

Procedimiento para la recopilación, procesamiento y consolidación de información necesaria para el desarrollo de SIG utilizados en modelos de regresión de usos del suelo (LUR)

Jorge Andrés Hereira Cabana

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Jhon Jairo Cáceres Jiménez

Ph. D. Civil and Coastal Engineering

Codirector

Yurley Rojas Gelvez

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos	11
2. Marco Teórico.....	12
2.1 Contaminación ambiental de aire	12
2.2 Contaminación del aire en Colombia.....	12
2.3 Modelos de regresión de uso de suelo	13
2.4 Sistemas de información geográfica.....	13
2.5 Implementación de modelos de regresión de uso de suelo como estrategia para mitigar la contaminación del aire	14
2.6 Implementación en Europa (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects - ESCAPE)	14
2.7 Implementación en Medellín-Colombia	15
2.8 Variables geográficas.....	16
2.8.1 Usos del suelo.....	16
2.8.2 Tipo de vía.....	16
2.8.3 Densidad poblacional	17
3. Procedimiento	17
3.1 Recopilación y estructuración de la información	17

3.1.1 Usos del suelo.....	18
3.1.2 Tipo de vía.....	21
3.1.3 Densidad poblacional	28
3.2 Procesamiento de la información.....	33
3.2.1 Zonas de influencia (Buffers).....	34
3.2.2 Intersecar (Intersect).....	35
3.2.3 Resumen de estadísticas (Summary Statistics).....	38
3.3 Consolidación de la información	40
4. Conclusiones	42
5. Recomendaciones.....	42
Referencias Bibliográficas	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Leyenda y simbología de las áreas de actividad.	19
Tabla 2. Leyenda simplificada y codificación RGB.	19
Tabla 3. Clasificación vial POT y su descripción.....	26
Tabla 4. Equivalencia entre clasificación POT y OSM con respectiva codificación RGB.	27
Tabla 5. Datos geográficos vinculados a cada sitio de monitoreo.....	38
Tabla 6. Encabezado de variables vinculadas a sitios de monitoreo.	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Capa de usos del suelo sin simbología, zona urbana de Bucaramanga.	18
Figura 2. Ventana para agregar campo (Add Field).....	20
Figura 3. Usos del suelo reclasificados.....	21
Figura 4. Vías del POT Bucaramanga 2014.	22
Figura 5. Vías del MGN (DANE).	23
Figura 6. Vías de OSM.	24
Figura 7. Comparativa de fuentes de información.....	25
Figura 8. Comparativa de elementos eliminados.....	26
Figura 9. Tipos de vía reclasificado.....	28
Figura 10. Niveles geográficos del MGN para el CNPV 2018.....	29
Figura 11. Localización de manzanas censales en el municipio de Bucaramanga.	30
Figura 12. Zonas urbanas en Bucaramanga.	31
Figura 13. Mapa de densidad poblacional.	32
Figura 14. Sitios de monitoreo en la zona urbana de Bucaramanga.	34
Figura 15. Comparativa de radios de influencia definidos.	35
Figura 16. Intersección de usos del suelo y zonas de influencia de radio de 500 metros.	36
Figura 17. Modificación por intersección en variable usos del suelo.....	37
Figura 18. Configuración de parámetros para la variable usos del suelo	39

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Documento Manual de Procedimiento.

Apéndice B. Tabla de Datos Consolidados.

Resumen

Título: Procedimiento para la recopilación, procesamiento y consolidación de información necesaria para el desarrollo de SIG utilizados en modelos de regresión de usos del suelo (LUR)*

Autor: Jorge Andrés Hereira Cabana**

Palabras Clave: Modelos de regresión de uso del suelo, Sistemas de información geográfica, Uso del suelo, Tipo de vía, Densidad poblacional.

Descripción: Los modelos de regresión de uso del suelo se valen de datos de monitoreo de la calidad del aire y de variables geográficas, comprendidas en sistemas de información geográfica, para realizar estimaciones más acertadas en áreas más grandes donde los datos de monitoreo son relativamente escasos. Existen casos de aplicación de estos modelos tanto a nivel nacional como internacional, sin embargo, en ninguno de los estudios revisados en la presente investigación se ocupan de describir cómo se obtienen las variables geográficas o cómo deben estar dispuestas en los sistemas de información geográfica. En consecuencia, este proyecto busca brindar un procedimiento acertado que permita la recopilación, procesamiento y consolidación de información necesaria en la implementación de los modelos de regresión de uso del suelo. El procedimiento se desarrolló mediante el software ArcGIS y se concentró en variables específicas como el uso del suelo, el tipo de vía y la densidad poblacional, las cuales son bastante comunes en distintos casos de aplicación de los modelos. Se evidenciaron diversas problemáticas en cuanto a la obtención y la calidad de la información, lo que manifiesta la pronta necesidad de una mejoría en los estándares de las bases de datos geográficos disponibles al público a nivel nacional.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez. Ph. D. Civil and Coastal Engineering. Codirector: Yurley Rojas Gelvez. Ingeniera Civil

Abstract

Title: Procedure for the collection, processing and consolidation of information necessary for the development of GIS used in land use regression models (LUR)*

Author(s): Jorge Andrés Hereira Cabana**

Key Words: Land use regression models, Geographic information systems, Land use, Road type, Population density

Description: Land use regression models use air quality monitoring data and model geographic variables found in geographic information systems to make more accurate estimates in larger areas where monitoring data is relatively sparse. There are cases of application of these models both nationally and internationally, however, none of the studies reviewed in this research deal with describing how geographic variables are obtained or how they should be arranged in geographic information systems. Consequently, this project seeks to provide a certified procedure that allows the collection, processing and consolidation of the necessary information in the implementation of land use regression models. The procedure was developed using the ArcGIS software and focused on specific variables such as land use, road type and population density, which are quite common in different cases of application of the models. Various problems were evident in terms of obtaining and quality of information, which shows the immediate need for an improvement in the standards of geographical databases available to the public at the national level.

* Degree Work

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez. Ph. D. Civil and Coastal Engineering. Codirector: Yurley Rojas Gelvez. Ingeniera Civil

Introducción

Una de las problemáticas ambientales en la actualidad es la necesidad del control en los niveles de contaminación del aire en las zonas pobladas del territorio colombiano. Por tal razón, se han planteado diversos métodos de monitoreo ambiental de los cuales se resalta para la ejecución de este proyecto los modelos de regresión de uso del suelo. Sin embargo, para implementación de estos últimos mencionados existe una necesidad de datos que no se obtienen con facilidad y en muchas ocasiones se encuentran en un formato desactualizado, por esto, el objetivo de esta investigación es la extracción, organización y análisis de esta información con el fin de consolidarlos en una base de datos para su utilización.

En este caso se ha optado por tomar la ciudad de Bucaramanga como foco de la investigación dado su bajo control de monitoreo en los niveles de calidad de aire en zonas específicas de la ciudad.

En el 2004 se realizó un estudio por parte de la Universidad de Pamplona en el cual uno de sus objetivos fue identificar los promedios geométricos de material particulado-fracción respirable. Se determinó que, si bien las concentraciones diarias de PM10 no sobrepasaban la norma internacional, los promedios geométricos se encontraban altos. Esto requería un aumento en el control de las fuentes emisoras de material particulado-fracción respirable (Parra, 2004).

En el año 2022 se publicó el artículo “una mirada a la calidad del aire en la zona metropolitana de Bucaramanga” en el cual se observó un alto índice de contaminación en el ambiente de la zona metropolitana de Bucaramanga y del cual se obtuvo la siguiente afirmación:

La situación en enero de ese año no era grave; la calidad de aire se encontraba en niveles buenos, y el material particulado no sobrepasaba los 37 microgramos por metro cúbico PM_{2,5} (que es el límite estipulado por la Resolución 2254 de 2017) (Sarmiento, 2022).

Sin embargo, en febrero la situación desmejoro notablemente y paso de estar en buenos niveles a nivel aceptable. Para el mes de marzo la mayoría de las cinco estaciones de monitoreo se encontraban en alerta naranja (perjudicial para la salud de grupos sensibles) y alerta roja (perjudicial para la salud en general) (Sarmiento, 2022).

Con esto se deja en claro la necesidad de control en la calidad del aire en la ciudad y ante esa necesidad la existencia de la información requerida por los sistemas de monitoreo ambiental para su implementación. que sea accesible para la ciudad y comunidad.

Esta investigación se encuentra centrada en la obtención, procesamiento y consolidación de la información requerida para la implementación de modelos de regresión de uso de suelo. Además, se planteó ante la necesidad y escasez de los datos de monitoreo necesarios para realizar modelos de regresión de uso del suelo, con el fin de obtener una mejor estimación de la contaminación del aire y así tomar decisiones de manera oportuna para mitigar esa problemática.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Elaborar un procedimiento aplicable a nivel nacional que permita la recopilación, procesamiento y consolidación de las variables geográficas de uso del suelo, densidad poblacional y tipo de vía usadas en modelos de regresión de usos del suelo (LUR), mediante la aplicación de software SIG.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar y recopilar de fuentes oficiales disponibles como el DANE e instrumentos de OT vigentes las variables requeridas para el modelado LUR, caso de estudio: la ciudad de Bucaramanga.

Procesar y estructurar en software SIG los datos geográficos recopilados para la ciudad de Bucaramanga.

Redactar el procedimiento desarrollado y construir la base de datos geográfica con las variables procesadas, acorde con los lineamientos establecidos en el manual Escape.

2. Marco Teórico

2.1 Contaminación ambiental de aire

La contaminación de aire es un fenómeno ocasionado por la presencia de partículas y sustancias orgánicas e inorgánicas que son perjudiciales para la salud, tales como el material particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y monóxido de carbono (CO), entre otros (Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire (SISAIRE), s.f.).

2.2 Contaminación del aire en Colombia

Según la organización mundial de la salud (OMS), Colombia es el segundo país con mayor contaminación de América latina. Tan solo en Bogotá se ha registrado nivel 15 en valores anuales de exposición prologada a PM2.5, donde lo recomendado por la OMS es tener un máximo de nivel 10. Se tiene, además, que aproximadamente el 80% de la contaminación proviene de fuentes móviles tales como camiones, motos, buses y demás, y el 20% proviene de fuentes fijas como chimeneas, industrias y minería (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018; Pardo, 2018; Sánchez, 2018).

Según la resolución 2254 de 2017 emitida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible de la república de Colombia para verificar el cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos, la concentración de los contaminantes del aire deberá evaluarse por cada

punto de monitoreo. Adicional a esto, en el párrafo 3 del artículo 2 se establece que las autoridades ambientales competentes deben realizar las mediciones de los contaminantes establecidos en la resolución, de acuerdo con los procedimientos, frecuencias y metodologías establecidas en el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 2254, 2017).

2.3 Modelos de regresión de uso de suelo

Los modelos de regresión de usos de suelo, o LUR por sus siglas en inglés, son modelos que resultan del procesamiento de datos de monitoreo de la contaminación del aire tomados de un número limitado de ubicaciones y una recopilación de variables explicativas (uso del suelo) registradas en un sistema de información geográfica que tiene como objetivo estimar la variación espacial de las mediciones existentes (Hoek, 2017).

2.4 Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta de gestión, en la cual la información disponible se encuentra georreferenciada, es decir, incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado. Los SIG permiten gestionar información con el fin de que esta pueda ser analizada, manipulada y visualizada por los usuarios y entidades competentes para ayudarlos en la toma de decisiones con respecto a la elaboración de estudios de evaluación de impacto ambiental o toma de decisiones con relación al ordenamiento territorial (Sarría, 2006).

2.5 Implementación de modelos de regresión de uso de suelo como estrategia para mitigar la contaminación del aire

Los modelos LUR dependen de los sistemas de información geográfica para su funcionamiento y así poder estimar datos de contaminación del aire donde hay una ausencia de estaciones de monitoreo directo. Para escoger las variables que conformaran los SIG se tiene en cuenta su relación e impacto en la variación espacial de los datos de contaminación del aire, es por esto por lo que se deben recopilar datos como intensidad del tráfico en las calles cercanas a los puntos de monitoreo, densidad poblacional, el uso del suelo, la topografía del terreno, la configuración del sistema vial, las cercanías con las vías principales y factores climáticos (Londoño y Cañón, 2015; ENV.2007.1.2.2.2. European cohort on air pollution (ESCAPE), 2008).

2.6 Implementación en Europa (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects - ESCAPE)

En 21 ciudades de Europa se implementó un monitoreo de contaminación de aire en el cual se documentó la variación de material particulado a largo plazo y su composición (PM y NO_x). En otras 18 áreas se tomó muestra de la variación espacial de las concentraciones promedio anuales de NO_x.

Para este estudio se tomó en cuenta la ubicación de los sitios de medición pues estos determinarían los resultados, por lo tanto, deben estar parcialmente aislados de forma que no sean influenciados por sus entornos cercanos.

Para llevar a cabo este estudio se desarrollaron modelos de regresión de uso de suelo para predecir las concentraciones de las sustancias buscadas en sitios no muestreados. Esta técnica fue desarrollada de manera exitosa en un número de ciudades europeas para la medición de dióxido de nitrógeno y se ha aplicado a otros contaminantes como partes de estudios realizados por parte de la U.E. El procedimiento implementado en el proyecto (la selección de sitios de monitoreo, la recolección de datos, el análisis de datos) fue recopilado en el manual de estudio ESCAPE.

En estos estudios se ha demostrado que los modelos de regresión pueden explicar gran parte de variaciones espaciales en las concentraciones de contaminantes presentes en el aire (ESCAPE, 2008).

2.7 Implementación en Medellín-Colombia

En la ciudad de Medellín se implementaron los modelos LUR en el año 2015 a datos de variables que se encontraban disponibles en enero de 2007 con el fin de estimar la concentración mensual del contaminante PM10 de manera local en 10 sitios de monitoreo en la ciudad.

Para este caso las variables más comunes y significativas para poder calcular la concentración de PM10 en la ciudad fueron la densidad de tráfico y vías cercanas a los sitios de monitoreo. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que las variables distancia a vías principales, densidad de tráfico vehicular y velocidad del viento, serían unas buenas candidatas para explicar la variabilidad local de concentración de PM10 a nivel urbano (Londoño y Cañón, 2015).

2.8 Variables geográficas

Para la implementación del modelo LUR, en Europa se tomaron potenciales variables predictoras como tipo de vía, flujo vehicular, velocidad del viento, temperatura, densidad poblacional, uso del suelo y cobertura del suelo (ESCAPE, 2008). Sin embargo, en varios modelos analizados se encontró que las variables predictoras que estos tenían en común eran densidad vehicular y tipo de vía. Además, en general no se incluyeron variables meteorológicas en los modelos, ya que la medición de algunas variables de este tipo resulta costosa y requiere mucho tiempo (Londoño y Cañón, 2015). Debido a estas consideraciones se optó por describir el procedimiento solamente para las variables de uso de suelo, tipo de vía y densidad poblacional.

2.8.1 Usos del suelo

En el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de cada ciudad se encuentra descrito cómo se distribuyen sus diferentes usos de suelo, conforme a la Ley de Desarrollo Territorial, la cual menciona que estos deben ser de tipo urbano, rural y expansión urbana (Ley 388 de 1997). En este procedimiento se contempla exclusivamente el suelo urbano, pues, se considera suelo urbano a las áreas del territorio que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado (Ley 388 de 1997).

2.8.2 Tipo de vía

El POT de Bucaramanga divide su sistema de movilidad en tres subsistemas que son: de Infraestructura Vial, de Transporte y de Estacionamientos y Parqueaderos (Concejo de Bucaramanga, Acuerdo 011, 2014). Este procedimiento se enfocará en el Subsistema de Infraestructura Vial que en su clasificación contempla la red de vías arterias, la cual prioriza el tráfico vehicular que integra el territorio y consolida del área urbana y de expansión; esta red a su

vez se clasifica en arterias primarias, secundarias y terciarias (Concejo de Bucaramanga, Acuerdo 011, 2014).

2.8.3 Densidad poblacional

La densidad poblacional es una variable que relaciona la población ubicada en una superficie con el área de dicha superficie dando como resultado el promedio de habitantes por unidad de área. En la ciudad de Bucaramanga, para el año 2018, la densidad poblacional era de 3587 hab/km² lo cual la convierte en la séptima ciudad con mayor densidad de población del país (Departamento Administrativo Nacional de estadísticas (DANE), 2018a).

3. Procedimiento

El procedimiento se dividió en tres etapas diferentes con el fin de obtener resultados específicos en cada etapa. Las etapas planteadas constan de la recopilación y estructuración de información, el procesamiento de la información y la consolidación de la información.

3.1 Recopilación y estructuración de la información

En esta etapa del procedimiento se consultaron las fuentes de información relacionadas con cada variable geográfica disponibles de forma virtual. Esto con el fin de obtener datos e información que ayudara a construir la base de datos que alimentara los modelos LUR. Además, se realizó la estructuración de los datos obtenidos, es decir, se realizaron las ediciones,

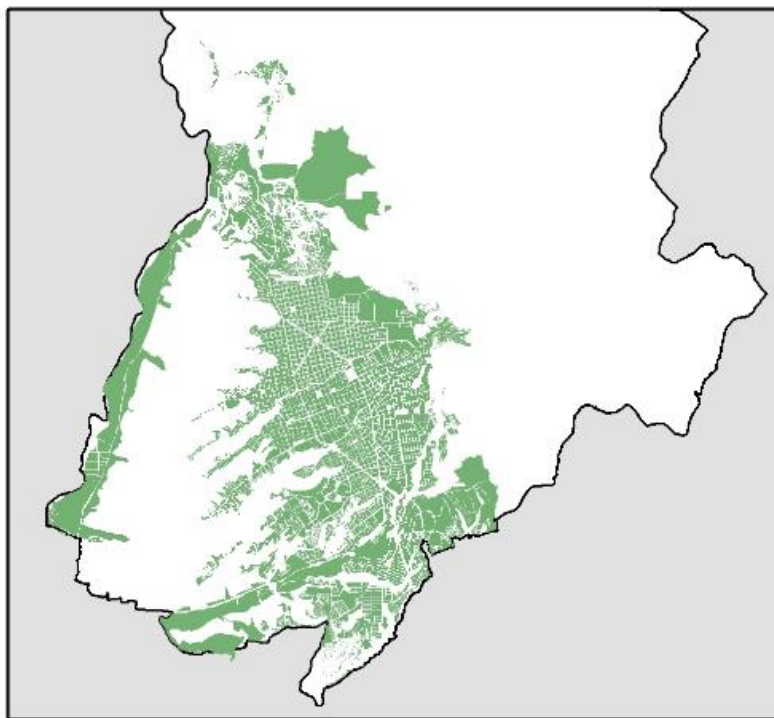
modificaciones y análisis para cada variable con ayuda del software ArcGIS, el cual es conocido por ser un sistema completo que permite la organización, administración y análisis de información geográfica entre otras funcionalidades (Esri Colombia, s.f.).

3.1.1 Usos del suelo

Para la variable usos del suelo se consultaron las páginas web de Colombia OT (Colombia OT, s.f.), Alcaldía de Bucaramanga (Alcaldía de Bucaramanga, 2021) y Datos abiertos Colombia (Datos Abiertos, s.f.). Estas páginas cuentan con información de ordenamiento territorial, relacionada con la variable. Luego de la búsqueda, se descargó de la página de la alcaldía la documentación del POT de Bucaramanga junto con la cartografía editable disponible (Figura 1).

Figura 1.

Capa de usos del suelo sin simbología, zona urbana de Bucaramanga.
















Luego, la revisión de la información descargada llevó a la reasignación de las categorías planteadas en el POT (Tabla 1). Esto con el fin de agrupar las categorías con características

comunes y lograr la simplificación de esta variable que requiere el modelo LUR, además de establecer la codificación de tipo RGB (Tabla 2) que posteriormente se utilizó para aplicar la simbología.

Tabla 1.






Leyenda y simbología de las áreas de actividad.

AREA DE ACTIVIDAD EN SUELO URBANO Y DE EXPANSIÓN				
ACTIVIDAD	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	ÁREA (Ha)
RESIDENCIAL	R-1	Residencial neta		161,50
	R-2	Residencial con comercio y servicios localizado		428,86
	R-3	Residencial mixta - vivienda, comercio y servicio		46,16
	R-4	Residencial con actividad económica		550,14
COMERCIAL Y DE SERVICIOS	C-1	Comercial y de servicios empresariales		11,94
	C-2	Comercial y de servicios livianos o al por menor		238,72
	C-3	Comercial y de servicios pesados		111,98
	C-E	Comercial de eje en Área de Actividad R-2		
DOTACIONAL	D	Dotacional		360,91
	D	Dotacional Recreativo		10,89
INDUSTRIAL	I	Industria		237,23
MULTIPLE	M-1	Múltiple centralidad		98,82
	M-2	Múltiple grandes establecimientos.		91,16

Nota. Adaptado de *U-4 Áreas de Actividad*, por Alcaldía de Bucaramanga, 2014.

Tabla 2.

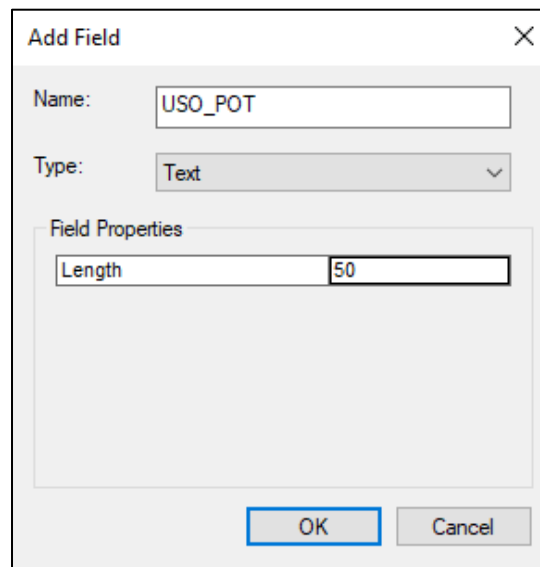
Leyenda simplificada y codificación RGB.

ACTIVIDAD	SÍMBOLO	COD. RGB	ÁREA (Ha)
RESIDENCIAL		255, 255, 0	1186.66
COMERCIAL Y DE SERVICIOS		168, 0, 0	262.64
DOTACIONAL		0, 92, 230	371.8
INDUSTRIAL		178, 178, 178	237.23
MULTIPLE		230, 0, 169	189.98

Antes de asignar la simbología se añadió un nuevo campo a la tabla de atributos de la capa mediante la herramienta Add Field del software Arcgis (Figura 2) para establecer los valores de la nueva categorización planteada.

Figura 2.

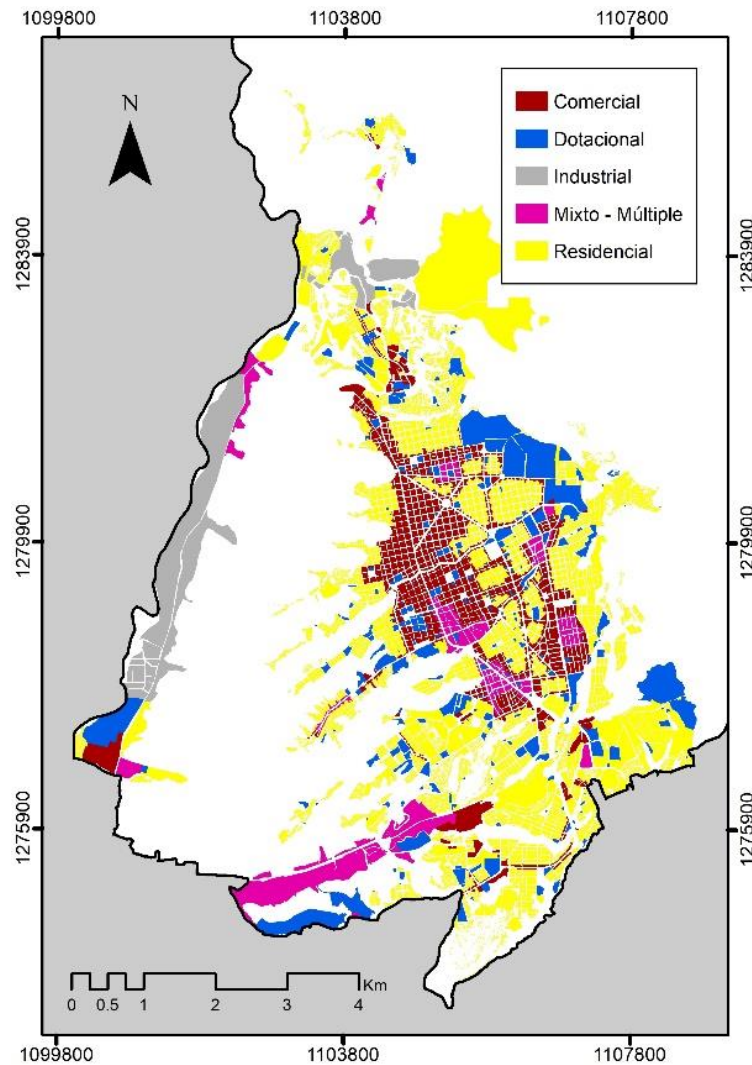
Ventana para agregar campo (Add Field).



Posteriormente, con los valores de categorías reasignados en el campo, se aplicó la simbología a través de la ventana de propiedades de capa (*Layer Properties*) teniendo en cuenta la codificación RGB de la Tabla 2. Como resultado, se obtuvo el mapa de usos del suelo reclasificado de la Figura 3.

Figura 3.

Usos del suelo reclasificados.

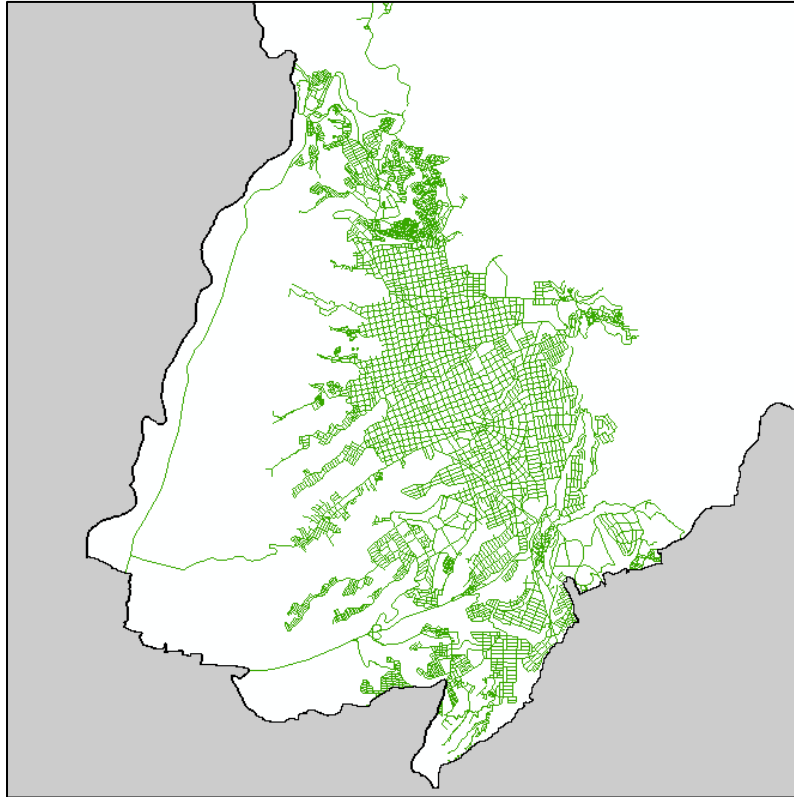


3.1.2 Tipo de vía

Para la variable tipo de vía se consultaron las páginas web de Geoportal DANE , Alcaldía de Bucaramanga y OpenStreetMap. En el caso de la página de la alcaldía, al igual que con la variable usos del suelo, se encontró información del sistema de movilidad de la ciudad, así como su clasificación en el POT (Figura 4).

Figura 4.

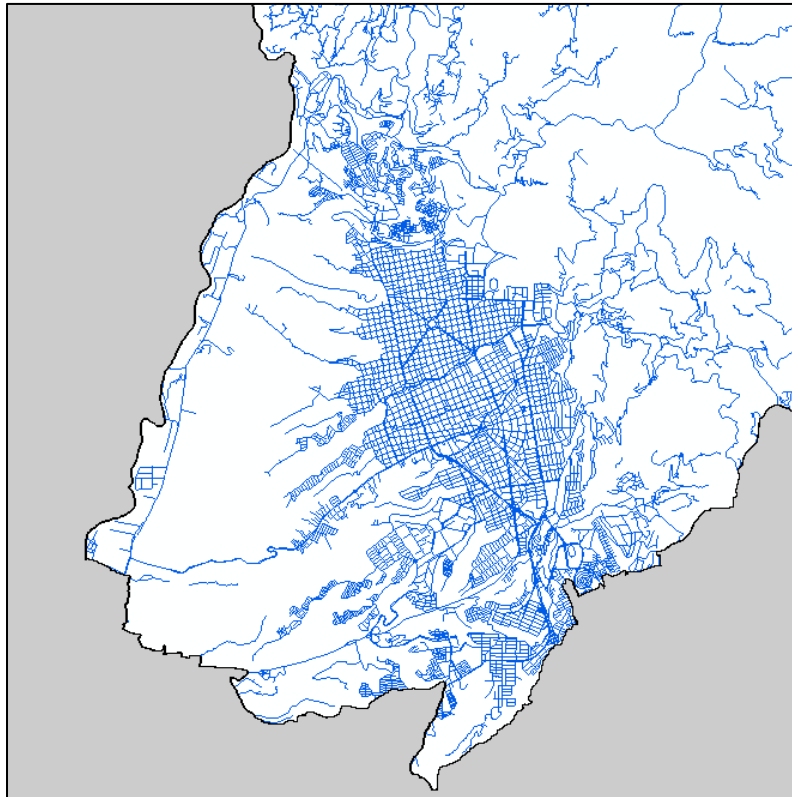
Vías del POT Bucaramanga 2014.



Por otra parte, en la página Geoportal DANE, se encontró el Marco Geoestadístico Nacional (MGN), el cual brinda una herramienta que promueve la integración estadística y geoespacial como parte del Sistema Estadístico Nacional (SEN) (DANE, 2018b). Esta herramienta cuenta con información geográfica separada por departamentos y se tomó la información vial disponible del departamento de Santander, como se muestra en la Figura 5. Se puede apreciar también que cuenta con más elementos que los disponibles en el POT.

Figura 5.

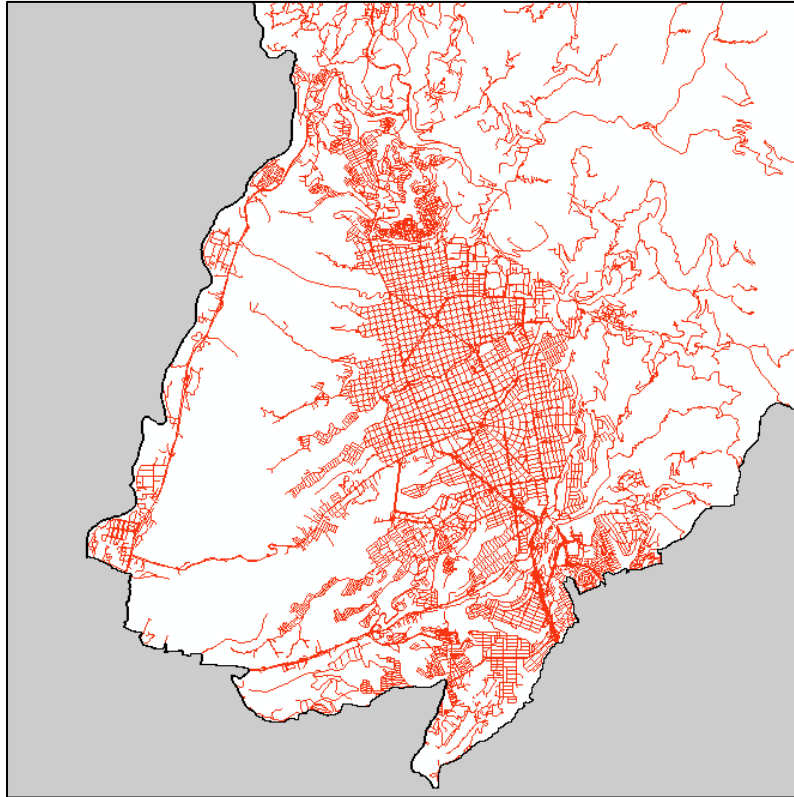
Vías del MGN (DANE).



Por último, se tomó información de OpenStreetMap (OSM), el cual es un proyecto colaborativo para crear mapas que cuenta con una base de datos abierta y se alimenta de un gran número de colaboradores que contribuyen a su veracidad y verificación (OpenStreetMap, s.f.). (Figura 6).

Figura 6.

Vías de OSM.



OSM presenta un límite en cuanto a la cantidad de información que se puede descargar directamente de la página. Debido a esto, se decidió utilizar el software QGIS, el cual es un sistema de información geográfica de software libre y de código abierto que, al igual que ArcGIS, permite organizar, administrar y analizar información geográfica (QGIS, s.f.), y con sus herramientas de complementos permitió acceder a más información de OSM.

Luego, se realizó una comparativa entre las tres fuentes de información tomando en cuenta criterios como la cantidad de elementos en cada capa, o la adecuada referenciación de los elementos (Figura 7). Esto con el fin de escoger la fuente de información más acertada.

Figura 7.

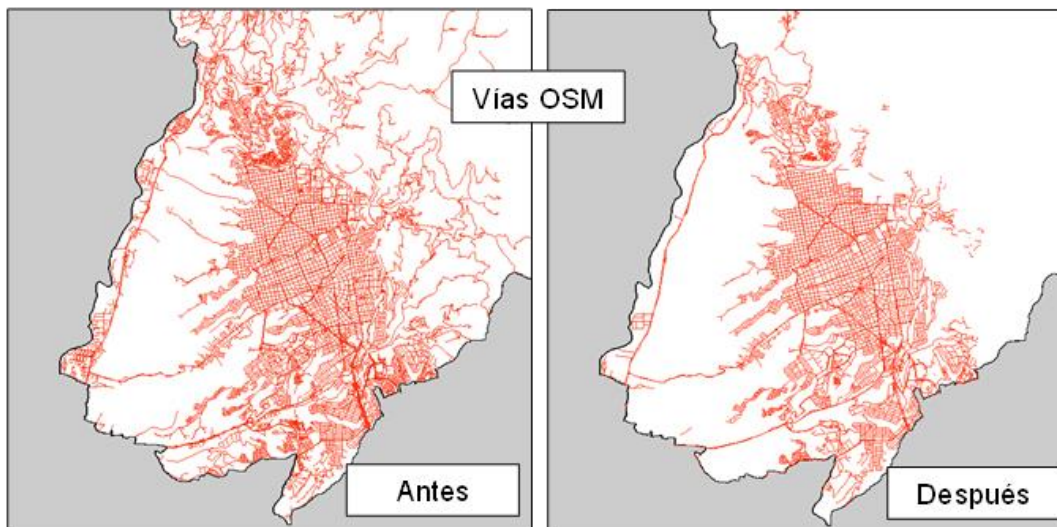
Comparativa de fuentes de información.



Se seleccionó la información proveniente de OSM como la más adecuada y se realizó el proceso de eliminar de la capa los elementos que no conforman el Subsistema de Infraestructura Vial del POT (Figura 8).

Figura 8.

Comparativa de elementos eliminados



Esta eliminación se realizó además con el propósito de establecer una equivalencia entre la clasificación implementada por OSM y las categorías consignadas en el POT de Bucaramanga (Tabla 3), además de asignar la respectiva codificación RGB para su simbología, como se indica en la Tabla 4.

Tabla 3.

Clasificación vial POT y su descripción.

CLASIFICACIÓN VIAL URBANA	RED DE VÍAS ARTERIAS			RED DE VÍAS LOCALES	
	ARTERIA PRIMARIA	ARTERIA SECUNDARIA	ARTERIA TERCIARIA	VIA LOCAL NIVEL 1	VIA LOCAL NIVEL 2
FUNCIONES	Permite la interconexión transitoria de flujos vehiculares nacionales por el área urbana. Vías con mayor volumen de vehículos por día (>15.000TPD). Soporta rutas troncales y pretroncales del SITM.	Complementan la articulación vial de Bucaramanga con otra cabecera municipal; Soporta las rutas pretroncales del SITM. (TPD > 7.000).	Conectan dos o más sectores, con vías arterias secundarias y terciarias; pertenecen a este grupo todas las vías de doble calzada restantes; y las vías alternativas de alto flujo vehicular a las definidas anteriormente. (TPD > 5.000).	Comunica un sector urbano con la red arterial, acceso principal a barrios, sistema de transporte complementario, velocidad controlada. (TPD > 3.000).	Acceso a terrenos y predios

Nota. Adaptado de *Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Bucaramanga 2014-2027* (p. 77), por Concejo de Bucaramanga, 2014.

Tabla 4.

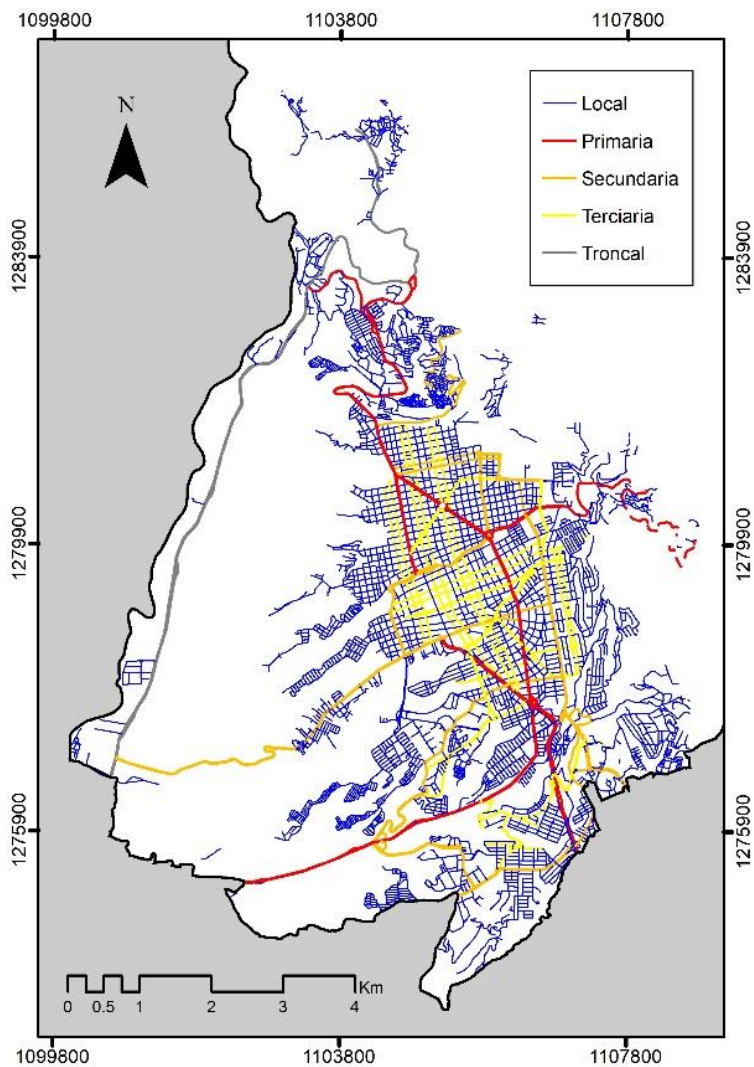
Equivalencia entre clasificación POT y OSM con respectiva codificación RGB.

CLAS. POT	TIPO OSM	CLAS. FINAL	COD. RGB
ARTERIA PRIMARIA	primary	Primaria	255, 0, 0
	primary_link		
ARTERIA SECUNDARIA	secondary	Secundaria	255, 192, 0
	secondary_link		
ARTERIA TERCIARIA	tertiary	Terciaria	255, 255, 0
	tertiary_link		
VÍA LOCAL NIVEL 1	residential	Local	0, 0, 255
VÍA LOCAL NIVEL 2			
TRONCAL	trunk	Troncal	130, 130, 130
	trunk_link		

Posteriormente, con los valores de categorías reasignados, se aplicó la simbología a través de la ventana de propiedades de capa (*Layer Properties*) teniendo en cuenta la codificación RGB de la Tabla 4. Como resultado, se obtuvo el mapa de tipos de vía reclasificado de la Figura 9.

Figura 9.

Tipos de vía reclasificado.



3.1.3 Densidad poblacional

Para la variable de densidad poblacional se consultó la página web del DANE en la cual se encontró el Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018 (CNPV 2018) que presenta una estructura de áreas geoestadísticas que tiene en cuenta la organización administrativa y política del territorio, así como su geografía, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10.

Niveles geográficos del MGN para el CNPV 2018.



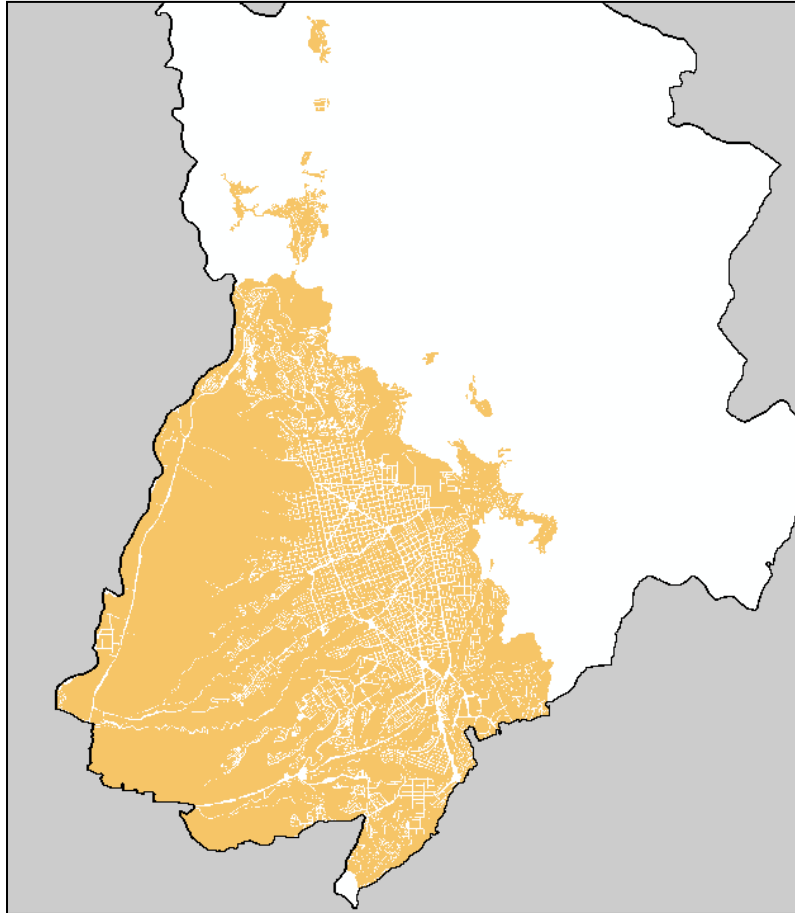
Nota. Adaptado de *Manual de uso del marco geoestadístico nacional en el proceso estadístico, (1° versión)* (p. 9), por DANE, 2018b.

La “Manzana Censal” es unidad geoestadística más pequeña de la que se puede obtener información, debido a esto, se escogió esta unidad para la consulta de información.

El archivo descargado contiene información de las zonas urbanas de los diferentes municipios del país, sin embargo, después de una depuración, solo quedó la información relacionada con el municipio de Bucaramanga, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11.

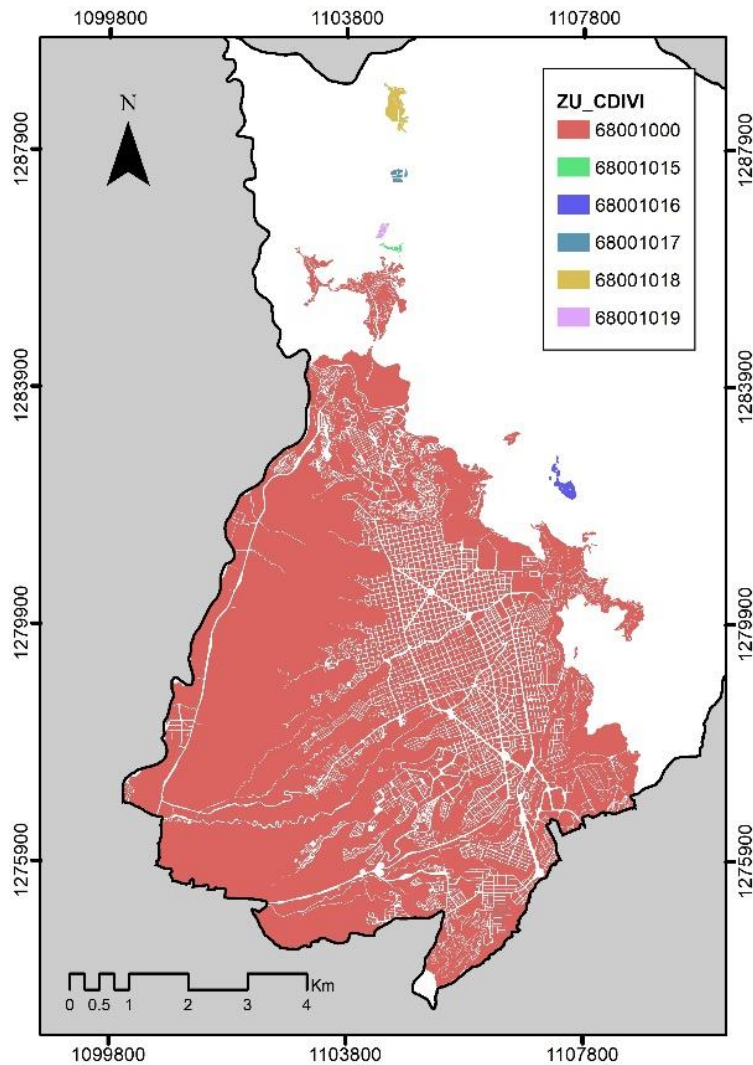
Localización de manzanas censales en el municipio de Bucaramanga.



Por otra parte, también se pudo apreciar que dentro del municipio de Bucaramanga existen distintas zonas urbanas que agrupan varias de manzanas censales (Figura 12).

Figura 12.

Zonas urbanas en Bucaramanga.



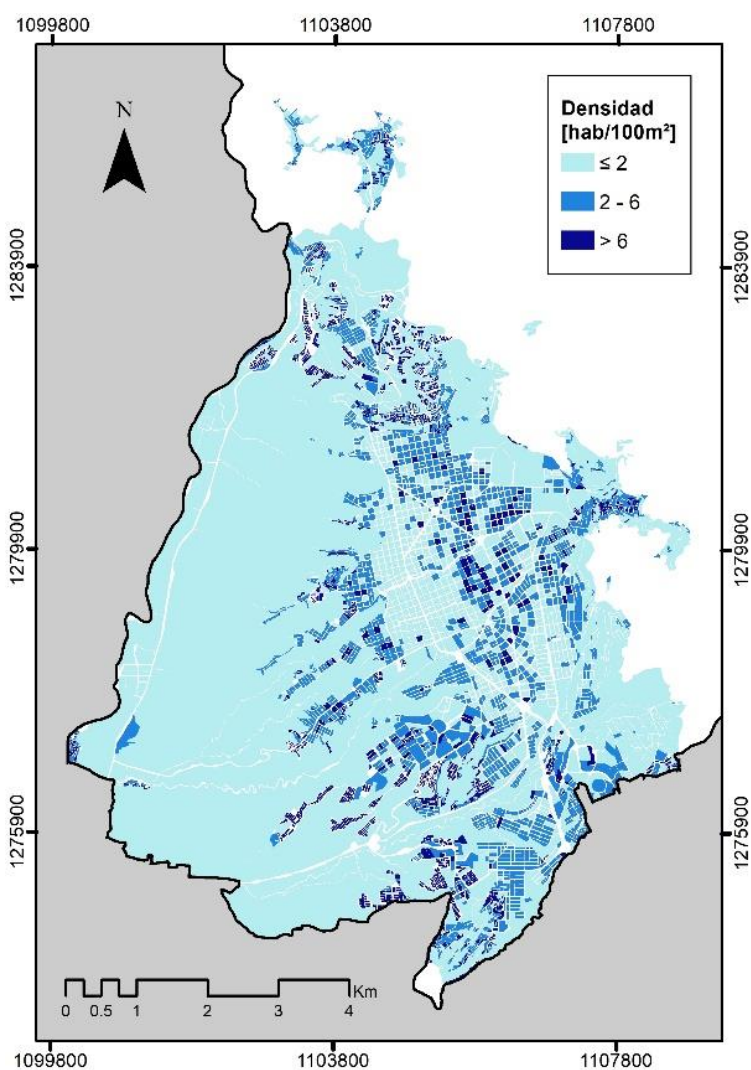
Se logró evidenciar que la zona de mayor tamaño corresponde al centro poblado de Bucaramanga. Debido a esto se descartaron las demás zonas urbanas y se eliminaron de la capa de información.

Ya con la información totalmente depurada se le asignó la simbología a la capa a través de la ventana de propiedades de capa (*Layer Properties*). La simbología asignada a esta variable es del tipo de colores graduados, ya que permite distinguir qué tanto o qué tan poco densa es una

zona. Se establecieron tres rangos debido a que la variación entre el valor máximo y mínimo de la variable es poco. Además, se asignó una unidad de medida de habitantes por cada cien metros cuadrados ($\text{hab}/100\text{m}^2$) para tener una mejor dimensión de la distribución de la población. Como resultado, se obtuvo el mapa de densidad poblacional mostrado en la Figura 13.

Figura 13.

Mapa de densidad poblacional.

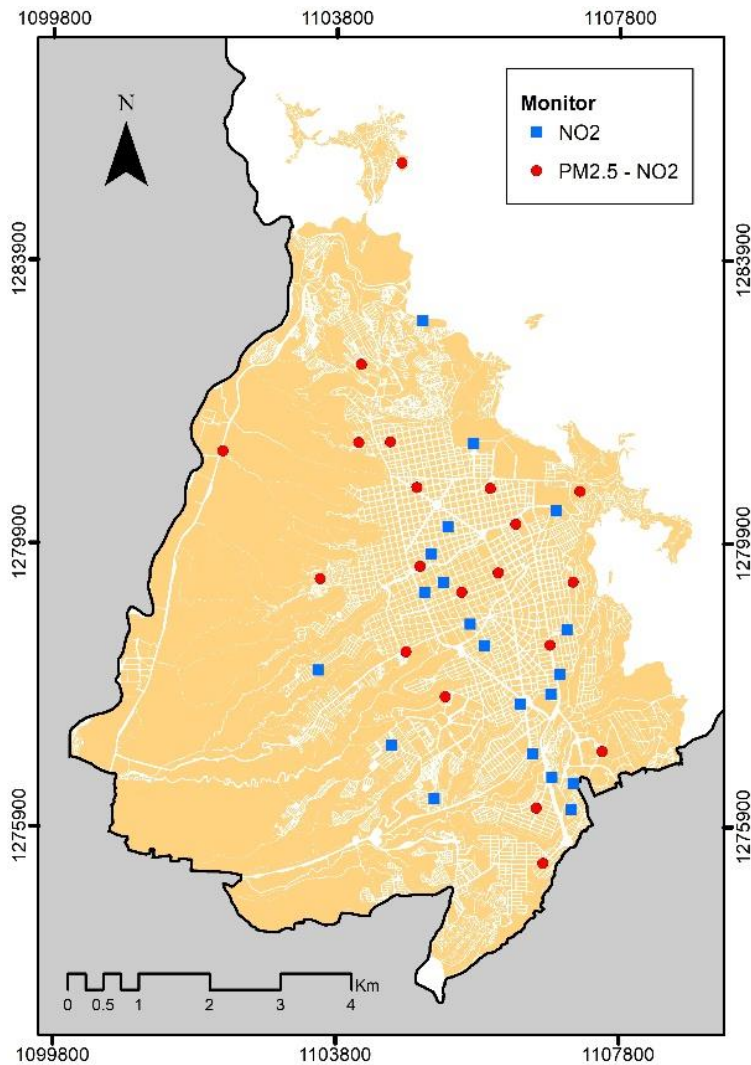


3.2 Procesamiento de la información

En esta etapa del procedimiento ya se cuenta con la información digitalizada y estructurada de las variables elegidas para alimentar los modelos LUR. Ahora, el objetivo es relacionar los datos recopilados con sitios de monitoreo de la contaminación del aire que han sido dispuestos en la ciudad de Bucaramanga. Este procedimiento no contempla la descripción del proceso de selección de los sitios de monitoreo, sin embargo, cabe destacar que el manual ESCAPE menciona aspectos importantes para tener en cuenta al momento de la selección de estos sitios como la distribución de la población participante en estudios epidemiológicos; la cercanía a las vías principales y su densidad de tráfico; el tamaño del área de estudio a analizar. En el caso de la ciudad de Bucaramanga se dispusieron 40 sitios de monitoreo para realizar mediciones de concentraciones de material particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) y dióxido de nitrógeno (NO₂) como se muestra en la Figura 14.

Figura 14.

Sitios de monitoreo en la zona urbana de Bucaramanga.



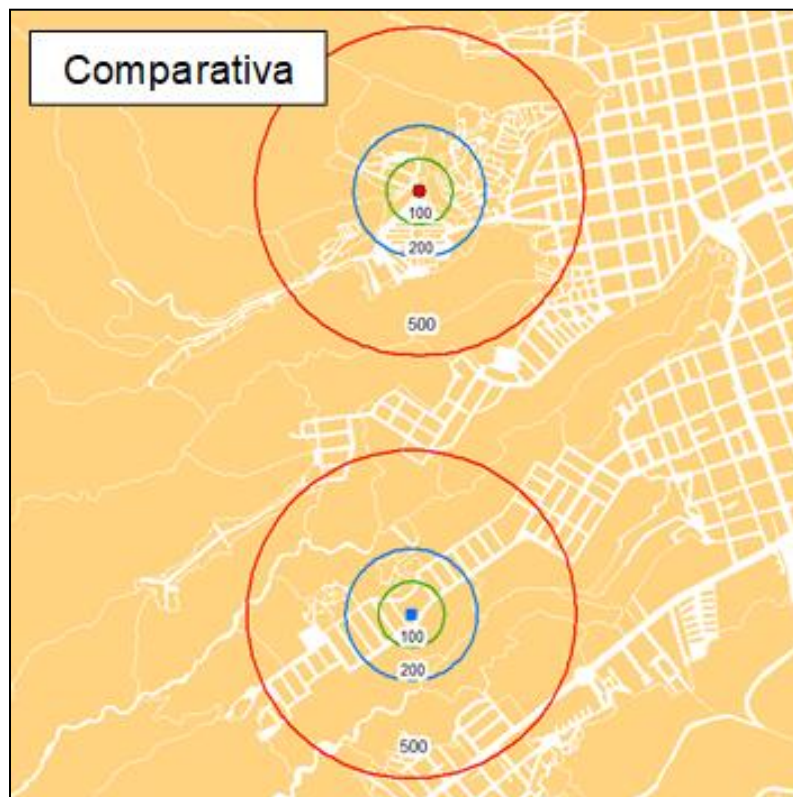
3.2.1 Zonas de influencia (Buffers)

Para relacionar las variables geográficas y los sitios de monitoreo se establecieron zonas de influencia (Buffers), es decir, las zonas donde los contaminantes que se puedan medir en los sitios de monitoreo tengan una explicación originada en las variables geográficas recopiladas. Los radios para estas zonas de influencia se definieron de 100, 200 y 500 metros teniendo en cuenta los criterios que menciona el manual ESCAPE, como la distancia a carreteras y que en zonas

urbanas se recomienda usar radios no mayores a 500 metros (ESCAPE, 2008). En la Figura 15, se muestra una comparativa de los radios definidos y las zonas que abarcan en torno a los sitios de monitoreo.

Figura 15.

Comparativa de radios de influencia definidos.



Estas zonas se definieron mediante el uso de la herramienta Buffer del software ArcGIS.

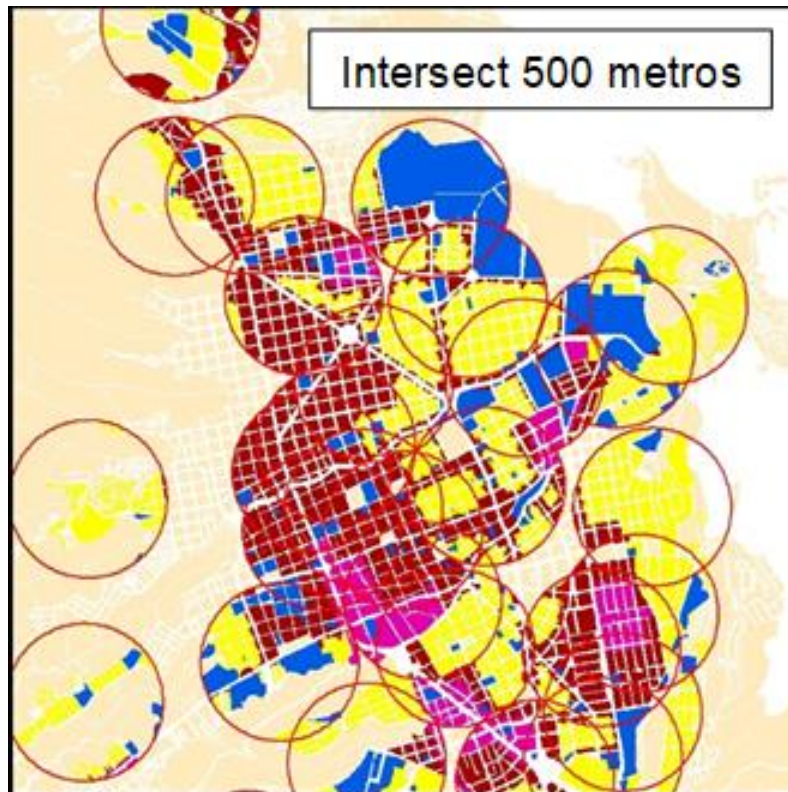
3.2.2 Intersecar (*Intersect*)

Las zonas de influencia (Buffers) previamente determinadas, se intersecaron con las capas de las variables de uso de suelo, tipo de vía y densidad poblacional. Para esto se implementó la herramienta Intersecar de ArcGIS, la cual permite determinar los elementos en común entre una o más capas de información. En la Figura 16, se muestra la capa de usos de suelos y las zonas de

interés de radio de 500 metros, cuyos datos quedan vinculados a cada sitio de monitoreo en función de su ubicación.

Figura 16.

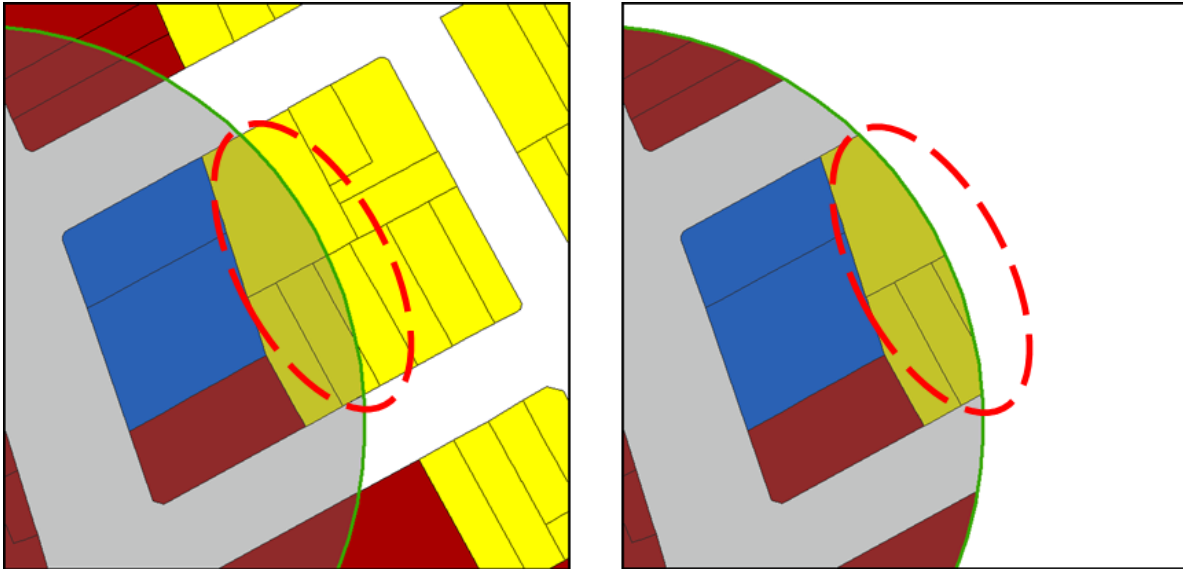
Intersección de usos del suelo y zonas de influencia de radio de 500 metros.



Después de realizar este proceso con las demás variables y los otros radios de las zonas de interés de se evidenció que los atributos de los elementos intersecados también se unieron, pero no se actualizaron, es decir que atributos como área, longitud o número de habitantes no cambiaron en función de la intersección realizada, esto se puede evidenciar en la Figura 17, para el caso de la variable usos del suelo.

Figura 17.

Modificación por intersección en variable usos del suelo.



Entonces, complementario al proceso de intersección, se realizó la actualización de los atributos modificados a través de las herramientas de edición y tabla de atributos de ArcGIS.

Luego de realizar las intersecciones de las tres variables con los tres radios dados para las zonas de influencia y sus respectivas actualizaciones de datos, se tuvo un total de nueve capas diferentes. Los valores o etiquetas de estas capas fueron cuantificados de manera particular para cada capa y así se estableció el dato correspondiente de cada variable vinculado a cada sitio de monitoreo específico. La cuantificación se encuentra relacionada con el tipo de variable, en el caso de usos del suelo debe ser cuantificada en metros cuadrados, para tipo de vía se debe cuantificar en metros lineales y para densidad poblacional se usa habitantes por metros cuadrados. Esto se puede explicar mejor a través de la Tabla 5.

Tabla 5.

Datos geográficos vinculados a cada sitio de monitoreo.

DATOS GEOGRÁFICOS VINCULADOS AL SITIO DE MONITOREO				
VARIABLE	UNIDAD	RADIO DE ZONA DE INFLUENCIA		
		100 m	200 m	500 m
Uso del suelo	Metro cuadrado [m ²]	Comercial-100	Comercial-200	Comercial-500
		Dotacional-100	Dotacional-200	Dotacional-500
		Industrial-100	Industrial-200	Industrial-500
		Múltiple-100	Múltiple-200	Múltiple-500
		Residencial-100	Residencial-200	Residencial-500
Tipo de vía	Metro lineal [m]	Primaria-100	Primaria-200	Primaria-500
		Secundaria-100	Secundaria-200	Secundaria-500
		Terciaria-100	Terciaria-200	Terciaria-500
		Local-100	Local-200	Local-500
		Troncal-100	Troncal-200	Troncal-500
Densidad poblacional	Habitantes [hab]	Población-100	Población-200	Población-500
	Habitantes por cada cien metros cuadrados [hab/m ²]	Densidad poblacional-100	Densidad poblacional-200	Densidad poblacional-500

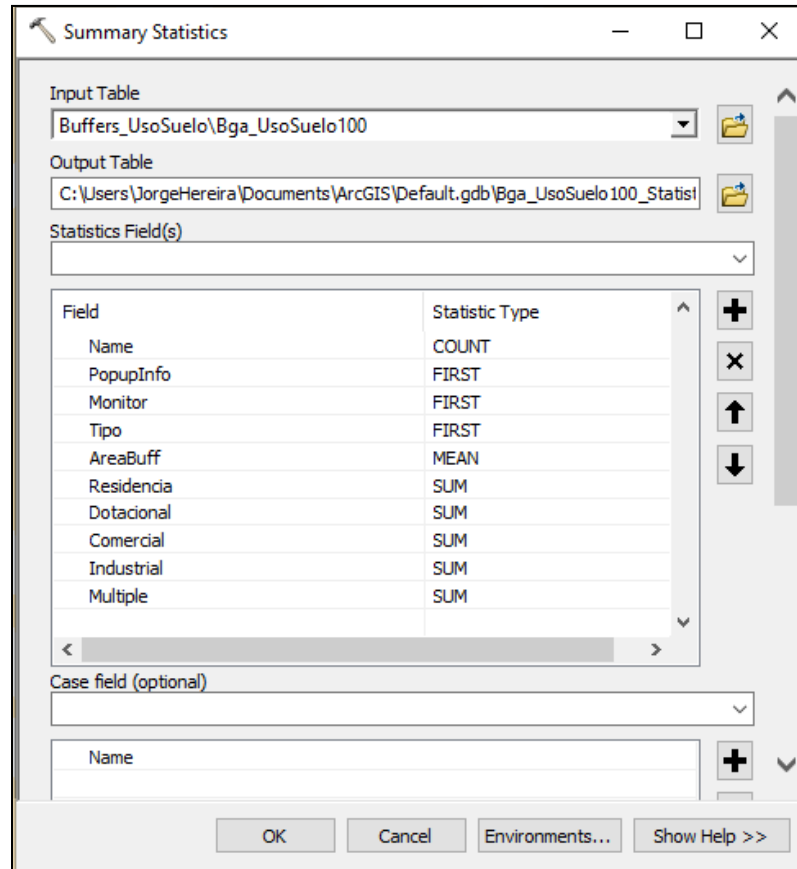
Se obtuvieron 36 datos geográficos por cada sitio de monitoreo que pueden lograr explicar los registros de concentraciones de contaminantes.

3.2.3 Resumen de estadísticas (Summary Statistics)

los valores de cada dato fueron totalizados con el fin de asociar un solo valor por dato al sitio de monitoreo. Se implementó la herramienta Resumen de estadísticas (Summary Statistics) del software ArcGIS, la cual, con una breve configuración de los parámetros que la definen (Figura 18), permitió obtener como resultado una tabla con los valores de cada variable relacionados a cada sitio de monitoreo.

Figura 18.

Configuración de parámetros para la variable usos del suelo



En la ventana de la herramienta, que se muestra en la Figura 18, se pueden apreciar los parámetros de Tabla de ingreso (Input Table) y Tabla de salida (Output Table) donde se especifica la tabla a procesar y la dirección donde se guardará la tabla procesada, respectivamente. El siguiente parámetro son las estadísticas de campo (Statistics Field) en el cual se debe especificar el campo a analizar en el espacio Field y al lado se define el tipo de estadístico (Statistic Type) que se realizará con los datos que se encuentren en el campo. La herramienta cuenta con nueve tipos de estadísticos, sin embargo, para este ejercicio solo se usarán SUM, que consiste en realizar la suma de todos los datos en el campo; MEAN, que calcula el promedio de los datos del campo;

COUNT, que realiza un recuento de los elementos no nulos en el campo; y FIRST, el cual encuentra el primer valor del campo y lo asume como valor definitivo. Por último, se encuentra el parámetro Campo de caso (Case field), el cual permite realizar las estadísticas de manera independiente para cada valor que se encuentre en el campo especificado.

La configuración de los parámetros cambia ligeramente en función de la variable a utilizar. Así que se realizó este procedimiento para cada variable teniendo en cuenta los campos analizados.

3.3 Consolidación de la información

En esta última etapa del procedimiento todos los datos de las diferentes variables se encuentran vinculados a los sitios de monitoreo. Sin embargo, también se encuentran separados en nueve tablas como resultado del cruce entre las tres variables y los tres radios de influencia. Al tener en cuenta lo laborioso que puede resultar consultar tablas diferentes, se optó por agrupar toda la información en un solo lugar.

No se combinaron las tablas mediante alguna herramienta de ArcGIS, sino que se consolidaron como una base de datos estática conformada por un solo conjunto de datos (Dataset) en una hoja de cálculo de Microsoft Excel. Aunque se entiende por base de datos el conjunto de datos almacenados en una memoria externa y organizado mediante una estructura de datos, que permite su uso y gestión por diferentes usuarios a través de un sistema de gestión de base de datos (SGBD) (Gómez, 2013); también se sabe que Microsoft Excel no es el programa más adecuado para almacenar bases de datos, ya que existen diversos programas gestores de bases de datos para tal propósito, pero brinda facilidad de almacenamiento y cálculo cuando se trata una poca cantidad de datos (Garmendia, 2018).

Este proceso se realizó copiando directamente de las tablas de resumen de estadísticas (Summary Statistics) obtenidas en la fase anterior y pegando la información en una hoja de Excel. Como resultado se obtuvo una tabla organizada que se puede revisar en la documentación anexa y cuyos encabezados se encuentran organizados como muestra la Tabla 6.

Tabla 6.

Encabezado de variables vinculadas a sitios de monitoreo.

VARIABLE	RADIO	ETIQUETA	ENCABEZADO
USO DEL SUELO	100	Comercial	COM100
		Dotacional	DOT100
		Industrial	IND100
		Múltiple	MUL100
		Residencial	RES100
	200	Comercial	COM200
		Dotacional	DOT200
		Industrial	IND200
		Múltiple	MUL200
		Residencial	RES200
	500	Comercial	COM500
		Dotacional	DOT500
Industrial		IND500	
Múltiple		MUL500	
Residencial		RES500	
TIPO DE VÍA	100	Primaria	PRIM100
		Secundaria	SEC100
		Terciaria	TER100
		Local	LOC100
		Troncal	TRO100
	200	Primaria	PRIM200
		Secundaria	SEC200
		Terciaria	TER200
		Local	LOC200
		Troncal	TRO200
	500	Primaria	PRIM500
		Secundaria	SEC500
		Terciaria	TER500
		Local	LOC500
		Troncal	TRO500
DENSIDAD POBLACIONAL	100	Población	POB100
		Densidad	DEN100
	200	Población	POB200
		Densidad	DEN200
	500	Población	POB500
		Densidad	DEN500

4. Conclusiones

La contaminación ambiental es un fenómeno que impacta considerablemente en la calidad de vida de la población y debido a eso es de gran importancia contar con un constante monitoreo del ambiente, así como el constante desarrollo de metodologías que ayuden a una mejor estimación de la contaminación, como es el caso de los modelos LUR.

La falta de una metodología o directriz en cuanto a la obtención, procesamiento y consolidación de la información geográfica que alimenta los modelos LUR ocasiona demoras en la implementación de estos. A su vez, se presentan retrasos en las estimaciones de contaminantes en el aire que pueden afectar la toma de medidas para su adecuado control.

Los sistemas de información geográfica gubernamentales, si bien pueden llegar a ser de mucha ayuda, también pueden ser ineficientes en cuanto a la calidad de la información suministrada, así como en cuanto a su disponibilidad. Se puede llegar a encontrar información desactualizada, así como también discontinuidad en los cambios presentados en los portales que ofrecen la información al público.

5. Recomendaciones

Los sistemas de información geográfica son una herramienta de mucha ayuda en el mundo actualmente. Por esto, no se debe escatimar en cuanto a la búsqueda de la estandarización de los procesos que involucren su implementación.

Los entes gubernamentales deben integrar de manera más eficiente los sistemas de información geográfica al ejercicio de la administración pública. Velando por el buen desempeño de los servicios digitales que permiten la disponibilidad de los sistemas de información geográfica al público.

Referencias Bibliográficas

- Parra, A. (2004). Promedios geométricos de material particulado fracción respirable (PM 10) y detección de metales en el aire de Bucaramanga (Colombia). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2(2), 21-32.
- Sarmiento, M. (8 de marzo de 2022). Una mirada a la calidad del aire en el área metropolitana de Bucaramanga. Plataforma Digital. <https://plataforma.bucaramanga.upb.edu.co/acontecer/una-mirada-a-la-calidad-del-aire-en-el-area-metropolitana-de-bucaramanga>
- Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire. (s.f.). *¿Cuáles contaminantes se evalúan?* Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/informacion.xhtml?de=contaminantes_evaluados
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017*. Subdirección de Estudios Ambientales – IDEAM. https://www.andi.com.co/Uploads/Informe_ECalidadl_Aire_2017_636748401757382604.pdf
- Pardo, T. (24 de noviembre de 2018). Contaminación del aire: un asesino anda suelto. El tiempo. <https://www.eltiempo.com/>
- Sánchez, L. M. (29 de noviembre de 2018). Colombia, el segundo país de América Latina con más contaminación del aire. La FM. <https://www.lafm.com.co/>
- Resolución 2254 de 2017 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Noviembre 1 de 2017.
- Hoek, G. (2017). Methods for Assessing Long-Term Exposures to Outdoor Air Pollutants. *Curr Envir Health Rpt*, 4, 450-462. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0169-5>
- Sarría, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Londoño, L. A. y Cañón, J. E. (2015). Metodología para la aplicación de modelos de regresión de usos del suelo en la estimación local de la concentración mensual de PM10 en Medellín – Colombia. *Revista Politécnica*, 11(21), 29-40.

- ENV.2007.1.2.2.2. European cohort on air pollution. (2008). *ESCAPE: Study manual*. <http://www.escapeproject.eu/manuals/>
- Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. Julio 18 de 1997. DO. N°43091.
- Acuerdo 011 de 2014 [Concejo de Bucaramanga]. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Bucaramanga 2014-2027. Mayo 21 de 2014.
- Departamento Administrativo Nacional de estadísticas. (2018a). *Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV - 2018*. Presidencia de la República. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Esri Colombia (s.f.). *ArcGIS Desktop*. <https://www.esri.co/es-co/productos/arcgis-desktop/inicio>
- Colombia OT (s.f.). *Los POT del país*. Recuperado en mayo de 2024 de <https://www.colombiaot.gov.co/pot/>
- Datos Abiertos (s.f.). *Datos abiertos de Colombia*. <https://www.datos.gov.co/>
- Alcaldía de Bucaramanga (9 de agosto de 2021). *Archivo POT*. Recuperado en Enero, 2022, de <https://www.bucaramanga.gov.co/bucaramanga-avanza/archivo-pot/>
- Alcaldía de Bucaramanga. (2014). *U-4 Áreas de Actividad* [Mapa]. 1:10.000. *Plan de ordenamiento territorial 2014-2027*. Bucaramanga.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). (2018b). *Manual de uso del marco geoestadístico nacional en el proceso estadístico, (1° versión)*. Presidencia de la República. <https://www.dane.gov.co/files/sen/lineamientos/manual-uso-marco-geoestadistico-nacional-en-proceso-estadistico.pdf>
- OpenStreetMap (s.f.). *¡Bienvenido a OpenStreetMap!* <https://www.openstreetmap.org/>
- QGIS (s.f.). *QGIS, Un sistema de Información Geográfica Libre y de Código Abierto*. <https://qgis.org/es/site/>
- Gómez, M. D. (2013). *Bases de datos: notas de curso*. Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa. <http://ilitia.cua.uam.mx:8080/jspui/handle/123456789/170>
- Garmendia Zapata, M. (2018). *Bases de datos en Microsoft Excel: Diseño y Administración. Nociones básicas relacionadas con el campo ambiental*. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/3692/>