

ANÁLISIS DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL COMO FACTOR DE CALIDAD
AMBIENTAL URBANA, PASTO, NARIÑO

ANGIE STEFANY NAVARRO CAICEDO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SAN JUAN DE PASTO

2019

ANÁLISIS DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL COMO FACTOR DE CALIDAD
AMBIENTAL URBANA, PASTO, NARIÑO

ANGIE STEFANY NAVARRO CAICEDO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Ambiental

PRESIDENTE

ÁLVARO JAVIER CEBALLOS FREYRE I.F. Ms.C.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2019

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Firma del Presidente de tesis

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, Abril de 2019

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	1
RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
MATERIALES Y MÉTODOS	¡Error! Marcador no definido.
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADA.....	¡Error! Marcador no definido.
CÁLCULO DE INDICADORES EN LA COMUNA 1.....	¡Error! Marcador no definido.
BENEFICIOS DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL URBANA...	¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	¡Error! Marcador no definido.

TABLAS

- TABLA 1.** CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES LANDSAT 5 Y 8..... **¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 2.** SOFTWARE Y ENTIDADES EMPLEADAS PARA LA REALIZACIÓN DEL TRABAJO.....**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 3.** ESCALA DE CALIFICACIÓN DE LOS INDICADORES DE ACUERDO CON LOS VALORES DE REFERENCIA.**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 4.** RELACIÓN INDICADORES CON CALIFICACIONES OBTENIDAS, Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 5.** RELACIÓN DE ÁREAS VERDES POR COMUNA EN PASTO (1989 – 2016)**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 6.** COMPARATIVA DE VALORES DE ÁREA DE COBERTURA VEGETAL.**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 7.** COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR, FRENTE AL AUMENTO DE COBERTURA VEGETAL.**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 8.** COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR, FRENTE A AUMENTO DE COBERTURA VEGETAL.**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 9.** COMPORTAMIENTO DEL INDICADOR CALIDAD DEL AIRE, FRENTE A UN AUMENTO DE COBERTURA VEGETAL.**¡Error! Marcador no definido.**
- TABLA 10.** ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL BAJO PARÁMETROS IDEALES.**¡Error! Marcador no definido.**

FIGURAS

- FIGURA 1.** LOCALIZACIÓN MUNICIPIO DE PASTO, DIVISIÓN POLÍTICA POR COMUNAS**¡Error! Marcador no definido.**
- FIGURA 2.** IMÁGENES NDVI PARA LOS AÑOS 1989 Y 2016.....**¡Error! Marcador no definido.**
- FIGURA 3.** MAPAS SAVI PASTO, 1989 2016**¡Error! Marcador no definido.**

FIGURA 4. ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO SAVI COMUNA 1-2016.;Error! Marcador no definido.

ANEXOS

ANEXO 1. TABLA DE FÓRMULAS EMPLEADAS PARA EL CÁLCULO DE INDICADORES DIRECTOS E INDIRECTOS4

GLOSARIO

Calidad ambiental: Se entiende a la calidad ambiental como el conjunto de características (ambientales, sociales, culturales y económicas) que califican el estado, disponibilidad y acceso a componentes de la naturaleza y la presencia de posibles alteraciones en el ambiente, que estén afectando sus derechos o puedan alterar sus condiciones y los de la población de una determinada zona o región.

Cobertura vegetal: Puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana como serían las áreas de cultivos.

Contaminación: Es la introducción de sustancias u otros elementos físicos en un medio que provocan que éste sea inseguro o no apto para su uso. De forma general, se atribuye a una alteración negativa del estado natural de los ecosistemas o el ambiente, y por lo general, se genera como consecuencia de la actividad humana considerándose una forma de impacto ambiental.

Indicador: Son puntos de referencia, que brindan información cualitativa o cuantitativa, conformada por uno o varios datos, constituidos por percepciones, números, hechos, opiniones o medidas, que permiten seguir el desenvolvimiento de un proceso y su evaluación, y que deben guardar relación con el mismo.

Periurbano: Se emplea el termino periurbano para señalar los asentamientos irregulares situados a orillas de las zonas urbanas y bajo la administración de los municipios urbanos. No cumple funciones propiamente urbanas (de una ciudad) ni propiamente rurales (de un núcleo rural), sino funciones caracterizadas por su gran necesidad de espacio, importancia ambiental, o de infraestructura, como por ejemplo: aeropuertos, autopistas, zonas militares, rellenos sanitarios, áreas de importancia ecológica, etc.

SIG: Es el acrónimo de Sistema de Información Geográfica, el cual se relaciona con la integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar,

almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión.

Sostenibilidad: Se refiere, desde un punto de vista ambiental y económico, a la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del ambiente y bienestar social.

Teledetección: Es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis, la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales. La teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado, mediante el análisis de la interacción entre tres elementos fundamentales: una fuente de energía, un objetivo y un captador o sensor. La fuente de energía es la que “ilumina” emitiendo una onda electromagnética; el objetivo es la porción de la superficie que refleja la energía de la fuente; y el sensor, es el que mide la radiación electromagnética reflejada del objetivo.

Urbanización: Supone el acondicionamiento de un territorio para la conformación de centros urbanos, es decir, de ciudades, las cuales reciben el nombre de urbe en latín. Esto implica que el emplazamiento debe ser dotado de estructuras básicas para la distribución de servicios como el teléfono, internet, agua y energía, así como para la construcción de vías de comunicación.

Uso del suelo: Se relaciona con la gestión y modificación del medio ambiente natural para convertirlo en terreno agrícola (campos cultivables, pastizales, etc.) o asentamientos humanos (urbanización, industrial, etc.). El término uso del suelo también se utiliza para referirse a los distintos usos del terreno en zonificaciones (suelo urbano, suelo de expansión urbana, suelo rural, suelo suburbano, suelo de protección, etc.).

ANÁLISIS DEL ÁREA DE COBERTURA VEGETAL COMO FACTOR DE CALIDAD AMBIENTAL URBANA, PASTO, NARIÑO.

ANALYSIS OF VEGETAL COVER AREA AS URBAN ENVIRONMENT QUALITY FACTOR, PASTO, NARIÑO

Angie Navarro C.¹; Álvaro Ceballos F²

RESUMEN

El proceso de urbanización modifica y elimina componentes biológicos de la morfología de una ciudad donde la cobertura vegetal se ve reemplazada en su mayoría por superficies grises. Para identificar los cambios de dicha cobertura en San Juan de Pasto en el área comprendida entre la periferia y la comuna 1, se realizó un análisis multitemporal con imágenes satelitales LANDSAT en un periodo de 27 años (1989 -2016), utilizando el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) evidenciando una pérdida de cobertura vegetal urbana CVU. Teniendo en cuenta que dicha comuna es la que menos área de cobertura vegetal presentó en la ciudad, se empleó la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente 2016), la cual permitió estimar el Índice de Calidad Ambiental Urbana ICAU obteniendo un valor de 42 puntos, denotando baja calidad ambiental. Posteriormente mediante extrapolación matemática se calcula un nuevo ICAU teniendo en cuenta definiciones teóricas sobre los beneficios de la CVU y correlacionándolos con indicadores como: Calidad del aire, población urbana expuesta a ruido por encima de niveles permitidos y consumo residencial de energía por habitante. Se obtuvo una mejoría en la calificación de cada uno de los indicadores y por consiguiente del ICAU, obteniendo una calidad ambiental alta de puntuación 60, demostrando así como la CVU a través de sus beneficios es un factor transformador de la calidad ambiental en ciudades.

PALABRAS CLAVE: beneficios, indicador, índices de vegetación, urbanización, teledetección.

¹ Egresada Ingeniería Ambiental, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia, angie.na.ca@hotmail.com

² Ingeniero Agroforestal Ms. C., Profesor asociado Departamento de Recursos Naturales y Sistemas Agroforestales. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia, aceb1980@gmail.com.

ABSTRACT

The process of urbanization modifies and eliminates biological components of the morphology of a city where the vegetal cover is replaced mostly by gray surfaces. To identify the changes of said coverage in San Juan de Pasto in the area between the periphery and the commune 1, a multi-temporal analysis with LANDSAT satellite images was performed over a period of 27 years (1989-2016), using the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) evidencing a loss of urban vegetal cover CVU. Taking into account that this commune has the least area of vegetal coverage presented in the city, the methodology proposed by the Ministry of Environment and Sustainable Development was used (MinAmbiente 2016), which allowed to estimate the Urban Environmental Quality Index ICAU obtaining a value of 42 points, denoting low environmental quality. Subsequently, by mathematical extrapolation, a new ICAU is calculated taking into account theoretical about the benefits of CVU and correlating them with indicators such as: Air quality, urban population exposed to noise above permitted levels and residential energy consumption per inhabitant. An improvement was obtained in the qualification of each one of the indicators and therefore of the ICAU, obtaining a high environmental quality score of 60, demonstrating how the CVU through its benefits is a transforming factor of the environmental quality in cities.

Keywords: Benefits, indicator, vegetation indices, urbanization, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

Actualmente cobran gran importancia los temas que afectan la calidad ambiental y que generan impacto en la salud pública, dando lugar al desarrollo de políticas regionales y estatales para mitigar el daño en las ciudades.

Las cifras de las Naciones Unidas indican que en 1990 solamente 37% de la población total de los países en vías de desarrollo habitaban ciudades, para el año 2025 el 61% de dicha población estará urbanizada. (FNUAP, 2001). Debido al rápido proceso de urbanización, se ha generado una planeación deficiente, que ha convertido las zonas potencialmente destinadas para zonas verdes, en estrechas y densas viviendas (Uribe, 1997). Las áreas verdes urbanas pueden ser incorporadas como un elemento para la aplicación del concepto de sostenibilidad, además, los espacios verdes públicos en las ciudades brindan diferentes

beneficios sociales y ecológicos, los cuales se han asociado a la calidad ambiental, como un factor de mejora de vida (Gutierrez, 2010). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que para construir ciudades saludables debe existir una buena disponibilidad, accesibilidad, calidad y seguridad de las áreas verdes, por lo que establece un mínimo de 9m^2 de áreas verdes por habitante (Reyes y Figueroa, 2010). En Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible generó una metodología basada en indicadores simples, los cuales reflejan la situación ambiental de las áreas urbanas en el país; la información principal puede ser extraída de instrumentos de planeación ambiental o territorial. De acuerdo con resultados presentes en esta investigación.

Por lo anterior, se hace indispensable la identificación y definición de indicadores que a futuro se conviertan en insumos para mejorar lo referente a gestión, toma de decisiones, establecimiento de prioridades ambientales y ajuste de las políticas regionales.

Mediante esta investigación, se establece cómo las zonas verdes en las ciudades son determinantes en la optimización del ICAU, referente a la eficacia del mismo en relación a las condiciones evaluadas en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización.

Inicialmente, el estudio se realizó en la zona urbana del municipio de Pasto, conformada por 12 comunas, las cuales tienen un área de $23,67\text{ km}^2$ y un perímetro urbano de $42,26\text{ km}$ (Alcaldía de Pasto, 2014). Su población es de 360.238 habitantes distribuidos de manera no uniforme. Geográficamente se encuentra ubicada en las coordenadas Latitud $\text{N}1^{\circ}12'42''$ y Longitud $\text{W}77^{\circ}16'43''$. Su altitud promedio de 2.540 msnm y su temperatura promedio de 19°C (Alcaldía de Pasto, 2014). Posteriormente se seleccionó la comuna 1 para llevar a cabo la aplicación del ICAU (Figura 1).

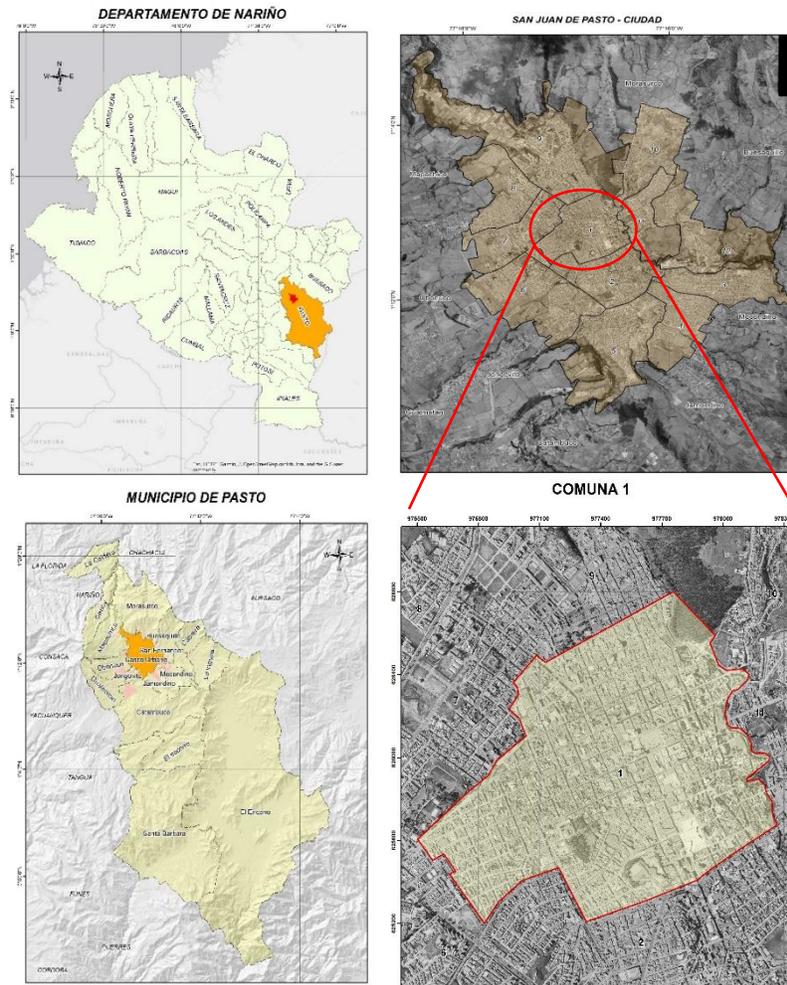


Figura 1. Localización municipio de Pasto, división política por comunas, **Fuente:** Elaboración propia.

Datos digitales

Inicialmente, se obtuvieron dos imágenes satelitales de la plataforma Landsat, identificadas con número de *path 009* y *row 59*, provistas y descargadas por medio del portal web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las fechas de adquisición de las imágenes LANDSAT 5 y LANDSAT 8 se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat 5 y 8.

<i>ID DE LA ESCENA</i>	<i>FECHA</i>	<i>SENSOR</i>
<i>p009r059_4dt19890807_z18</i>	07/08/1989	TM
<i>LC80090592016238LGN01</i>	25/08/2016	ETM+ L1T

Información secundaria

El ICAU se compone de indicadores que reflejan la situación ambiental de las áreas urbanas y cuya información principal se extrajo de instrumentos de planeación ambiental y territorial, disponibles en bases nacionales, regionales o locales como se puede observar en la Tabla 4 (MinAmbiente 2016).

Software

El uso de herramientas informáticas fue fundamental para los procesos que requieren las imágenes satelitales anteriormente mencionadas, además para la realización de los cálculos matemáticos requeridos para la investigación.

Tabla 2. Software y entidades empleadas para la realización del trabajo.

SOFTWARE	NOMBRE	DESCRIPCION
TELEDETECCIÓN	<i>ERDAS IMAGINE</i>	Software para la visualización, procesamiento y análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas y demás insumos remotos.
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	<i>ArcGis 10.5</i>	Conjunto de aplicaciones SIG que permiten ingresar, manipular, analizar y desplegar información geográfica digital.

Análisis multitemporal: Para el análisis multitemporal de las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación, se definieron dos fechas de evaluación, 7 de agosto de 1989 y 25 de agosto de 2016, la selección de estas fechas dependieron en gran medida de la disponibilidad de estas, por lo cual, se realizó la extracción de dos bandas (Rojo e Infrarrojo cercano), con el fin de generar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para cada año, siguiendo la metodología propuesta por Gates en 1980 y optimizada por Senanayake et al. en 2013. Para mejorar los resultados gráficos del NDVI fue necesaria la corrección de las deficiencias dadas por la contaminación del suelo y por la presencia de áreas con alta biomasa que ocasionan saturación en la energía reflejada. A partir del NDVI se empleó un factor de ajuste que caracteriza la tasa de cobertura vegetal (Xu, 2008 citado por Essa et al., 2012), mejorando la calidad de la información de la imagen, dando como resultado el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI).

Estimación del Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU): Después del análisis y adaptación de la metodología propuesta por MinAmbiente, se estimó el nivel de calidad ambiental actual para la comuna seleccionada. En el documento base metodológica ICAU en su versión número 2 (MinAmbiente 2016), se obtiene información detallada de los indicadores con sus respectivas fórmulas de cálculo, valores de referencia, calificaciones y los datos mínimos requeridos para el desarrollo de ecuaciones (Anexo 1).

Para el cálculo fue necesario la homogeneización de las unidades de los datos recolectados en las entidades (Tabla 4), a excepción del indicador del área de cobertura vegetal por habitante urbano, que requirió una obtención directa de los valores. Mediante el software ArcGis, se recortó del GRID para la comuna 1 la cual se consideró como la comuna con mayor déficit de CVU, evidenciado en los resultados del análisis multitemporal, en la que se obtienen dos categorías (zona verde y zona gris). Posterior a ello, se realiza una transformación de ráster a vector que permitió el cálculo del área aproximada de CVU.

Utilizando la matriz “valores de referencia de indicadores directos e indirectos” de MinAmbiente, se obtuvieron las calificaciones para cada uno de los indicadores, de acuerdo con estos valores se estableció una escala de calificación entre 0 y 1, donde el menor valor es la peor condición del indicador y 1 el mejor valor (Tabla 3).

Tabla 3. Escala de calificación de los indicadores de acuerdo con los valores de referencia.

0	Muy bajo
0,3	Bajo
0,5	Medio
0,8	Alto
1	Muy alto

Relación matemática del área de cobertura vegetal con sus beneficios: Se tomó un valor real para los indicadores que componen el ICAU, definido por la información recolectada en las entidades y posteriormente se comparó y proyectó, con el fin de realizar una extrapolación de datos para obtener una estimación matemática, los cuales dentro de su ponderación generan los beneficios que conlleva la optimización de las áreas de cobertura

vegetal. Los valores proyectados parten de la estimación de expresiones teóricas descritas por otros autores que señalan los beneficios de las áreas verdes urbanas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice de vegetación normalizada (NDVI), muestra el resultado de la identificación de cambios del área de cobertura vegetal urbana para los años 1989 y 2016.

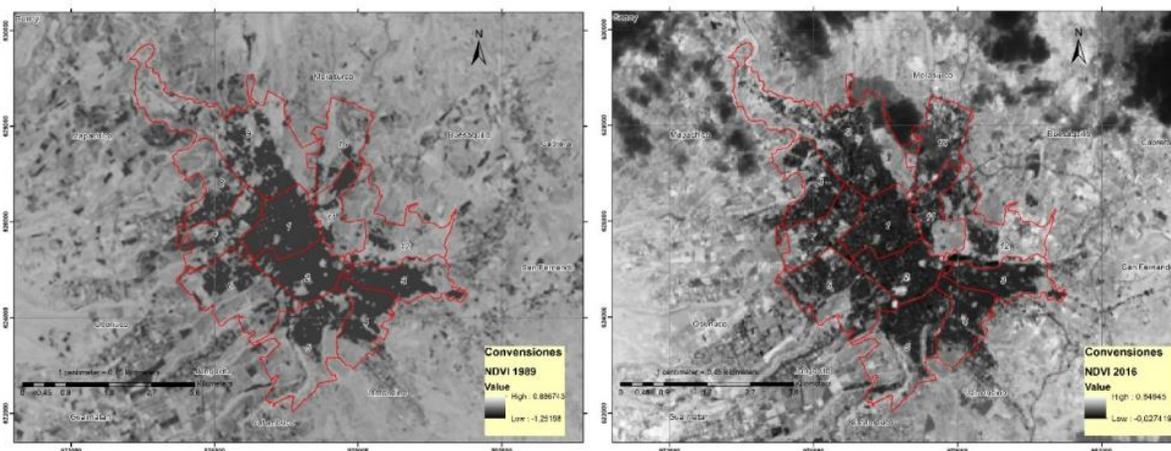


Figura 2. Imágenes NDVI para los años 1989 (izquierda) y 2016 (derecha)

Fuente: Elaboración propia.

El nivel de vegetación se expresa en una escala de grises cuyos valores, según el píxel, oscilan entre -1 y 1 . Los valores más cercanos a 1 representan presencia de vegetación (color gris claro) y los valores más cercanos a -1 , ausencia de vegetación (color negro) evidenciándose pérdida de la cobertura vegetal en la ciudad de Pasto entre el año 1989 y 2016 (Figura 2).

Aplicando el índice de vegetación ajustado al suelo SAVI a través del software ERDAS, fue posible la obtención de mapas de coropletas (mapas con escalas de color), que muestran la densidad de vegetación expresada en colorimetría verde-roja. El color rojo representa ausencia de vegetación mientras el color verde representa la vegetación ajustada al suelo. (Figura 3).

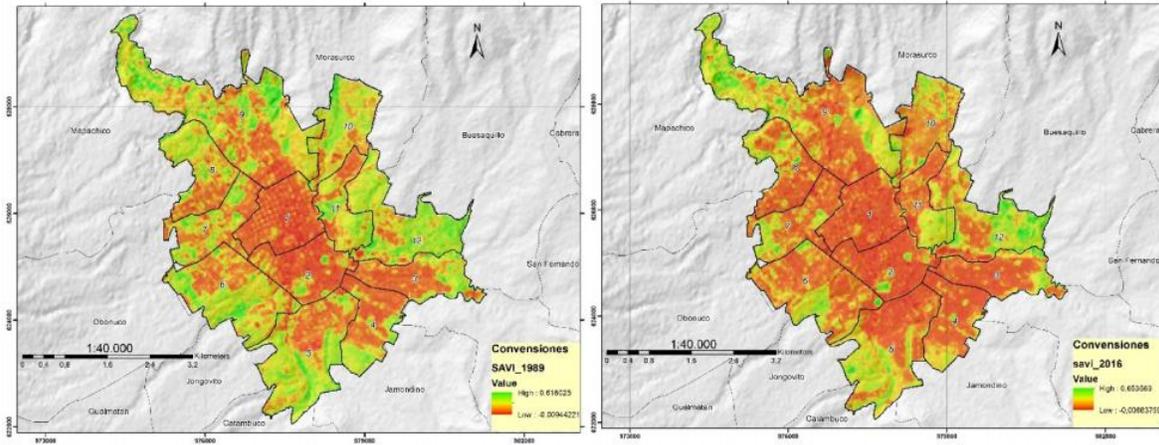


Figura 3: Mapas SAVI Pasto, 1989 (izquierda) 2016 (derecha).

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior, permitió observar el decrecimiento del área de vegetación resaltando la comuna correspondiente al centro de la ciudad (comuna 1). Las comunas 6, 9 y 12 (tabla 5) presentaron valores sustractivos importantes de CVU durante el periodo de evaluación, en gran medida al crecimiento poblacional marcado en las comunas periféricas. La extensión del área urbana no planificada hasta hace algunos años atrás se considera la principal causa de los cambios de uso de suelo a nivel periférico de la ciudad, tal y como lo mencionan Figueroa y Ordoñez (2014); sin embargo, la comuna 1 presentó menor cantidad de pixeles que representan zonas verdes, resultado de la baja planificación que tuvo desde su fundación, al ser una de las comunas más antiguas (Piarpusan, 2012), predominando establecimientos educativos, económicos, gubernamentales, talleres e infraestructura de comercio entre otros, clasificada como un área comercial y económica (Piarpusan, 2012).

Con base en los valores de la tabla 5, la comuna 1 cuenta con las áreas de CVU más bajas de las 12 comunas (69.987 m^2), supeditado a las características propias de la zona, las cuales cuentan con una población altamente densificada (17.995 habitantes, DANE 2016) y una reducida área de cobertura vegetal por habitante ($3,9 \text{ m}^2/\text{hab}$). Los resultados previos obtenidos para esta comuna permitieron su selección como unidad geográfica de estudio, en la que se realizó un cálculo estimado del Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU).

Cálculo de indicadores en la comuna 1.

El estudio logró el cálculo de 9 indicadores directos y 5 indicadores indirectos tal como lo sugiere MinAmbiente (2016) (tabla 4), asumiendo un alto nivel de confiabilidad. Sin embargo, el Informe Nacional de Calidad Ambiental Urbana (2016), para el nivel de complejidad de urbes con población entre 100.000 y 500.000 habitantes, evidencia que los resultados no reportaron el 100% de indicadores propuestos. Lo anterior, debido a la falta o ausencia de fuentes de información, información no confiable o que no fue posible validar, así como la falta de acciones para recoger la información que permita medir temas estratégicos de la gestión ambiental de las áreas urbanas.

Tabla 4. Relación indicadores con calificaciones obtenidas, y fuentes de información.

	Indicador	Resultado	Calificación con base en el ICAU	Clasificación	Fuente
DIRECTO	Superficie de área verde por habitante	3,9m ² /hab	0,3	Medio	Este estudio, 2018. Apoyado con Datos POT (2014)
	Calidad del aire	24,4 ug/m ³	1	Muy alto	CORPONARIÑO (2016), SISARE (2016)
	Calidad del agua superficial	0,56	0,5	Medio	PORH Río Pasto (2011)
	Porcentaje de áreas protegidas	0	0	Muy bajo	Acuerdo Municipal N° 041 del 29 de noviembre del 2010
	Porcentaje de residuos sólidos aprovechados	17,83%	0,8	Alto	Plan de gestión integral de residuos sólidos Pasto 2015 – 2027 (2015)

	Porcentaje de población urbana expuesta a ruido por encima del nivel de referencia	45%	0	Muy bajo	Este estudio, 2019. Apoyado con Datos de Coorponariño (2013)
	Porcentaje de población que participa en gestión ambiental urbana	2%	0,3	Bajo	Alcaldía de Pasto (2016),
	Porcentaje de población vinculada a estrategias de educación ambiental en áreas urbanas	3%	0,3	Bajo	Alcaldía de Pasto (2016),
	Porcentaje de población urbana localizada en zonas de amenaza alta	0%	1	Muy alto	Servicio geológico colombiano (2015)
INDIRECTO	Consumo residencial de agua por habitante	87,88 L/Hab x Día	1	Muy alto	Informe Nacional de Calidad Ambiental Urbana (2016)
	Consumo residencial de energía por habitante	389,51 Kw/año	0	Muy bajo	Informe de gestión CEDENAR S.A. E.S.P 2017 (2018).
	Porcentaje de residuos sólidos dispuestos adecuadamente	100%	1	Muy Alto	Informe de gestión 2017EMAS S.A. E.S.P (2018).
	Porcentaje de suelos de protección urbanos	0%	0	Muy bajo	Este estudio, 2019. Apoyado con Datos POT (2014)
	Espacio público efectivo por habitante	2,4m2/hab	0	Muy bajo	Coorponariño (2016)

Duran (2006) infiere que los indicadores de calidad ambiental están correlacionados espacialmente. Sin embargo, los resultados de la calificación de los indicadores ambientales directos e indirectos de la comuna 1, son muy variables. De ello se puede señalar que existen problemáticas ambientales en las que se debe realizar énfasis, para lograr una calidad ambiental idealizada como es el caso del área de cobertura vegetal.

Liévano y Giraldo en su estudio de calidad ambiental en la localidad de Kennedy, Bogotá, lograron identificar a través de la lista de chequeo 13 de los 16 indicadores que propone el ICAU, se evidencia una falencia en la consecución de la información ya que no se logra adquirir información del 100% de los indicadores propuestos. Esta investigación logra la consecución de la totalidad de los indicadores. Sin embargo, la calidad del Aire y consumo residencial de agua y energía por habitante son calculados con información de la ciudad de San Juan de Pasto, esto debido a la complejidad del logro de la información a nivel comunal.

Para la elaboración del ICAU, el MinAmbiente (2016) tuvo en consideración sistemas existentes de indicadores ambientales e iniciativas internacionales y locales, entre los antecedentes más importantes está el Índice de Calidad Ambiental Urbana – ICAU, desarrollado para el municipio de Cali por la Universidad del Valle, el cual tiene como ventaja una mayor resolución espacial, puesto que llega al nivel de comuna, localidad o barrio. Tal aspecto da claridad de lo conveniente y adecuado de la implementación del ICAU para la comuna 1 de San Juan de Pasto, la distribución espacial de la calidad ambiental por comunas muestra una relación indirecta con la centralidad de la ciudad, siendo las áreas periurbanas las que poseen mejor calidad ambiental, estas presentan un carácter socioeconómico elevado. . Duran (2006)

Con base en la metodología planteada por Min.Ambiente (2016) se clasifica la calidad ambiental de la comuna 1 de la ciudad de San Juan de Pasto como baja, ya que se encuentra en rango de 40,1 a 60 puntos. Por lo que se puede señalar que la calidad ambiental de la comuna 1 es un eje importante de acción y que debe ser prioridad para los gobernantes y los habitantes de la zona impulsar estrategias que estén a favor de mejorar la calidad ambiental.

En nivel de calidad ambiental de la comuna 1 se encuentra en un rango bajo, tal calificación también la tienen ciudades como Soledad, Barranquilla, Ibagué, Cali y Pasto, según el informe de calidad ambiental urbana (2013).

Para el caso del área de cobertura vegetal urbana (Figura 4), se obtiene una superficie de área verde por habitante de 3,9 m²/hab (Formula anexo 1), Teniendo únicamente dos zonas representativas de CVU, zona colegio pedagógico y bosque interno del Colegio San Francisco de Asís, sumando un área de 69.987m², lo que equivale a una calificación de 0,3 (ICAU), que contrasta con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), de 9 m²/hab (Reyes y Figueroa, 2010).

Tabla 5. Relación de áreas verdes por comuna en Pasto (1989 – 2016).

Comuna	CVU (m ²) 1989	CVU (m ²) 2016
1	70.312	69.987
2	173.243	111.005
3	482.035	320.400
4	493.993	257.200
5	1.600.860	1.201.733
6	1.452.466	732.734
7	640.099	396.995
8	763.331	430.478
9	2.624.468	2.091.386
10	1.002.955	561.680
11	644.827	487.205
12	1.812.653	1.370.000
Area Pasto (m²)	11.269.242	8.030.803

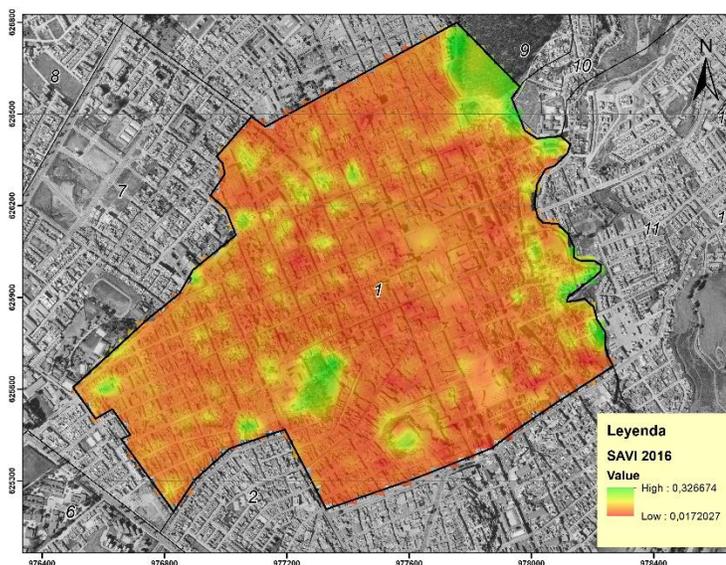


Figura 4: Índice de vegetación ajustado al suelo SAVI Comuna 1- 2016.

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de calidad del aire se tuvo en cuenta la información aportada por la única estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en la Universidad Mariana (CORPONARIÑO, 2016), que documenta una concentración de 24,4 µg/m³ de PM₁₀, que equivale a una calificación de 1 (ICAU), que está dentro de los niveles permitidos, contemplados por la normativa nacional (MinAmbiente. Res. 610 de 2010); por otra parte la calidad del agua superficial se estimó usando la información contenida en el Plan de Ordenamiento del recurso hídrico del río Pasto - POHR (CORPONARIÑO, 2011), para lo

que se calculó el Índice de Calidad del Agua (ICA) obteniéndose un valor de 0,56 del ámbito numérico establecido por el IDEAM, correspondiente a una calificación de 0.5 (ICAU), que evidencia una regular calidad del agua en el punto de obtención de la muestra ubicado en el colector pedagógico de la comuna 1.

El grupo de indicadores directos representan un 70% de la calificación total, donde destacan la calidad del aire y el porcentaje de población urbana localizada en zonas de amenaza alta por sus altas calificaciones (1 de ICAU) sobre el resto de las variables.

El porcentaje de residuos sólidos aprovechados obtuvo una calificación alta (0,8) y la calidad de agua superficial una calificación media (0,5).

El resto de indicadores directos reportados tienen una calificación muy baja (0-0,3) lo que generó un puntaje final de los indicadores directos de 30.

El grupo de indicadores indirectos representan un 30% de la calificación total, donde destacan los consumos residenciales de agua y energía con muy buena calificación (1 de ICAU). Por otra parte el resto de indicadores indirectos reportados tienen una calificación muy baja (0 de ICAU) generando un puntaje final de los indicadores indirectos de 12.

Después de la evaluación de la información obtenida y la estimación de calificaciones para cada uno de los indicadores (directos e indirectos), se establece una calificación final del índice de 42 puntos, lo que equivale a una baja calidad ambiental (MinAmbiente, 2016).

Beneficios del área de cobertura vegetal urbana

Mediante extrapolación matemática de datos y el análisis de los resultados se estimó una nueva calificación para el ICAU de la comuna 1, proyectando los beneficios del área de cobertura vegetal frente a otros indicadores, basados en citas de diferentes autores, partiendo de la recomendación de la OMS, de contar con al menos $9\text{m}^2/\text{hab}$ de CVU, se establecen las siguientes proyecciones:

Indicador No. 1 Superficie de área verde por habitante

Si tenemos en cuenta la recomendación de la OMS del área ideal de CVU ($9\text{m}^2/\text{hab}$), lo que equivale a un área total de 161.955 m^2 para la comuna 1, podemos proyectar una mejoría en la calificación de ICAU de 1 en lo referente a este indicador.

Tabla 6. Comparativa de valores de área de cobertura vegetal.

	Real	Proyectada
Área verde m^2	69.987	161.955
Población	17.995	17.995
m^2/hab	3,9	9

Indicador No.2: Porcentaje de población urbana expuesta a ruido por encima del nivel de referencia.

“Las cubiertas vegetales son excelentes atenuadores de ruido, especialmente a bajas frecuencias (una cubierta de 20m^2 puede llegar a reducir hasta 40 dB). (POSADA, et.al - 2009)”, podemos estimar que la optimización del área de CVU según la recomendación de la OMS ($9\text{m}^2/\text{hab}$), determinará una disminución de 15.1 dB, obteniéndose una exposición a ruido de 49.9 dB en la comuna 1, lo que mejorará la calificación ICAU a 1 (siendo este valor de acuerdo a las calificaciones, de muy bueno).

Comportamiento del indicador, frente al aumento de cobertura vegetal.

	Real	Proyectada
Área verde m^2/hab AVUpc	3,9	9
Decibeles percibidos	65	49,9
Disminución		15,1

Indicador No. 3. Consumo residencial de energía por habitante.

De acuerdo a (McPherson et al. 2010), el cual menciona que “Al incrementar en un 10% la cobertura vegetal en las ciudades, se estaría reduciendo el uso de energía para calefacción y refrigeración entre un 15 y 20%; significando un ahorro general de aproximadamente el 3% del consumo general de energía eléctrica. Para este estudio, se pudo estimar que la

optimización del área de CVU según la recomendación de la OMS ($9\text{m}^2/\text{hab}$), determinará un ahorro energético de $109,1 \text{ Kw}/\text{hab}\cdot\text{año}$, lo que mejorará la calificación ICAU a 0,8 (bueno). Este indicador no estima ni involucra las mejoras tecnológicas de las viviendas inmersas en la zona de estudio.

Comportamiento del indicador, frente a aumento de cobertura vegetal.

	Real	Proyectada
AVUpc	3,9	9
Consumo Kw/hab	389,5	280,4
Ahorro Kw/hab		109,1

Indicador No. 4. Calidad del aire

Darlington et al., 2001, afirma que “ 1 m^2 de cobertura vegetal atrapa 130 gramos de polvo por año”, con base en esto, se pudo estimar que la optimización del área de CVU según la recomendación de la OMS ($9\text{m}^2/\text{hab}$), determinará una disminución de $8\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que mantendrá una alta calificación 1 (muy bueno), cabe resaltar que la investigación pudo determinar una disminución en la concentración de material particulado en el aire de la comuna 1.

Comportamiento del indicador calidad del aire, frente a un aumento de cobertura vegetal.

	Real	Proyectada
AVUpc	3,9	9
PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24,4	16
Disminución $\mu\text{g}/\text{m}^3$		8

Con los valores obtenidos en la etapa de proyección, según las recomendaciones de CVU (OMS), se estima un nuevo ICAU para la comuna 1 de 60 puntos (Tabla 10), que generará una optimización de los valores en las variables contempladas por MinAmbiente, lo que determina un ALTA CALIDAD AMBIENTAL.

Evidenciando la capacidad que tienen las CVU, de modificar valores de calidad ambiental en ciudades, se encuentra necesario la utilización de estrategias que se adapten a la morfología de ciudades, siendo los techos verdes o los jardines verticales, sistemas óptimos para mejorar potencialmente la calidad ambiental en ciudades (Vallejo, S. 2018)

Tabla 10. Estimación del índice de calidad ambiental bajo parámetros ideales.

TIPO	INDICADOR	CALIFICACION	CALCULO
DIRECTO	Superficie de área verde por habitante	1	$VFD = \Sigma VOI * \frac{70}{\# \text{ de indicadores del grupo}}$ <p style="text-align: center;">44</p>
	Calidad del aire	1	
	Calidad del agua superficial	0,5	
	Porcentaje de áreas protegidas	0	
	Porcentaje de residuos sólidos aprovechados	0,8	
	Porcentaje de población urbana expuesta a ruido por encima del nivel de referencia	1	
	Porcentaje de población que participa en gestión ambiental urbana	0	
	Porcentaje de población vinculada a estrategias de educación ambiental en áreas urbanas	0,3	
	Porcentaje de población urbana localizada en zonas de amenaza alta	1	
INDIRECTO	Consumo residencial de agua por habitante	1	$VFI = \Sigma VOI * \frac{30}{\# \text{ de indicadores del grupo}}$ <p style="text-align: center;">16,8</p>
	Consumo residencial de energía por habitante	0,8	
	Porcentaje de residuos sólidos dispuestos adecuadamente	1	
	Porcentaje de suelos de protección urbanos	0	
	Espacio público efectivo por habitante	0	
TOTAL ICAU		ICAU = VFD + VFI	60

CONCLUSIONES

Después de la evaluación de la información obtenida y la estimación de calificaciones para cada uno de los indicadores, se establece una calificación final del ICAU de 42 puntos, lo que equivale a una baja calidad ambiental del habitante urbano para la comuna 1 de la ciudad de San Juan de Pasto.

Para la comuna 1, de la ciudad de Pasto, los 3,9 m²/hab de áreas verdes por habitante se encuentran muy por debajo de lo recomendado. Esta situación podría mejorar

sustancialmente al incorporar los espacios abiertos disponibles como áreas verdes, hasta conseguir 9 m²/hab situación capaz de modificar valores generales de ICAU.

De acuerdo a las proyecciones matemáticas, cerca del 10% del área total de la comuna 1 deberá poseer cobertura vegetal urbana, esto, con la finalidad de cumplir con las recomendaciones o metas recomendadas a nivel global.

REFERENCIAS

Alcaldía del Municipio de Pasto. (2014). Plan de ordenamiento territorial de Pasto 2014 - 2027). Recuperado de https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestrasdependencias/secretaria-de-planeacion/plan-de-ordenamientoterritorial?download=7979:documento_tecnico_soporte_pot_nov_2015.

Alcaldía del Municipio de Pasto. (2011). Plan decenal de educación ambiental, municipio de Pasto. Proyecto: “La educación ambiental un camino para la construcción de la ciudadanía y corresponsabilidad ambiental en el territorio”.

CORPONARIÑO. (2011). Plan de ordenamiento del cauce principal del Rio Pasto. Recuperado de: <http://www.corponarino.gov.co/expedientes/descontaminacion/porhriopasto.pdf>.

CORPONARIÑO. (2013). Documento de actualización de mediciones de los mapas de ruido de las cabeceras municipales de Pasto, Ipiales y Tumaco (NARIÑO).

CORPONARIÑO. (2016). Informe sobre el estado de calidad del aire - noviembre de 2016. Expedientes de calidad Ambiental, Informe Aire.

Darlington, A.B., Dat, J. and Dixon, M.A. (2001). The Biofiltration of indoor air: air flux and temperature influence the removal of toluene, ethylene and xylene. *Environ.l Sci. Technol.* 35: 240-246.

Departamento nacional de estadística. (2002). Censos poblacionales históricos. 2002. Bogotá. P 48.

Duran, F (2006). Problemas y retos de las actuales políticas urbanas en el context de las presentes tendencias hacia formas difusas de ciudad, Universidad de Granada. Granada, España.

Essa, W., Verbeiren, B., van der Kwast, J., Van de Voorde, T., & Batelaan, O. (2012) Evaluation of the DisTrad thermal sharpening methodology for urban areas; 2012. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.

Figuroa, J., Ordoñez, W. Caracterización de la evolución urbana en los barrios de la comuna cinco de la ciudad de San Juan de Pasto periodo 1970 -2000. Informe final del Trabajo de Grado, Modalidad Tesis, para optar el título de Geógrafo con Énfasis en Planificación Regional. 2014. Universidad de Nariño.

FNUAP, Fondo de Población de las Naciones Unidas (2001). The state of the world population annual report. Nueva York, Estados Unidos.

Gutierrez, R (2010). Espacios verdes públicos y calidad de vida, Centro universitario de arquitectura, arte y diseño. Guadalajara, México.

McPHERSON, E. G.; SIMPSON, J. R (2010). Air pollutant uptake by Sacramento's urban forest. Journal of Arboriculture, v. 24, n. 4, p. 224-234.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Índice de calidad ambiental urbana-ICAU. Recuperado de: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/Documento_Base_metodologica_ICAU_Versión_2._agosto_2016.pdf.

Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (2010). Resolución Número 610 del 24 de marzo de 2010, por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006.

Posada, M. I. P., Maya, M. D. P. A., & Ossa, C. E. F. (2009). Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. Revista EIA, (12), 79-89.

Piarpusan, E. Dinámica Espacial del Crecimiento Urbano en la ciudad de San Juan de Pasto...1960 – 2011. Trabajo de grado para optar el título de Geógrafo, San Juan de Pasto.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 1996. Urban Agriculture: Food, Jobs and Sustainable Cities. Nueva York: PNUD.

Reyes, S. y Figueroa, I. M. (2010). “Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile”. EURE Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos Regionales.

Senanayake, I. P., Welivitiya, W. D. D. P., & Nadeeka, P. M. (2013). Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. Urban Climate.

Servicio Geológico colombiano (2015). Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia.

U.S. Geological Survey (USGS). (2018). Descarga de imágenes satelitales LANDSAT 5 y 8. Portal web: <https://www.usgs.gov/>.

Uribe, E. (1997). Enverdecimiento urbano en Colombia en Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe. México.

Vallejo, S. (2018). Naturación urbana, e ingeniería de biosistemas. Universidad de Sevilla, Sevilla. España.

Anexo 1. Tabla de fórmulas empleadas para el cálculo de indicadores directos e indirectos

INDICADOR	FORMULA	DATOS REQUERIDOS
1. SUPERFICIE DE ÁREA VERDE POR HABITANTE	$AVUp_c = \frac{AVU}{PUT}$	AVU = Total de áreas verdes urbanas PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
2. CALIDAD DEL AIRE	$\%EC = \frac{Ec}{Et} * 100$	Ec = Número de estaciones que reportan concentraciones anuales de PM10 y/o PM2.5 inferiores a las establecidas en la norma vigente para el último año calendario Et = Total de estaciones monitoreando PM10 y PM2.5 en el periodo de tiempo (t) de un área urbana
3. CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL	$ICA_{i,j} = \sum_{i=1}^n W_i I_{ijt}$	NOMBRE DE LA CORRIENTE DE AGUA SUPERFICIAL
4. PORCENTAJE DE ÁREAS PROTEGIDAS Y ESTRATEGIAS COMPLEMENTARIAS DE CONSERVACIÓN URBANAS	$APEUPE = \frac{APEPE}{APEPOT} * 100$	APEPE = Superficie de áreas protegidas con plan de manejo ambiental en ejecución y estrategias complementarias de conservación incluidas en el POT(Ha) APEPOT = Superficie total de áreas protegidas y estrategias de conservación incluidas en el POT. (Ha)
5. PORCENTAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS APROVECHADOS	$\%RSA = \left(\frac{\Sigma RSA}{RSG} \right) * 100$	Σ RSA = Residuos sólidos aprovechados (incluyendo todo tipo de aprovechamiento). (Ton) RSG = Residuos sólidos generados. (Ton)
6. PORCENTAJE DE POBLACIÓN URBANA EXPUESTA A RUIDO POR ENCIMA DEL NIVEL DE REFERENCIA	$\%PUAR_{periodo} = \frac{PUAR}{PUT} * 100$	PUAR = Población urbana expuesta a ruido ambiental por encima del valor de referencia. (personas) PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
7. PORCENTAJE DE POBLACIÓN QUE PARTICIPA EN GESTIÓN AMBIENTAL URBANA	$\%PPGAU = \frac{PPGAU}{PUT} * 100$	PPGAU = Población que participa en gestión ambiental en el área urbana (Número de personas) PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
8. PORCENTAJE DE POBLACIÓN VINCULADA A	$\%PVEA = \frac{PVEA}{PUT} * 100$	PVEA = Población vinculada a estrategias de educación ambiental en el área urbana. (Número de Personas)

ESTRATEGIAS DE EDUCACIÓN AMBIENTAL EN ÁREAS URBANAS		PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
9. PORCENTAJE DE POBLACIÓN URBANA LOCALIZADA EN ZONAS DE AMENAZA ALTA	$\%POUZAA = \frac{PUZAA}{PUT} * 100$	PUZAA = Población urbana ubicada en zonas de amenaza alta en el área urbana. (personas)
		PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
10. CONSUMO RESIDENCIAL DE AGUA POR HABITANTE	$CRAPH = \frac{TACR_{j,t}}{PUT_{j,t}}$ $\% \text{ consumo con relacion a DNM} = \frac{CRAPH}{\text{Dotación RAS}}$	TACR = Total de agua consumida para uso residencial en el área urbana
		PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
		CRAPH = Consumo residencial de agua por habitante
		Dotación RAS = Dotación neta máxima establecida en el RAS según nivel de complejidad y clima
11. CONSUMO RESIDENCIAL DE ENERGÍA POR HABITANTE	$CREPH1 = \frac{TECR_{j,t}}{PUT_{j,t}}$ $\% \text{ consumo energía} = \frac{CREPH1}{CREPH2} * 100$	TECR = Total de energía consumida para uso residencial en el área urbana
		PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)
		CREPH1 = Consumo residencial de energía por habitante (Año de reporte ICAU)
		CREPH2 = Consumo residencial de energía por habitante (Año reporte ICAU anterior)
12. PORCENTAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS DISPUESTOS ADECUADAMENTE	$\%RSD = \frac{RSD_{j,t}}{RG_{j,t}} * 100$	RSD _{j,t} = Cantidad de residuos sólidos dispuestos adecuadamente
		RG _{j,t} = Cantidad de residuos sólidos generados (RS dispuestos + RS aprovechados)
13. PORCENTAJE DE SUELOS DE PROTECCIÓN URBANOS INCLUIDOS EN EL POT CON CONFLICTOS DE USO DEL SUELOS	$CUSPU = \frac{SPUCU}{SPUT}$	SPUCU = Superficie del suelo de protección urbano (de importancia ambiental y de alto riesgo no mitigable o alta amenaza con restricción de uso) con conflictos de uso del suelo
		SPUT = Superficie del suelo de protección urbano (de importancia ambiental y de alto riesgo no mitigable o alta amenaza con restricción de uso)
14. ESPACIO PÚBLICO EFECTIVO POR HABITANTE	$EPE = \frac{EPEU}{PUT}$	EPEU = Área de espacio público efectivo en el perímetro urbano
		PUT = Población urbana total (cabecera) (Número de personas)