del territorio, sería interesante contar con información de mayor detalle que no es de uso público para este tipo de estudios como por ejemplo: Imágenes satelitales recientes que cuenten con banda infrarroja y permitan calcular índices de vegetación como el NDVI y establecer series de tiempo, inventarios forestales e imágenes LIDAR que brinden una idea de la diversidad de especies arbóreas, grado de ocupación de las zonas verdes e información socioeconómica espacializada como la levantada en las encuestas de calidad de vida disponibles para la zona. La viabilidad de este tipo de herramientas depende indiscutiblemente de la articulación que se genere entre los diferentes entes administrativos, no solo de la zona urbana sino también de la rural, aunar esfuerzos por enriquecer los espacios verdes debe ser una causa conjunta en pro de mejorar no solo la calidad de

vida de las personas sino también de nuestros ecosistemas.

6 CONCLUSIONES

La inclusión de variables tanto biofísicas como socioeconómicas, permite que los resultados de la modelación representen la potencialidad para el establecimiento de zonas verdes que permitan el mantenimiento y mejora de las funciones ecosistémicas y la percepción de sus beneficios por la comunidad. A partir de esto, los planes de gestión de las zonas verdes de la ciudad, en particular las de la zona de estudio, deben incluir la articulación con las realidades sociales, las dinámicas poblacionales, la expansión y transformación urbana y la actual infraestructura verde.

La promoción del bosque urbano en las zonas verdes disponibles debe tener prelación, sin embargo, este debe ser planificado de acuerdo a la ecología, la oferta ambiental y la maximización de los espacios disponibles. Los procesos de enriquecimiento y reconfiguración de las zonas verdes preexistentes se hacen vitales para poder garantizar una funcionalidad ecológica perdurable en el tiempo, aunque la sucesión vegetal es un proceso complejo de conseguir en el entorno urbano, debería de ser una de las grandes apuestas en el manejo de zonas verdes. Por otra parte, el establecimiento de nuevas zonas verdes, debe planearse detalladamente desde un principio, de manera que se considere los tiempos necesarios para que una zona arborizada sea funcionalmente adecuada, por lo que se recomienda que la gestión de las zonas verdes no se limite a la gobernanza local, sino que se implemente a nivel regional.

Un modelo con mejor representación del estado actual y de la potencialidad sería posible si la información que se dice disponible verdaderamente lo fuera, por lo que se hace un llamado gentil a la liberación de la información sobre todo cuando se trata de estudios que aportan elementos relevantes a los procesos de gestión y manejo ambiental.

REFERENCIAS

- Abelt, K., & McLafferty, S. (2017). Green streets: Urban green and birth outcomes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph14070771>
- Alcaldía De Medellín. (2015). *Manual de Silvicultura Urbana para Medellín* (Primera). Medellín: Fundación Jardín Botánico de Medellín Joaquín Antonio Uribe.
- AMVA. (2007a). *Plan Integral de Desarrollo Metropolitano. Metrópoli 2008-2020, Hacia la Integración Regional Sostenible*. 280.
- AMVA. (2007b). *Plan Maestro de Espacios Públicos Verdes Urbanos de la Región Metropolitana del Valle de Aburrá*. “Hacia un Sistema de Gestión del Espacio Público Verde Urbano en la Región Metropolitana del Valle de Aburrá”.
- Bartesaghi-Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2019). Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37(July 2017), 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.008>
- Bonilla-Bedoya, S., Mora, A., Vaca, A., Estrella, A., & Herrera, M. Á. (2019). Modelling the relationship between urban expansion processes and urban forest characteristics: An application to the Metropolitan District of Quito. *Computers, Environment and Urban Systems*, (September), 101420. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101420>
- Calaza, P., Cariñanos, P., Escobedo, F., Schwab, J., & Tovar, G. (2018). Crear paisajes urbanos e infraestructura verde. In *Unasylva 250* (Vol. 69). Retrieved from www.fao.org/forestry/unasylva.
- Canada Centre for Remote Sensing. (n.d.). *Fundamentals of Remote Sensing*. Retrieved from https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundamentals/fundamentals_e.pdf
- Conway, T. M., Almas, A. D., & Coore, D. (2019). Ecosystem services, ecological integrity, and native species planting: How to balance these ideas in urban forest management? *Urban Forestry and Urban Greening*, 41(September 2018), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.006>
- de Aburrá, Á. M. del V. (2007). Plan Maestro de Zonas Verdes Urbanas del Valle de Aburrá. In *Plan Maestro de Zonas verdes del Valle de Aburrá*. Retrieved from <https://www.metropol.gov.co/ambientales/flora/zonas-verdes>
- Escobedo, F. J., Adams, D. C., & Timilsina, N. (2015). Urban forest structure effects on property value. *Ecosystem Services*, 12, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.05.002>
- Fan, C., Johnston, M., Darling, L., Scott, L., & Liao, F. H. (2019). Land use and socio-economic determinants of urban forest structure and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 181(September 2018), 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.09.012>
- Frank, B. (2017). Urban Systems: A Socio-Ecological System Perspective. *Sociology International Journal*, 1(1). <https://doi.org/10.15406/sij.2017.01.00001>
- Hiemstra, J. A., Saaroni, H., & Amorim, J. (2017). Chapter 2 The Urban Heat Island: Thermal Comfort and the Role of Urban Greening. In *Springer* (p. 300). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9>
- Hoyos Estrada, C. (2009). Formulación del proyecto MDL forestal “Más bosques para Medellín: un ambiente sano para el presente y el futuro” en el municipio de Medellín (Antioquia – Colombia). *Producción + Limpia*, 4(1), 83–108.
- Kong, F., Yin, H., Nakagoshi, N., & Zong, Y. (2010). Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 95(1–2), 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.11.001>
- Laterra, P., Castellarini, F., & Orúe, M. E. (2011). ECOSER: un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. In *ECOSER: un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su*

- valor social . (pp. 359–389).
<https://doi.org/10.1016/B978-84-8174-709-6.50016-6>
- M'Ikiugu, M. M., Kinoshita, I., & Tashiro, Y. (2012). Urban Green Space Analysis and Identification of its Potential Expansion Areas. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 35(December 2011), 449–458.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.110>
- Manrique, E. G. (1999). Índice de Vegetación. Aplicación del NDVI. *VIII Congreso Nacional de Teledetección*, 217–219.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., ... Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen*, 13(11), 1–11.
- Metropolitana, Á., Aburrá, V. De, Patricia, L., & Morales, G. (2011). *Plan de Manejo del Área de Recreación Parque Ecológico Cerro Nutibara*. Retrieved from
<https://www.metropol.gov.co/planeacion/areas-protegidas/Documents/Planes/2011-plan-de-manejo-cerro-nutibara.pdf>
- Municipio de Medellín. (2011). *Descripción de zonas homogéneas, Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín*. Medellín.
- Municipio de Medellín. (2014). Plan de desarrollo local: comuna 16 belén. In *Departamento Administrativo de Planeación*. Retrieved from
https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pcdesign/SubportaldelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_17/ProgramasyProyectos/Shared
- Municipio de Medellín. (2015). *Perfil Demográfico 2016 - 2020 Comuna 16. Belén*. Medellín.
- Municipio de Medellín. (2018). Informe de Calidad de Vida de Medellín 2018. In *Medellín como Vamos* (Vol. 53). Medellín.
- Rey Gozalo, G., Barrigón Morillas, J. M., Montes González, D., & Atanasio Moraga, P. (2018). Relationships among satisfaction, noise perception, and use of urban green spaces. *Science of the Total Environment*, 624, 438–450.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.148>
- Rowse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. *Third ERST Symposium, Vol 1*(NASA SP-351), 309–317.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *Int. J. Services Sciences Int. J. Services Sciences*, 1, 83–98.
<https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Sáenz Ruiz, O. A., Arroyave Hernández, E., Parra Sánchez, R. H., Giraldo Jiménez, J. A., Soto Gómez, N. I., Florez Botero, L. Z., ... Montoya Luna, L. M. (2015). *Manual de Silvicultura Urbana del Municipio de Envigado* (Primera; M. de Envigado, ed.). Envigado: Municipio de Envigado.
- Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M., & Chen, Y. (2017). *FAO: Directrices para la silvicultura urbana y periurbana*.
- Sass, C. K., Lodder, R. A., & Lee, B. D. (2019). Combining biophysical and socioeconomic suitability models for urban forest planning. *Urban Forestry and Urban Greening*, 38(March 2018), 371–382.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.019>
- UNDP. (2017). Application of the Sustainable Livelihoods Framework in. *Guidance Note*, 1–21.
- Universidad Nacional de Colombia. (2009). *CARACTERIZACIÓN BIÓTICA, VALORACIÓN SOCIAL Y ECONÓMICA DE LAS ÁREAS VERDES ASOCIADAS A UNA RED DE CONECTIVIDAD ECOLÓGICA, COMO BASE PARA EL MANEJO Y GESTIÓN DE LA RED ECOLÓGICA EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ*. Medellín.
- Uy, P. D., & Nakagoshi, N. (2008). Application of land suitability analysis and landscape ecology to urban greenspace planning in Hanoi, Vietnam. *Urban Forestry and Urban Greening*, 7(1), 25–40.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.09.002>