



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Bogotá

**Facultad de Estudios Ambientales y Rurales.**

**-2018-**

**Laura Ramírez Rojas**

**Director: Armando Sarmiento**

**Codirector: Mauricio González**

**Una evaluación de la afectación del flujo  
hidrológico causado por la expansión urbana  
en la ciudad de Bogotá**

## Contenido

Agradecimientos .....	3
Resumen.....	4
Abstract.....	5
1 INTRODUCCIÓN:.....	6
1.1 Problema: (como la ciudad altera el flujo) como se desempeña los flujos hidrológicos dentro de la ciudad .....	6
1.2 Justificación:.....	8
1.3 Propósito del proyecto y preguntas de investigación: .....	9
2 OBJETIVOS: .....	10
2.1 Objetivo general:.....	10
2.2 Objetivos específicos: .....	10
2.3 Pregunta general: .....	10
2.4 Preguntas específicas: .....	10
3 MARCO REFERENCIAL.....	11
3.1 Marco conceptual .....	11
3.2 Antecedentes .....	18
4 ÁREA DE ESTUDIO .....	23
5 MATERIALES Y MÉTODOS .....	26
5.1 Diagrama de Flujo .....	26
5.2 Diseño del estudio .....	26
5.3 Métodos de Recolección de datos.....	31
6 RESULTADOS.....	33
4. DISCUSIÓN.....	44
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
8 REFERENCIAS .....	53
9 ANEXOS.....	58

## Agradecimientos

*El presente artículo de investigación no hubiese sido posible sin el apoyo de mi padre Jorge Ramírez y mi madre Ana María Rojas, quienes me dieron la educación que hoy poseo. Por ser mi ejemplo a seguir, por enseñarme a creer en mí misma sin importar las circunstancias en las que este. Reconozco de manera especial el esfuerzo, tiempo, dedicación y paciencia a mi director Armando Sarmiento. También agradezco a mi codirector Mauricio Gonzales por su apoyo. A Oriane Guerin y a Daniel Posada por hacer que las horas pasen más rápido. Y por último a Andrés Zambrano quien me dio impulsos de seguir en cada momento.*

## Resumen

La urbanización es uno de los fenómenos más dinámicos a nivel global. Hoy, en el mundo, hay más población habitando en áreas urbanas que en áreas rurales, tendencia que se incrementará a lo largo del siglo XXI. La expansión del área urbanizada tiene diversas consecuencias ambientales que afectan el clima local, la biodiversidad y los flujos ecológicos. Construir ciudades que procuren mantener un balance ecológico con los ecosistemas y el paisaje circundante, es uno de los retos más importantes que enfrenta la sociedad actual. La ciudad puede verse como un super-organismo cuyo metabolismo, comprendido como el flujo de materia y energía que garantizan su adecuada funcionalidad (entradas y salidas), debe alcanzar niveles de eficiencia mínimos para mejorar su sostenibilidad y minimizar sus impactos ambientales. Este trabajo se apoya en este concepto de metabolismo urbano para acercarse a conocer más sobre algunos aspectos del desempeño ambiental de la ciudad de Bogotá.

En este artículo, se considera como problema particular el flujo hidrológico, dentro del área urbana de la ciudad de Bogotá, para indagar cómo la expansión de la ciudad lo afecta y qué consecuencias tiene sobre sus habitantes.

En el desarrollo de la investigación, se trabajó a partir de un grupo de imágenes de satélite para estimar la expansión del área urbanizada en el periodo comprendido entre 1988 y 2018, para luego evaluar el impacto de esta expansión en el volumen del escurrimiento superficial. Se parte del supuesto que el área urbanizada tiene un impacto importante en la infiltración subsuperficial y por tanto el volumen de agua de escorrentía se incrementa, aumentando la amenaza por inundaciones en la ciudad.

En la interpretación de los datos, se tuvo presente para este trabajo, las variables más importantes para cuantificar los flujos hidrológicos: precipitación, escorrentía, infiltración y evapotranspiración. En el proceso de la investigación, se considera el concepto de la estructura ecológica principal (EEP), instrumento de planeación que busca mantener, no sólo áreas con coberturas con algún grado de “naturalidad”, también algunos de los flujos ecológicos y su conectividad con paisajes circundantes. Este concepto fue introducido en el Plan de ordenamiento territorial del año 2000 (POT- 2000). A partir de las consideraciones del crecimiento urbano, se propuso analizar la dimensión con respecto a las amenazas de inundación, teniendo en cuenta las diferencias que pueden ser localizadas a partir de la especialización propuesta por la introducción del instrumento de planeación denominado UPZ (unidades de planeamiento zonal).

## Abstract

Urbanization is one of the most dynamic phenomena globally. Today, in the world, there is larger population living in urban areas than in rural areas, a trend that will increase throughout the 21st century. The expansion of the urban area has environmental consequences that affect the local climate, biodiversity and ecological flows. Building cities that strive to maintain an ecological balance with the ecosystems and the surrounding landscape is the single most important challenge facing today's society. The city can become a super-organism whose metabolism, as the flow of matter and energy that is aggravated, succeeds in its useful life. This work is based on this concept of urban metabolism to get closer to know more about some aspects of the environmental performance of the city of Bogotá.

In this article, the hydrological flow is considered a particular problem, within the urban area of the city of Bogotá, to investigate how the expansion of the city affects it and what consequences it has on its inhabitants.

In the development of the research, a group of satellite images was created to estimate the expansion of the urbanized area in the period between 1988 and 2018, to then evaluate the impact of this expansion on the volume of surface runoff. The fact that the urbanized area has a significant impact on subsurface infiltration and therefore the volume of runoff water increases the threat of flooding in the city.

In the interpretation of the data, the most important variables for quantifying the hydrological flows had to be presented in the investigation: precipitation, runoff, infiltration and evapotranspiration. In the research process, the concept of the main ecological structure (EEP) was important because it is one of the main elements of the proposed city model. This concept was introduced in the Territorial Land Use Plan of 2000 (POT-2000). Based on the considerations of urban growth, it was proposed to analyze the dimension with respect to flood threats, taking into account the differences that can be located from the projection of the planning project UPZ (zonal planning units).

# 1 INTRODUCCIÓN:

## 1.1 Problema: (como la ciudad altera el flujo) como se desempeña los flujos hidrológicos dentro de la ciudad

Una ciudad (como organismo) nunca será sostenible en sentido estricto, dado que no puede depender de la autosuficiencia de los recursos extraídos en su área (Niza, Rosado y Ferrdo, 2009). Una ciudad puede llegar a mitigar sus impactos ambientales a través de analizar los flujos asociados por medio del, metabolismo mismo de la ciudad como organismo.

El flujo de materia y energía hacia y desde la ciudad (agua, materias primas, bienes y servicios, residuos) necesarios para garantizar un nivel indicativo de calidad de vida para sus habitante puede ser entendido como metabolismo urbano (Quintero y Tabares, 2015). La condición de sostenibilidad o de minimización de impactos, puede analizarse desde varios puntos de vista basados en este concepto, la eficiencia en el uso de recursos y materiales y/o minimización de residuos, por ejemplo. Otro enfoque, el que se usó en este trabajo, es analizar el grado de afectación de algunos procesos ecológicos e hidrológicos inducidos por la ciudad, respecto de la matriz de paisaje circundante.

En consecuencia, para inducir mejoras en la sostenibilidad inicialmente se requiere articular adecuadamente las funciones y procesos naturales del paisaje circundante. Entre ellos la conectividad de espacios naturales o semi-naturales, que son necesarios para promover la calidad ambiental urbana y la calidad de vida de sus habitantes, son de particular interés para mantener la conectividad de procesos ecológicos y procurar favorecer a poblaciones de especies que se han adaptado a condiciones urbanas.

Las ciudades solo cubren el 2% de la superficie terrestre, consumen el 75% de sus recursos(Garnett, 1996). La humanidad -desde el inicio del siglo XXI- está experimentando cambios dramáticos en la vida urbana. Mientras que en 1900 solo el 10% de la población mundial estaba conformada por habitantes urbanos, ese porcentaje ahora supera el 50%, y aumentará aún más en los próximos 50 años (Grimm et al., 2008).

Las áreas urbanas son *puntos calientes* que impulsan el cambio ambiental en múltiples escalas (Sánchez, 2013). Las demandas materiales de producción y consumo humano alteran el uso y cobertura de la tierra, la biodiversidad y los sistemas hidrológicos locales y regionales.

Los espacios naturales y semi-naturales conectan los ecosistemas de la periferia con la ciudad, permitiendo la continuidad de los flujos ecológicos, al tiempo que prestan importantes servicios al servir como filtro natural de la calidad del aire y de las aguas. Los espacios naturales y semi-naturales permiten el control de inundaciones y la regulación hídrica; actúan en el control de temperaturas y mitigación de islas de calor, entre otros. (Pöcke y Aldunce, 2010). Como lo afirman

(Sorensen, Barzetti, Keipi y Williams, 1998) estas áreas contribuyen a la regulación de la temperatura urbana.

La EEP es un instrumento contemporáneo de planeación urbana aplicado a conducir los procesos ecológicos esenciales, garantizando la conectividad ecológica y la disponibilidad de servicios ambientales en el territorio municipal.

Para la planeación sostenible de Bogotá, la conectividad de espacios naturales y semi-naturales puede ser entendida como la vinculación planeada de los componentes que conforman la *estructura ecológica principal* -EEP- con el paisaje regional.

Los elementos naturales y semi- naturales que conforman la EEP deben funcionar como conectores vinculados, donde se generen ciclos de recuperación de los flujos ecológicos. En la ciudad de Bogotá, no hay un nivel de conectividad ambiental adecuada debido a que en el proceso de desarrollo de la ciudad estos principios sólo fueron considerados en años recientes (Carlos et al., 2016). Por tal razón se dificulta la fluidez de materia y energía, impidiendo mejorar la sostenibilidad ambiental urbana.

Como resultado del proceso histórico de expansión de la ciudad de Bogotá, los espacios con coberturas naturales o semi naturales se encuentran fragmentados. Lo cual genera pérdida de biodiversidad, deterioro del hábitat para las especies que han logrado adaptarse a ambientes urbanos, disminución de la resiliencia y deterioro de los servicios ambientales que proveen estos espacios. Igualmente existe una alteración importante en los procesos hidrológicos tanto a nivel superficial como subsuperficial.

La sociedad es, en muchas ocasiones, la variable ecológica dominante en la determinación de la configuración del paisaje y, en consecuencia, de las implicaciones funcionales que se generan, tanto en un momento dado como en su evolución a lo largo del tiempo (Subirós, Varga, Llausas y Ribas, 2006).

El concepto de metabolismo urbano como la “suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, resultando en crecimiento, producción de energía y eliminación de desechos” (Kennedy et. Al 2007), brinda argumentos metodológicos para introducir propuestas de planeación en la sostenibilidad ambiental urbana. Los estudios del metabolismo urbano pueden ser utilizados como herramienta conceptual para identificar los problemas ambientales(Niza et al., 2009). Uno de estos problemas ambientales en Bogotá, acorde a los objetivos del presente trabajo, es el cambio en el ciclo hidrológico debido a la presencia generalizada de superficies impermeables en las edificaciones y espacios públicos.

La ciudad de Bogotá tiene en su borde oriental un conjunto de cerros con nacimientos, páramos y manantiales que durante mucho tiempo fueron los que abastecieron de agua a todos los habitantes que se encontraban en ella (Villegas, 2003). El drenaje natural de estos cerros, en su vertiente occidental, se desarrolla a través de una gran cantidad de quebradas que se convierten en los afluentes de los

principales ríos de la ciudad: Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo (D. F. Pérez y Zamora, 2015).

Hoy en día, el sistema hídrico de Bogotá presenta una problemática compleja en términos de calidad del agua que se ha estudiado desde el 2002 (Rojas et al., 2008). La destrucción de la cobertura vegetal original de la cuenca, en especial en los cerros, el mal uso del suelo, la erosión, la sobreutilización de los recursos hídricos y la contaminación han producido una degradación intensa y creciente del sistema de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca alta del río Bogotá (A. Pérez, 2000). La expansión urbana tiene como resultado la disminución del proceso de infiltración y por tanto se incrementa la escorrentía superficial, dando como resultado un incremento en la amenaza por inundaciones, fenómeno que ha afectado recurrentemente a la ciudad de Bogotá.

Las corrientes de agua que atraviesan la ciudad vinculan en el paisaje regional dos elementos geográficos importantes: la cadena de los cerros orientales y el cauce medio río Bogotá. Entre estos dos elementos se podrían considerar unas franjas ambientales, producto de la localización de áreas naturales y semi-naturales, áreas de márgenes de protección que acompañan las cuencas de los ríos y quebradas. Esas franjas, superpuestas a la trama urbana, pueden actuar como conectores de los corredores ambientales.

## 1.2 Justificación:

Bogotá, la ciudad capital de Colombia, ha crecido aceleradamente durante la última mitad del siglo XX abarcando la franja baja del pie de monte y el sector plano, al oriente del río Bogotá, en la Sabana. La ciudad y su área metropolitana ha venido experimentando un crecimiento acelerado, físico y demográfico, desde comienzos de la década de 1950, que ha determinado la aparición de fenómenos sociales y de hechos ambientales sumamente complejos (Preciado Beltrán, 2009). El aumento de las áreas impermeables, producto de las construcciones presentes en las ciudades, y la disminución consecuente de las zonas con vegetación, altera la calidad ambiental por la disminución de servicios ecosistémicos, alteración de flujos ecológicos y afectación de la biodiversidad, entre otros (Romero y Vásquez, 2005). La condición geográfica de ser una planicie de altura en el trópico, atravesada por el sistema hídrico del río Bogotá, con un gran número quebradas y riachuelos que conducen las aguas de nacimientos localizados en la parte alta de los cerros orientales que entregan sus aguas al caudal del río Bogotá, otorgan potencialidades ambientales particularicen estos ríos y quebradas se depositan, históricamente, las lluvias y la mayoría de las aguas residuales, domésticas e industriales, que han surgido como resultado del crecimiento poblacional y desarrollo urbano de Bogotá (Rojas et al., 2008)

Igualmente, Bogotá, enclavada regionalmente en el sector del altiplano Cundiboyacense, es sitio de residencia permanente o temporal de especies de fauna y flora singulares, representantes de la biodiversidad local, regional o nacional, algunas de ellas únicas en el mundo, denominadas genéricamente como endémicas (Zambrano y Triana, 2002).



La biodiversidad y la salud e integridad de los ecosistemas soportan la vida y aportan numerosos servicios ambientales, sobre los cuales se basan los procesos productivos y la calidad de la vida (Van der Hammer y Andrade, 2003). Las cualidades ambientales y ecológicas del altiplano han sido modificadas antrópicamente con la construcción de la infraestructura urbana. La dinámica metropolitana y el comportamiento ciudadano ejercen sobre la naturaleza y sus ecosistemas presiones ambientales que alteran sus condiciones de forma permanente. Esa condición ha modificado la relación entre el territorio urbanizado y las dinámicas bióticas del subsuelo, el suelo y el aire. La modificación de la estructura ecológica del altiplano, transformado ahora en estructura ecológica urbana, ha producido deterioros, bloqueos e interrupciones, en la conectividad ecológica en Bogotá, dando como resultado el deterioro de la calidad ambiental y la consecuente incidencia en la calidad de vida para los habitantes, la fauna y la flora de la ciudad. Por esa razón el presente trabajo busca instrumentos conceptuales que permitan guiar acciones sobre los procesos ambientales urbanos. La aproximación desde las propuestas del *metabolismo urbano*, para la indagación de la conectividad ambiental, nos permite proponer una mirada diferente al problema de la calidad ambiental en la ciudad de Bogotá.

### 1.3 Propósito del proyecto y preguntas de investigación:

El propósito de este documento es mostrar la importancia que tiene el mejorar la conectividad ecológica sobre el ciclo hidrológico al interior de la ciudad de Bogotá. Esto a través de un análisis basado en el concepto de metabolismo urbano. Una mejor conectividad ambiental aportaría a la sustentabilidad de la ciudad.

Abordar la problemática descrita en este trabajo, dentro del estudio de la sostenibilidad urbana, puede aportar al urbanismo como disciplina que aporte a la mejora de las condiciones ambientales de las ciudades., Puede mostrar la pertinencia de los conceptos asociados al metabolismo urbano, como un marco de trabajo útil en el aporte a la sostenibilidad de la ciudad de Bogotá. El estudio del ciclo hidrológico, propio de la ciudad, permite identificar los aumentos en la escorrentía, lo que está asociado al colapso de las áreas permeables asociadas al proceso de urbanización. En el presente trabajo es de interés especial el periodo entre el año 1988 y junio del 2018, debido a la gran disminución en las zonas permeables. La drástica disminución en este tipo de áreas hace que la ciudad sea más propicia a las inundaciones, puesto que los alcantarillados no son capaces de contener el aumento en la escorrentía superficial. Lo anterior muestra uno de los impactos positivos que puede tener el aumento o recepción la estructura ecológica principal para una ciudad.

## 2 OBJETIVOS:

### 2.1 Objetivo general:

Evaluar los cambios en el ciclo hidrológico, producto de la expansión urbana de la ciudad de Bogotá, a través de variables asociadas al metabolismo urbano y su relación con la estructura ecológica principal de la ciudad. Esto como medida de la calidad ambiental urbana.

### 2.2 Objetivos específicos:

**Identificar** algunas variables que describan la calidad ambiental asociadas al concepto de metabolismo urbano y sus variaciones al interior de la ciudad.

**Analizar** una serie de vínculos entre el ciclo hidrológico y la estructura ecológica principal, que permita la conectividad ecológica entre los espacios naturales y seminaturales en la ciudad de Bogotá.

**Evaluar**, desde el punto de vista de la estructura ecológica principal y su relación con el ciclo hidrológico, la calidad ambiental de la ciudad de Bogotá.

### 2.3 Pregunta general:

¿Cómo se determinarían las características morfo funcionales de la EEP de Bogotá más indicadas para evaluar los flujos hidrológicos y la calidad ambiental de la ciudad por medio del metabolismo urbano?

### 2.4 Preguntas específicas:

¿Qué papel puede desempeñar la estructura ecológica principal en el área urbana de Bogotá en los procesos hidrológicos?

¿Qué vínculos se pueden lograr en la conectividad ecológica por medio de la estructura ecológica principal del flujo hidrológico?

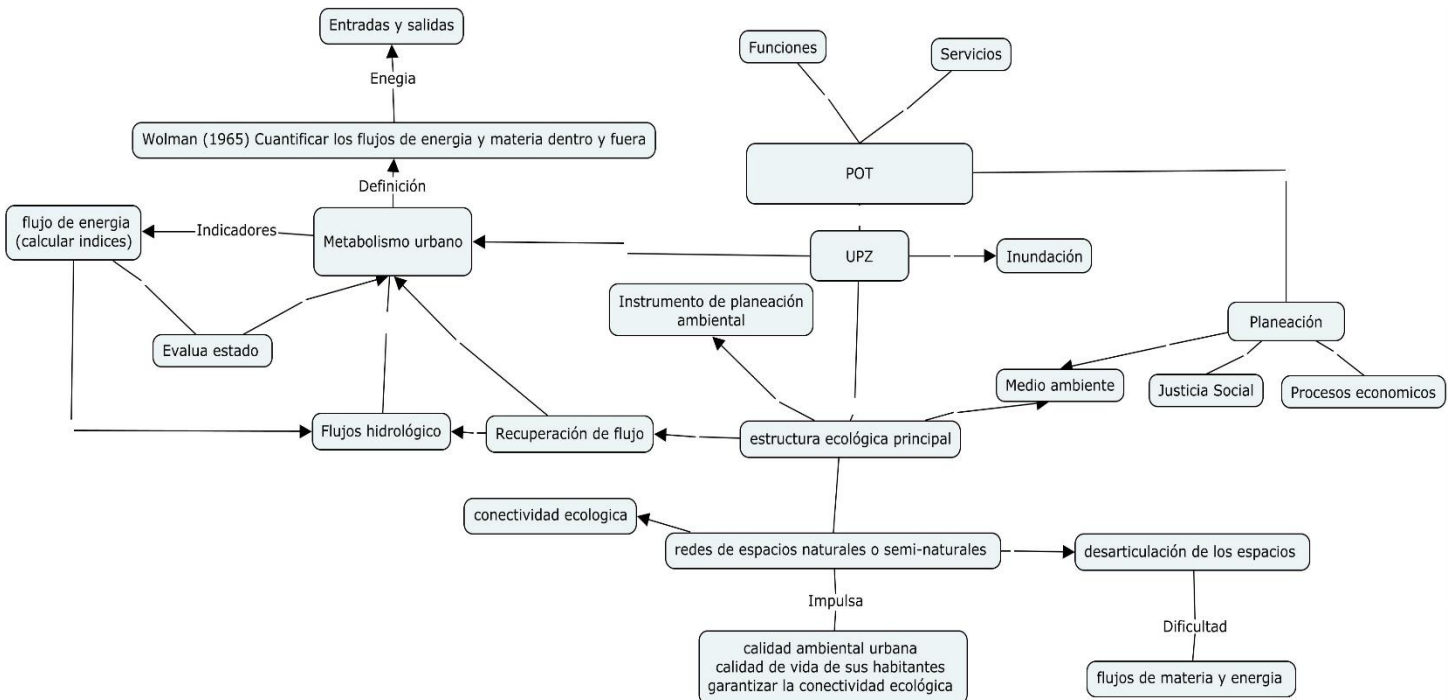
¿Cómo se puede evaluar la calidad ambiental de la EEP y la relación con el ciclo hidrológico?

### 3 MARCO REFERENCIAL

Dentro del marco de referencia se presentan los conceptos con los que se va a trabajar previamente. Estos conceptos serán importantes a la hora de observar los resultados. Por otro lado, se observarán algunos antecedentes dentro del área de estudio y algunos otros en donde se hicieron trabajos similares.

#### 3.1 Marco conceptual

El marco conceptual para el presente trabajo se muestra a través del esquema incluido en la gráfica 1., en donde se muestra los conceptos que se utilizaron en este trabajo.



Gráfica 1. Diagrama conceptual Fuente: Elaboración propia

#### Desarrollo Sostenible

El desarrollo sostenible es un concepto que, según Díaz, et al. (2009), comenzó a definirse a fines de la década de los sesenta del siglo XX (Alaña, Beatriz y Guido, 2016). La sostenibilidad se explica usualmente mediante factores económicos, sociales y ambientales referidos a crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental probablemente por ser más simple hacerlo de esta manera (Dourojeanni, 1999)

Se define como ciudad sostenible a las marcadas tendencias mundiales hacia la urbanización de los asentamientos urbanos y reconocimiento de la ciudad como entidad clave para alcanzar una productividad económica, emprender acciones de tipo ambiental y la cercanía con los sectores poblacionales más pobres (Cárdenas Jirón, 1998).

Gutiérrez (2007), sostiene que la idea de un desarrollo orgánico sostenible inspira la definición de un proyecto de transformación de la organización económica y social actual, es decir, la intervención del Estado y las empresas, de manera que permita concretar en pasos sucesivos las instituciones y nuevas regulaciones (políticas) necesarias para establecer una sustentabilidad más fuerte e integrada.

Los ecosistemas no sólo son una parte integral del proceso de desarrollo de la ciudad, también son cruciales para el desarrollo sostenible de ésta, simplemente porque la ciudad necesita ecosistemas funcionales para la producción de recursos renovables, que son esenciales para la vida humana (Nowak, Dwyer y Childs, 1998).

### **Ecología del paisaje**

La primera definición de ecología del paisaje se debe al geógrafo alemán Carl Troll (1939), que la contempla como una conjunción entre la conceptualización científica del paisaje, heredada de las diferentes escuelas centroeuropeas y rusas de geografía física, y las entonces tendencias emergentes en ciencia de la vegetación y la ecología (P. Herrera y Díaz, 2013). La ecología del paisaje nace en estrecha vinculación con la geografía y vive un desarrollo espectacular a partir de la segunda mitad del siglo XX. El objetivo final es suministrar información útil para la conservación de los valores naturales y culturales (Subirós et al., 2006).

La ecología del paisaje focaliza su atención en tres características: la estructura, la funcionalidad y el cambio (Franklin y Forman, 1987) El elemento base para la interpretación del paisaje es el concepto de mosaico. En el mosaico podemos diferenciar tres grandes tipos de elementos: los fragmentos, los corredores y la matriz (Subirós et al., 2006)

La conectividad puede definirse como el parámetro del paisaje que cuantifica en qué medida las subpoblaciones se encuentran conectadas, y por tanto, cómo funcionan como una unidad, en términos de meta población, o desde una visión más global, cómo es la capacidad del territorio para favorecer flujos de especies o conjuntos de estas en el paisaje (Taylor, Fahrig, Henein y Merriam, 1993).

Los corredores han de facilitar la denominada conectividad, es decir, la capacidad de los organismos para desplazarse entre fragmentos separados de un determinado tipo de hábitat (Subirós et al., 2006)

La superficie de los fragmentos muestra una clara correlación con la diversidad de especies que puede albergar (Subirós et al., 2006). Si estos fragmentos son escasos, pequeños y distantes la diversidad de las especies disminuirá. La reducción de la biodiversidad con el tamaño de la fragmentación se le llama “efecto área”. Aunque existe la posibilidad de que haya una “lectura inversa” en el cual se vea un incremento de la extensión de los fragmentos que facilite el mantenimiento

de poblaciones mayores y más diversas. La ciudad es una variable importante debido a que, dependiendo del desarrollo y los impactos de la misma, estos fragmentos pueden amentar o decrecer. Entre los objetivos de investigación de la ecología del paisaje se encuentra la comprensión de cómo los flujos de materia, energía e información se mueven a través del paisaje, y de qué forma son condicionados por su estructura (P. Herrera y Díaz, 2013).

Entre los procesos ecológicos se encuentran cuatro importantes: el flujo de nutrientes, el flujo de energía, la sucesión ecológica y por supuesto el flujo del agua.

En los flujos de nutrientes se encuentran el ciclo de fósforo, el ciclo de nitrógeno, el ciclo de carbono, estos flujos están relacionados con la precipitación, la evapotranspiración, la composición química de hojarasca, etc.

Los ecosistemas están compuestos por organismos que transforman y transfieren energía y compuestos químicos. Estos ecosistemas se sostienen a partir de la energía que reciben del sol (Soriano, 2001)

Los procesos naturales cambian continuamente los ecosistemas. Los cambios pueden tardar años, o incluso siglos, avanzando tan lentamente que apenas resultan perceptibles. Tienen un patrón sistemático generado por el ensamble comunitario, que sigue una progresión ordenada conocida como sucesión ecológica, otra de las propiedades emergentes de los ecosistemas (Soriano, 2012).

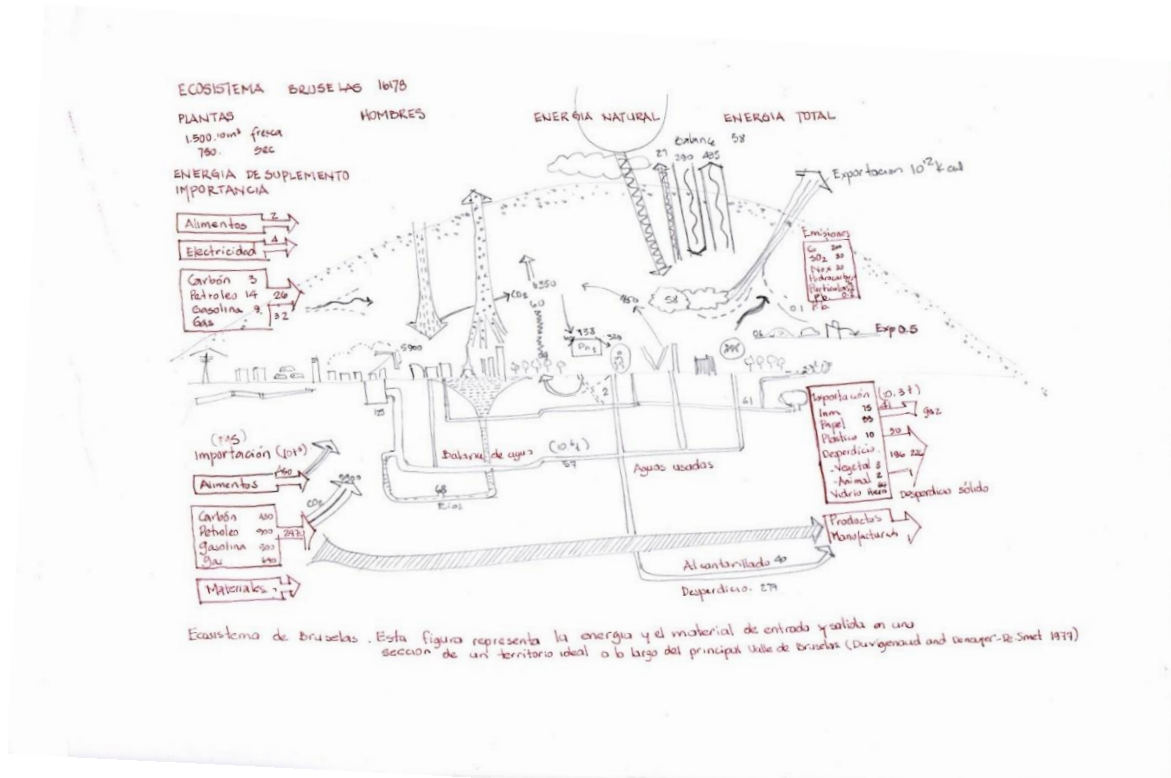


Imagen1. Ciclo del Urbanismo ecológico. Fuente: Elaboración propia. Con base en el artículo From Ecology to Urbanism (Grulois, Tosi y Crosas, 2018)

## Metabolismo urbano

El símil ciudad, sistema natural y organismo, es concebido por Owiti K'Akumu (2007:222) como la "Conceptualización Ecológica de las Ciudades", en la cual los centros urbanos se piensan y analizan como seres vivientes que crecen, logran desarrollo y que, en algún momento, pueden morir (Julián y Álvarez, 2014). El término metabolismo urbano fue utilizado por primera vez por Wolman (1965) en un famoso artículo en *Scientific American* en su ensayo "El metabolismo de las ciudades". Aunque el metabolismo es un concepto puramente biológico, puede ser aplicado por analogía a las ciudades porque el sistema metabólico urbano es también un mecanismo para procesar recursos y producir desechos (Zhang, Yang y Yu, 2009) El concepto de metabolismo urbano está basado en un modelo de flujos materiales de las interrelaciones entre la economía y el medio ambiente. (Daly 1996).

Abel Wolman, en su ensayo " The Metabolism of Cities -", (1965), desarrolló originalmente la teoría moderna del metabolismo urbano cuando comparó el funcionamiento de una ciudad modelo estadounidense con la de los ecosistemas, caracterizada por un flujo interno que alimenta los procesos internos, y por uno externo, constituido por el sumidero de desechos y emisiones en el ambiente circundante, cerrando así el ciclo del metabolismo. Se intentó dar respuesta al porqué de la pérdida de la calidad del agua y el aire en los centros urbanos de Norte América. El metabolismo es una visión utópica tecnológica-orgánica (Eken, s.d.) En la primavera de 2007, el *Journal of Industrial Ecology* dedicó un número especial al impacto global de las ciudades (volumen 11, número 2), que reforzó la importancia de estudiar los flujos de materiales urbanos.

En esta visión, el sistema urbano se describe como una 'caja negra' que consume materia y energía del entorno natural y produce, a su vez, productos en forma de desechos y emisiones. Wolman estableció que, mientras que los ecosistemas naturales son sistemas circulares cerrados, donde las retroalimentaciones negativas potenciales conducen a una homeóstasis sustancial, los sistemas urbanos operan como sistemas abiertos en su lugar, tanto enérgicamente como materialmente (Grimm y Redman, 2004). Años más tarde hubo otra visión por Newman en donde habla de un metabolismo urbano extendido teniendo en cuenta cuatro puntos diferentes que cambian de la idea original:

1. Se expande la cantidad de categorías consideradas en los flujos de Wolman.
2. Introduce un nuevo tipo de producto, constituido por la contribución a la habitabilidad en el área urbana.
3. Considera aquellas dinámicas internas a las áreas urbanas (demografía, economía, planificación, instituciones).

Tiene en cuenta el concepto de desarrollo sostenible haciendo hincapié en las necesidades de las generaciones futuras. El objetivo del metabolismo urbano está

constituido entonces por la reducción de las entradas y salidas totales, de modo que la ciudad (super organismo) pueda hacer frente a la capacidad de carga de los ecosistemas relacionados (Newman, 1999).

Las ciudades ("super organismos urbanos") exhiben procesos metabólicos (Zhang et al., 2009) como se muestra en la imagen 1. Las ciudades podrían describirse como sistemas abiertos altamente dependientes que dependen de su entorno para la provisión de recursos naturales, incluida la energía, y para la eliminación de residuos (Grupo de expertos de la CE sobre el medio ambiente urbano, 1996). El medio urbano se ha definido por la concentración de los medios de producción, de la población, de los recursos financieros, administrativos, políticos y de servicios (A. Ramírez y Sánchez, 2009). En los últimos años, los ecólogos han comenzado a modelar sistemas económicos y ecológicos híbridos, como las ciudades, como si fueran "super- organismos"(Zhang et al., 2009)

Los flujos siempre han estado presentes en las ciudades y de hecho forman parte de su naturaleza (Romera Jiménez Carlos, 2012). Ya sea como lugar de encuentro, de intercambio, de comercio a larga distancia o de control político sobre otros territorios, las ciudades siempre se han construido sobre una serie de flujos y unas redes que los hacían posibles (Romera Jiménez Carlos, 2012). Al interceptar y retener o disminuir el flujo de la precipitación pluvial que llega al suelo, los árboles urbanos (conjuntamente con los suelos) pueden jugar una importante función en los procesos hidrológicos urbanos. Pueden reducir la velocidad y volumen de la escorrentía de una tormenta, los daños por inundaciones, los costos de tratamiento de agua de lluvia y los problemas de calidad de agua (Nowak et al., 1998)

## **Ecología Urbana**

La ecología urbana estudia a las sociedades urbanas desde una perspectiva científica, considerándolas como un todo global interrelacionado. La ecología urbana como ciencia natural, es una disciplina joven que se desarrolló en las últimas tres décadas desde una rama de la biología hacia un campo interdisciplinario de aplicación en la planificación territorial a nivel local o a nivel regional, en la actualidad, las ciudades son vistas como ecosistemas con patrones abióticos y bióticos definidos y con especies características que trascienden la escala local y regional.

Como urbanismo ecológico se entiende, en esta investigación, la propuesta del equilibrio entre la necesidad de construir lugares urbanos y el deber de mantener lugares donde el suelo del altiplano mantenga sus condiciones naturales. Es decir: se busca entender el desarrollo físico y social de la ciudad sin olvidar que la calidad del ambiente es factor fundamental (Beuf, 2012).

Las áreas urbanas son puntos calientes que impulsan el cambio ambiental en múltiples escalas. Las demandas materiales de la producción y el consumo humano alteran el uso y la cobertura del suelo, la biodiversidad y los sistemas de hidro

sistemas de forma local a regional, y la descarga de desechos urbanos afecta los ciclos biogeoquímicos locales y mundiales y clima (Grimm et al., 2008)

El nuevo urbanismo integra los flujos metabólicos minimizando su consumo y su impacto tanto en la edificación como en el espacio público (Rueda, 2011)

El urbanismo ecológico incorpora, en relación al urbanismo actual, nuevos objetivos que obligan a repensar los mecanismos de gestión para alcanzarlos. La realidad demuestra que las empresas eléctricas y los promotores, por ejemplo, no tienen entre sus objetivos hacer autosuficientes los nuevos desarrollos urbanos con energías renovables. Si el uso de las mismas es un objetivo del urbanismo ecológico, necesitaremos buscar la organización adecuada para su gestión. Este ejemplo lo podemos aplicar a cualquiera de los aspectos implicados en los nuevos desarrollos planificados con criterios de sostenibilidad, desde la propia fase de planeamiento (Rueda, 2011).

### **Estructura ecológica principal**

Hacia finales del siglo XX los espacios verdes tomaron relevancia inspirados en la biología de la conservación con la Estructura Ecológica Principal (EEP), concepto original de Bischoff & Jongman (1993) (Andrade, Remolina, Wiesner y Montenegro, 2014)

El POT de Bogotá de 2000 definió la EEP como “Red de espacios y corredores que soportan y conectan la biodiversidad y los procesos ecológicos en el territorio en sus diferentes formas, e intensidades de la ocupación humana, y proveen servicios ambientales para el desarrollo sostenible” Entonces, esta es el conjunto de ecosistemas naturales y semi-naturales que tienen una localización, extensión, conexiones y estado de salud tales que en conjunto garantizan el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medio para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida (Van der Hammer y Andrade, 2003).

La estructura ecológica de una área no sólo está representada por las comunidades vegetales y animales que la habitan, sino, también, por los elementos físico-químicos de los cuales depende la vida de las comunidades existentes en esa área (A. Pérez, 2000). La finalidad de la estructura Ecológica Principal, es la conservación de los recursos naturales, como la biodiversidad, el agua, el aire y en general, del ambiente deseable para el hombre, la fauna y la flora (Barco et al., 2000) Es sobre este sistema natural que se ejerce la acción del hombre, alterando las condiciones del biotopo y/o de la biocenosis (A. Pérez, 2000). La EEP está conformada por tres componentes: Sistema de áreas protegidas distritales, los parques y las áreas de manejo especial.



Estos espacios urbanos, artificiales, diseñados íntegramente por arquitectos, urbanistas o planificadores urbanos, contribuyen activamente en la sostenibilidad de muchas especies de aves, migratorias y residentes (J. Osorio, 2012). Tiene especial significado para el desarrollo de los elementos de sostenibilidad ambiental y eco-urbanismo (Andrade et al., 2014).

La estructura ecológica principal evalúa la calidad ambiental urbana la cual se entiende como un conjunto complejo de factores humanos y ambientales interrelacionados (tipo, densidad y disposición de las construcciones, malla vial, densidad de población, presencia de áreas verdes, calidad del aire y del agua, islas de calor, entre otros) que inciden favorable o desfavorablemente en la vida de los ciudadanos (Nichol y Wong, 2005) .

## **Ordenamiento y planeación**

El espacio público es el receptor del conjunto de actividades urbanas, en él cristalizan las características de la ciudad y en buena medida la definen. La interacción de los elementos urbanos da lugar a un determinado paisaje visual y sonoro, a un marco de intercambio y de convivencia, a un conjunto de usos y funciones, etc. (Rueda, 2011) Puede cumplir distintas funciones en la ciudad, al extremo de que es factible encontrar posiciones extremas y contradictorias que lo conciben como un espacio de aprendizaje (Joseph, Isaac), ámbito de libertad (Habermas) o lugar de control (Foucault). En otras palabras, el espacio público es un ámbito o escenario de la conflictividad social que puede tener una función u otra, dependiendo de los pesos y contrapesos sociales y políticos (Dascal, 2007)

El espacio público no se agota ni está asociado únicamente a lo físico-espacial (plaza o parque), sea de una unidad (un parque) o de un sistema de espacios (Carrion, 1989) El planificador debe conciliar tres intereses en conflicto: "hacer crecer" la economía, distribuir este crecimiento de manera justa y, en el proceso, no degradar el ecosistema. Los tres tipos de prioridades conducen a tres perspectivas sobre la ciudad: el planificador del desarrollo económico ve la ciudad como un lugar donde se producen, consumen, distribuyen e innovan. La ciudad compite con otras ciudades por mercados y nuevas industrias. El espacio es el espacio económico de las autopistas, las áreas de mercado y las zonas de cercanías (Campbell, 1996).

## **Socioeconómico (estratos y ocupación de suelo, uso)**

La economía apareció como disciplinas independientes en el siglo XVIII. La idea del sistema económico se basó sobre la metáfora de la producción y el objetivo del crecimiento (García, 2009). El pensamiento económico ha ido evolucionando junto a la política, la ecología y otras disciplinas afines (Naredo, 2004)

La estratificación socioeconómica es el mecanismo que permite clasificar la población en distintos estratos o grupos de personas que tienen características sociales y económicas similares, a través del examen de las características físicas de sus viviendas, el entorno inmediato y el contexto urbanístico o rural de las mismas (Alcaldía Mayor de Bogotá, s.d.-b). La ciudad de Bogotá se clasificó en seis (6) estratos. La estratificación es una herramienta que se hizo para cobrar los servicios públicos con tarifas diferenciales. De esta manera, quienes tienen más capacidad económica pagan más por los servicios públicos y contribuyen para que los estratos bajos puedan pagar sus facturas.

La función social del suelo está íntimamente ligada con los usos que se le dan a éste, sus formas de acceso y su distribución entre las personas, instituciones públicas y servicios públicos y privados presentes en las ciudades. Las regulaciones para el uso de suelo son un elemento importante del complejo problema de la segregación socio espacial, y en ese sentido, el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano ha identificado temas que deberían ser abordados para enfrentar esta fuente de inequidad social (Consejo Nacional de Desarrollo Urbano, s.d.).

### 3.2 Antecedentes

Con respecto a la percepción del urbanismo ecológico existen estudios realizados, uno de ellos es en la ciudad de Curitiba. La ciudad de Curitiba, con 1,500,000 habitantes, es la capital del estado de Paraná. Paraná, junto con los estados de Santa Catarina y Rio Grande do Sul, ocupa el Región Sur de Brasil (Zannin, Diniz y Barbosa, 2002). En la década de 1960, la falta de una política urbana mejor definida, implicó un crecimiento desordenado, ya que no sólo se perciben problemas en la ciudad de Curitiba, sino también en varias ciudades brasileña (Hayakawa, 2010). Para el inicio del siglo XX el ingeniero francés Alfred Agache desarrolló el proyecto urbano; el cual propone un nuevo diseño, conocido como el Plan Agache, o de las avenidas. Hoy en día esta ciudad es un ejemplo por haberse convertido en una ciudad sostenible y sus habitantes con una conciencia ambiental presente.

Por otro lado, así exista dificultades para obtener datos estadísticos adecuados, se han hecho diferentes estudios del *metabolismo urbano* alrededor del mundo y con diferentes ideas. En la mayoría de los artículos se observa el factor económico muy detallado puesto que estos flujos en el metabolismo urbano ayudan a entender como se está utilizando los productos primarios que se recolectan de los diferentes ecosistemas.

El artículo próximo a exponer trata del metabolismo urbano económico, en donde se habla de los flujos de materia y energía como elementos clave para entender mejor la función que hace un ecosistema uno de ellos; tal como el artículo titulado: "Urban metabolism methodological advances in urban material flow accounting based on the Lisbon case study"; el cual describe una metodología desarrollada para cuantificar los flujos de los bienes urbanos, haciendo posible la compilación de datos pertinentes para la caracterización del metabolismo de una ciudad. Este

método cuantifica los flujos de los bienes urbanos mediante la cuantificación del saldo material de Lisboa para 2004 en la ciudad de Lisboa, Portugal. Las áreas urbanas se caracterizan por una concentración de actividades económicas, una gran población y grandes densidades de existencias de materiales, lo que induce altos niveles de energía y flujos materiales (Niza et al., 2009). Se caracterizaron cuatro variables y se vinculó a los flujos materiales asociados a la ciudad: consumo absoluto de materiales / productos por categoría, el rendimiento de los materiales en el sistema urbano por categoría de materiales, la intensidad del material de las actividades económicas y los flujos de residuos por tecnología de tratamiento (Niza et al., 2009). Como conclusión el MFA puede proporcionar a los tomadores de decisiones una mejor comprensión del funcionamiento de su región o ciudad para que puedan prepararse y reaccionar ante los problemas actuales y futuros de las existencias y flujos de materiales (Niza et al., 2009).

“Green Cities, growing cities just cities” es un artículo que presenta la dificultad de tomar decisiones frente a la protección de los espacios verdes que aun permanecen dentro y fuera de las ciudades. En los próximos años, los planificadores se enfrentarán a decisiones difíciles sobre su posición para proteger la ciudad verde, promover una ciudad que crezca económicamente y defender la justicia social (Campbell, 1996).

Por un lado, se requiere que el desarrollo economía crezca para mejorar y apoyar las necesidades de la sociedad, pero, por otro lado, se necesita del producto primario para que eso pase. El autor del artículo plantea un modelo triangular "triángulo del planificador" en donde está: la sociedad, la economía, la protección del medio ambiente y en el medio del triángulo se encuentra el desarrollo sostenible. Este triángulo se usa para cuestionar si el desarrollo sostenible es un modelo útil para guiar la práctica de planificación. El modelo triangular se usa para cuestionar si el desarrollo sostenible, el objetivo actual de la fascinación de la planificación, es un modelo útil para guiar la práctica de planificación (Campbell, 1996). El autor expresa que los conflictos que se exponen son única y básicamente por preferencias personales.

En otro orden de ideas el autor muestra el objetivo de la planificación como una agenda más amplia en la cual se requiera mantener, simultánea y equilibradamente, estos tres sistemas a veces competitivos, a veces complementarios (lo económico, lo social y lo ambiental). Teniendo estos conceptos es importante ver el otro conecto que el artículo lo muestra como un factor clave: la sostenibilidad. Se podría decir que el desarrollo sostenible es a donde las ciudades quieren llegar. Lastimosamente se habla tanto de este concepto que se ha perdido la definición correcta. El autor, de todos modos, considera que es un concepto importante. “A pesar de las deficiencias en la forma actual. 'desarrollo sostenible, el concepto conserva integridad y un enorme potencial”, aunque añade que necesita, redefinirse y hacerse más preciso. La define como la capacidad a largo plazo de un sistema para reproducirse en donde se aplica tanto en los ecosistemas naturales, como en los sistemas económicos y políticos. Como conclusión se requiere de unos

planificadores en donde estos sean interdisciplinarios y estén familiarizados con la sociedad (equilibrar la equidad social), la economía (el empleo) y el medio ambiente (la protección ambiental). Este artículo acabado de mencionar nos muestra un punto muy importante que está ocurriendo en diferentes ciudades del mundo como Bogotá, Colombia. En donde no se piensa las consecuencias que a un largo tiempo puede causar lo que se haga en un presente. Se requiere una planificación con sus correspondientes conceptos.

The Metabolism of a City: The Case of Hong Kong es otro artículo que hace un llamado de atención al estilo de vida que se está tomando en la ciudad de Hong Kong ya que no es suficiente con solo esa ciudad si se continúa viviendo como las últimas décadas. Los costos de energía para construir y operar estas ciudades en los próximos 25 años equivaldrían a más de cinco veces el consumo mundial de energía. Como conclusión del artículo, los autores consideran que deben desarrollar estrategias de conservación y soluciones alternativas, teniendo en cuenta las relaciones ecológicas entre las variables culturales y físicas en cada entorno.

El libro titulado "ConAccount 2008 Urban metabolism: measuring the ecological city" posee un capítulo llamado "A step forward in the evaluation of urban metabolism: Definition of urban typologies". En este capítulo plantea parte de una investigación de un proyecto llamado INCYDA-EMAU. Este proyecto es parte de la Estrategia Española de Medio Ambiente Urbano (EMAU) el cual trata de contribuir a que los pueblos y ciudades de España se desarrollen hacia escenarios más sostenibles, mejorando la calidad de vida de la ciudadanía. El proyecto INCYDA-EMAU tiene como objetivo el desarrollo de una metodología de análisis por medio del metabolismo urbano en la cual se puedan evaluar la dinámica urbana y la capacidad de respuesta con el fin de identificar los nodos críticos y encontrar su mejor manejo. INCYDA-EMAU aborda la "ecología industrial" y otros temas, como la planificación urbana, las ciencias sociales y el pensamiento sistémico, para abordar el metabolismo urbano (Havránek et al., 2009).

Como hipótesis los autores tienen: Generalmente, diferentes áreas en una ciudad (es decir, distrito periurbano, centro urbano, sitios industriales, etc.) mostrarían un comportamiento diferente con respecto a los patrones de consumo, generación de desechos, contaminantes y capacidad de respuesta, con respecto a las funciones y servicios que brindan (Havránek et al., 2009). Por medio de esta hipótesis los autores se centran en una parte del proyecto INCYDA-EMAU que trata del entendimiento de "Tipologías urbanas". La definición de tipologías urbanas se convierte en la base determinante para el establecimiento de umbrales en la identificación de los impactos críticos de los flujos de energía y materia y también para diseñar acciones estratégicas (Havránek et al., 2009). Este proyecto permitió una mejor comprensión de la dinámica urbana, dibujando una mejor imagen de las realidades urbanas.

Como se dijo anteriormente no es fácil obtener datos estadísticos para estos estudios, pero para la ciudad de Bogotá se hizo un estudio con la temática del metabolismo urbano.

La tesis titula: “Metabolismo de la ciudad de Bogotá D.C.: una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana” de Cristian Julián Díaz Álvarez, habla de la ciudad de Bogotá como un sistema “complejo y dinámico” con procesos metabólicos en donde se observan flujos de materia y energía. Teniendo en cuenta seis momentos históricos el señor Díaz observa cómo va cambiando el metabolismo urbano por medio de los flujos de agua, alimentos, combustible y energía entre los años de 1980 y 2010. Él concluye que ha aumentado durante los últimos años el consumo de la energía y alimentación. Por otro lado, al parecer el consumo del agua no tuvo el mismo resultado ya que se mantuvo constante. Esto es debido a las restricciones que hubo en el año de 1997. Para finalizar Díaz muestra que para el año 2025 se espera que el consumo total y por habitante en todos los elementos se incremente, definiendo condiciones de alta presión sobre la infraestructura urbana y sobre los ecosistemas de soporte, exponiendo a la ciudad a un riesgo de desabastecimiento que puede llevarla a un colapso.

Por otro lado, la ciudad de Bogotá cuenta con un plan de ordenamiento territorial (POT) que se hizo como un instrumento técnico y normativo para ordenar el territorio municipal o distrital. El primer POT que se hizo fue en 1997. Ley 388 de 1997 define al POT como el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas, destinadas a orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo (Congreso de Colombia, 1997) . El POT sirve para orientar y priorizar las inversiones en el territorio tanto del sector público como del sector privado (Cámara de Comercio de Bogotá, s.d.).

Desde 1997, cada doce años se ha ido renovando el POT, para ir mejorando la ciudad poco a poco. Las normas urbanísticas plasmadas en el POT tienen como objetivo lograr una verdadera transformación del territorio bogotano en lo arquitectónico, lo urbanístico y lo estético, con base en una visión de la estructura socioeconómica que le da soporte y sobre todo permitan que la experiencia cotidiana de vivir en Bogotá sea cada vez mejor (Alcaldía Mayor de Bogotá, s.d.-a). En el POT se encuentra distintas variables como las UPZ (Unidades de planeamiento zonal) y la EEP (Estructura Ecológica Principal).

“La Estructura Ecológica Principal en lo local. Propuesta de aplicación en la renovación urbana de Fenicia, Las Aguas, Bogotá” es un artículo donde se propone un modelo de planificación local para la renovación urbana del Fenicia. Como proyecto en este artículo se diseñó espacios verdes de articulación entre el suelo urbano y rural de la Universidad de los Andes. El artículo muestra una importancia histórica de los espacios verdes que se encuentran en el área de estudio; en donde se habla de la época colonial y los espacios abiertos estaban siendo aprovechados como plazas empedradas. Solo hasta el siglo XIX, fue que los espacios libres empezaron a tomar forma de parques como hoy se conocen. Hacia finales del siglo XX los espacios verdes tomaron relevancia inspirados en la biología de la conservación con la Estructura Ecológica Principal (EEP) (Bischoff y Jongman, 1993). El POT de Bogotá de 2000 definió la EEP como “Red de espacios y corredores que soportan y conectan la biodiversidad y los procesos ecológicos en el territorio en sus diferentes formas, e intensidades de la ocupación humana, y proveen servicios ambientales para el desarrollo sostenible (Andrade et al., 2014)

Desde el inicio, en el ámbito urbano la EEP fue un concepto híbrido de la biología de la conservación y el urbanismo, con objetivos en ocasiones divergentes entre conservación y uso del espacio público (Andrade et al., 2014) Dentro de la EEP, se observan diferentes elementos que el artículo considera importantes tales como Reserva forestal de los Cerros Orientales de Bogotá, Parque urbano, Arbolado urbano en vías y antejardines y Especies vegetales que están presentes en el estudio. Hacen un análisis para ver como se encuentra el área de estudio y como podrían llegar a mejorarlo puesto que es una zona donde se encuentra un ecotono de los cerros orientales y la urbanización de la ciudad de Bogotá.

Como conclusión los autores proponen la EEP en su área de estudio (el plan parcial de Fenicia) en la que presentan una propuesta para generar suelo urbanizable manteniendo la calidad de vida que realce el potencial de las áreas verdes urbanas para así obtener más espacios verdes en la ciudad.

## 4 ÁREA DE ESTUDIO

Hace 200 millones de años el territorio del altiplano Cundiboyacense, estaba cubierto de agua y durante un tiempo largo se fue desecando para dejarnos como parte del testimonio de su pasado telúrico, extensos humedales y una tierra negra y fértil (...) (J. Ramírez, Mejía y Niño, 2017).

La ciudad de Bogotá está ubicada sobre la cordillera oriental de los Andes colombianos, en el altiplano cundiboyacense (Galvis et al., 2013). Localizada en una meseta en las estribaciones de los cerros orientales y la extensión oriental de la sabana cerca de los páramos circundantes de Sumapaz y Chingaza. La ciudad corre de sur a norte al costado de los cerros orientales, cerca de los cuales se encuentran las zonas más prósperas.

Bogotá constituye un amplio territorio puesto que tiene un área total de 163.574 hectáreas compuesto por 19 localidades, con cerca de 40.00 has. urbanizadas, que rodean a la ciudad de Bogotá (Preciado Beltrán, 2009) y una localidad que es estrictamente rural, Sumapaz. Estas 19 localidades son Usaquén, Chapinero, Santa Fe, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Rafael Uribe Uribe y Ciudad Bolívar Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Fusagasugá, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Sopó, Sibate, Soacha, Tabio, Tenjo, Tocancipá, Ubaté y Zipaquirá. Los municipios circundantes reúnen un conjunto apreciable de lugares de interés ecológico, arqueológico, urbanístico y arquitectónico (Arango, Niño, Ramírez y Saldarriaga, 2012)

La población de Bogotá, según la proyección de la población del DANE (consulta hecha el 03/03/2018), es de 8.181.047. Bogotá cuenta con, población de que se aloja en 2.017.320 viviendas, conformando 2.202.849 hogares (Alcaldía Mayor de Bogotá, s.d.-b) .Bogotá es ante todo una ciudad universitaria con alta capacidad de producción industrial y alto movimiento comercial. Es el principal centro urbano, económico, social y cultural del país, que con el paso de los años se ha constituido como la “ciudad de todos”. (Rojas et al., 2008).

La altitud promedio de Bogotá es de 2600 metros sobre el nivel del mar, localizada en la zona tropical, próxima a la línea ecuatorial. Debido a estas condiciones Bogotá mantiene un clima fresco. La temperatura promedio es de 14 C°, sin embargo, en los días soleados, Bogotá puede llegar a una temperatura de 23 C°, en las madrugadas al inicio del año puede bajar a -2 C°.

La ciudad presenta una humedad cercana al 80%, aunque no se experimenta un clima húmedo. Los intervalos entre épocas de lluvias y épocas secas cubren todo el año ya que se encuentra dentro de la zona de confluencia intertropical, la cual origina un comportamiento bimodal: dos épocas de lluvia bien marcadas durante el primer semestre del año, en marzo, abril y mayo, y en el segundo semestre en septiembre, octubre y noviembre. Los meses más secos del año son enero, febrero y diciembre (Rojas et al., 2008). El sistema de vientos predominante en la ciudad

muestra corrientes que ingresan por el oriente y el suroriente y que se dirigen al norte y al noroccidente («Secretaría Distrital de Planeación - Alcaldía Mayor de Bogotá», s.d.) Los vientos predominantes recorren de los llanos orientales hacia el occidente.

La ciudad de Bogotá tiene unas áreas protegidas distritales, parques metropolitanos y urbanos y área de Manejo Especial. El POT dice que la EEP, está compuesta por estas áreas acabadas de nombrar.

La finalidad de la EEP, es la conservación y recuperación de los recursos naturales, como la biodiversidad, el agua, el aire, y en general, del ambiente deseable para el hombre, la fauna y la flora. Por esta razón actúa como base territorial fundamental en función de la cual se organiza los sistemas urbanos y rurales (Barco et al., 2000).

El ecosistema en el altiplano se diversifica en variedades zonales que se expresan en el interior mismo de la ciudad y sus contornos. Parte de esta diversificación ecosistémica son los humedales, que cumplen una apreciable variedad de funciones ecológicas, ambientales, hídricas y aún sociales; los cerros, con similar importancia, en cuyas cúspides más elevadas se asientan los páramos; todos los componentes del sistema hídrico de la sabana incluidos ríos, quebradas y canales urbanos, los cuales hacen parte integral de la cuenca hidrográfica del río Bogotá; los ecosistemas secos del altiplano, entre los que se encuentra el suroccidente de la ciudad y los escasos fragmentos boscosos que sobreviven en la planicie (Zambrano y Triana, 2002).

La morfología de este altiplano tiene como frontera, por el oriente, los cerros de Monserrate (3.152 m.s.n.m.) y Guadalupe (3.260 msnm) que determinan en gran parte las características hídricas de esta área y han jugado favorablemente en la conformación de la red hidrográfica de la ciudad (D. F. Pérez y Zamora, 2015).

El sistema hídrico de Bogotá está constituido por las cuencas media del río Bogotá y alta del río Sumapaz, ambas afluentes del río Magdalena, y la cuenca alta del río Blanco, tributario del río Orinoco (Rojas et al., 2008).

El río Bogotá recorre la sabana, tangente al sector occidental del Distrito Capital, en su cuenca media a lo largo del costado del área urbana de la ciudad. Esta cuenca está conformada por múltiples cauces y canales de drenaje, provenientes de los cerros orientales. En esta cuenca media se identifican las siguientes subcuencas en el perímetro urbano de Bogotá: los ríos Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo (D. F. Pérez y Zamora, 2015)

La cuenca del río Bogotá se ha constituido tradicionalmente en la línea medianera entre el conjunto construido de la ciudad capital y el conjunto occidental de los municipios sabaneros. Es un límite permeable que ha posibilitado el vínculo entre las vías de comunicación de la ciudad y los asentamientos urbanos localizados en el sector occidental de la sabana. Ese sector, mayoritariamente de baja pendiente, tiene a su vez el sistema de canales y cuerpos de agua que conforman el complemento del sistema hídrico que afecta la ciudad de Bogotá.

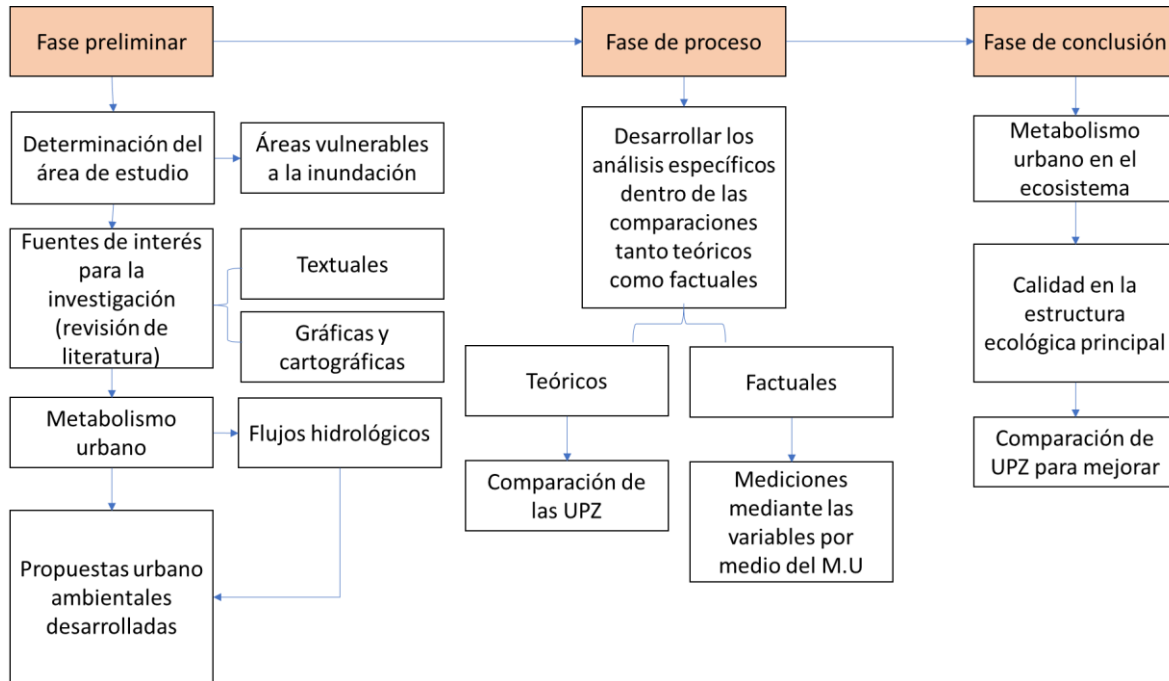


El sistema hidrográfico de Bogotá está formado por las cuencas de los ríos Salitre o Juan Amarillo, Fucha y Tunjuelo, las cuales drenan el agua de más del 90 % del área urbanizada actual (D. F. Pérez y Zamora, 2015).

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Diagrama de Flujo

En este diagrama se observan las fases que se requirió para hacer este artículo. Desde la recolección de datos hasta los análisis de estos.



Gráfica 2. Esquema metodológico: Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2, se observa las etapas con las que se logró hacer este trabajo. En la fase preliminar se determinó el estudio y en donde se hizo el mismo, teniendo presente la información necesaria. Por lo cual se buscó literatura con base a los objetivos planteados. Para la fase de proceso se tuvo presente lo teórico y lo factual y para la fase de conclusión se hizo el análisis de los resultados.

### 5.2 Diseño del estudio

Este trabajo comenzó, como un planteamiento teórico, con información secundaria sobre el concepto del metabolismo urbano teniendo en cuenta la ciudad como super organismo y la estructura ecológica principal como factor clave. La EEP es parte esencial del plan de ordenamiento territorial del distrito especial de Bogotá (ley 388 de 1997) conocida también como Ley de desarrollo territorial.

El metabolismo urbano, tomado como una herramienta teórica para este artículo, fue crucial para analizar los flujos presentes en el área urbana de Bogotá. Como toda ciudad, Bogotá tiene flujos metabólicos que son de suma importancia para encontrar un balance hacia lo sostenible. Entre los flujos de materia y energía que se encuentran dentro la ciudad está el flujo de agua. Una de las consecuencias que tiene la urbanización es la alteración del ciclo hidrológico que, al construir la ciudad, se afecta principalmente en infiltración natural del suelo. La disminución en la capacidad de infiltración genera un aumento en la escorrentía. Es así como entre mayor sea la impermeabilidad mayor es la probabilidad de que se presente fenómenos de inundación asociados a ciertos eventos extremos.

Este trabajo incluye, en su análisis, factores como el comportamiento de la expansión urbana, el balance hídrico y, toma a su vez, variables urbanas, las cuales se analizan a partir de las Unidades de Planeamiento Zonal. Las unidades de planeamiento zonales (UPZ) son áreas urbanas que tienen la función de servir de unidades territoriales o sectores para planificar el desarrollo urbano en el nivel zonal. Con estas se desarrollan normas urbanísticas (Alcaldía Mayor de Bogotá, s.d.-b). Las UPZ se distribuyen en las 19 localidades que conforman el área urbana de Bogotá. Se utilizaron las UPZ puesto que son las que dividen la ciudad en una escala intermedia, menor al área de una localidad, pero mayor que un barrio; por cada UPZ existe publicada una cartilla en donde se puede observar diferentes propósitos que, en cada caso, debería tener. En las cartillas se presentan los componentes de la EEP en una escala mayor, determinando con mayor detalle cada uno de sus componentes. Esto permite observar cuales de las 112 UPZ son las que están más afectadas o son vulnerables al impacto urbano, teniendo presente los flujos hidrológicos.

Distribución y crecimiento del área de expansión urbana: Para efectos metodológicos se propuso dividir el área de la ciudad en dos categorías, en función de su grado de permeabilidad, áreas compuestas por infraestructuras construidas (área urbana) y áreas con algún grado de cobertura natural (área verde). Para poder dividir el área en estas dos categorías, inicialmente se intentó hacerlo usando una ortofoto mapa de Bogotá del año 2014, el cual es de altísima resolución. Sin embargo, el grado de detalle y la falta de una banda infrarroja generó enormes dificultades a la hora de la clasificación. Por tanto se decidió utilizar imágenes satelitales LANDSAT 7 y 8.

Las imágenes se obtuvieron del “United States Geological Survey (USGS)”. Se seleccionaron 5 imágenes de los siguientes años: 1988, 1995, 2002, 2014 y 2018. Se intentó establecer rangos de 7 años, aunque, debido a que se encontraron daños en algunas de las imágenes del LANSAT 7, se decidió utilizar un rango mayor, de 12 años, entre el año 2002 y el año 2014.

Para estas cinco imágenes satelitales inicialmente se consideró calcular el índice de vegetación en diferencia normalizada (NDVI) por medio del software ENVI. Este índice de vegetación sirve para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Al obtener los resultados del índice por cada año, se analizó cada uno

de ellos y se encontró que al utilizar los rangos de clasificación que se encontraba en la literatura, los márgenes de error eran muy altos.

Ya que no era pertinente utilizar el NDVI, se empleó el método de clasificación de estimación de máxima verosimilitud (MLE). Este es un método de clasificación supervisada, el cual implica seleccionar píxeles de muestra que son utilizados para la realización de la clasificación estadística.

Para realizar el muestreo visual se creó una imagen en falso color con las bandas 5,4,3 (R,G,B) en Landsat 7, y 6,5,4 en Landsat 8. Después por cada imagen se hizo un muestreo de las áreas construidas (impermeables) y las áreas verdes (permeables). Es importante aclarar que la cobertura a la que se le llamo verde, puede tener cualquier otra cobertura que se considere permeable no verde. Anteriormente se había elegido tres coberturas (urbano, agua y verde) pero debido al error tan amplio que arrojaba en la cobertura del agua, se tomó la decisión de omitir esta y solo quedarse con las coberturas restantes. Al terminar con el muestreo para las imágenes de cada año se hizo la estimación de máxima verosimilitud. Para estimar el margen de error se seleccionaron polígonos de cada una de las categorías (urbano y verde) a partir de una imagen de alta resolución del año 2018 para luego estimar cuantos píxeles fueron clasificados erróneamente. Los polígonos seleccionados corresponden al 1% del área total de la ciudad. Se parte del supuesto que las áreas verdes existentes en el 2018 se han mantenido en el tiempo.

Balace hídrico: Se parte del concepto de balance hídrico para estimar la precipitación efectiva y la escorrentía superficial, a partir de los datos de precipitación y temperaturas diarias para un conjunto de 8 estaciones meteorológicas (Chow, Maidment y Mays, 1994). Se utilizaron aquellos años que tuvieran los datos completos. Con los datos obtenidos de la precipitación y la temperatura se realizó la estimación de la evapotranspiración usando el método de Thornwaite (ídem).

A partir de los datos de cada estación se hizo una interpolación con una herramienta de ArcGIS llamada *spline*, mediante la cuál se obtuvieron tres coberturas: precipitación, temperatura, ETP. El paso a seguir fue utilizar la herramienta de *zonal statistics as table* para obtener los datos medios de la precipitación, la temperatura y la ETP por cada una de las UPZ.

La evapotranspiración potencial (ETP) según el método propuesto por Thornthwaite se basa en determinar la evapotranspiración a través de la temperatura media en función de la duración atmosférica del día y el número de meses por año.

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

I: índice de calor anual      t: temperatura media

Al obtener el índice de calor anual se prosiguió a calcular (a)

$$a = (675 * 10^{-9})I^3 - (7.71 * 10^{-7})I^2 + (1.792 * 10^{-5})I + 0.49239$$

a: parámetro que se calcula, en función de I según la expresión

$$ETP_{\text{sin corr.}} = 16 \left( \frac{10 * t}{I} \right)^a$$

ETP: Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración se calculó en el software de ArcGIS con la herramienta *raster calculator*. Después se utilizó la herramienta de ArcGIS: *zonal statistics as table* para obtener la media de la ETP.

Una vez obtenido el dato de la evapotranspiración se calcula la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva es aquella fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas, en donde tiene presente el tipo de suelo y la cobertura. Para obtener la precipitación efectiva se utilizó el método del servicio de conservación de suelos (SCS) (Chow et al., 1994), con el cual se pudo determinar la cantidad de agua que va por escorrentía y la cantidad de agua que es absorbida por el suelo. Este método permite calcular la abstracción de un evento de precipitación. En el artículo se asume tanto la precipitación efectiva como las escorrentías.

Ya que el estudio inicial fue hecho para los Estados Unidos, en Colombia, la Universidad de los Andes desarrolló un estudio con la finalidad de, ajustar los parámetros en la clasificación de clases del (AMC) para la atracción de lluvias de este método (SCS). Se tuvo presente, al hacer este estudio los meses en donde llovía más que en otros.

Teniendo la formula inicial de este modelo:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde  $P_e$ : precipitación efectiva

$S$ : retención potencial máxima

$P_e$ : Exceso de precipitación o escorrentía directa

$P$ : profundidad de precipitación

$I_a$ : abstracción inicial antes del encharcamiento

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

CN: número de curva

El número de curva es un parámetro que trata de relacionar la precipitación en función del comportamiento del suelo y de la cobertura.

Para el número de curvas de escorrentía, para el número uno de suelo, se tomó el grupo hidrológico del suelo D. Este grupo lo conforman los suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, son arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos (Chow et al., 1994). Es importante aclarar que  $S$  está en función al CN, condicionado por las humedades antecedentes.

Para obtener  $I_a$  se utilizó la siguiente fórmula:

$$I_a = 0.2S$$

Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curvas CN, tal que  $0 \leq CN \leq 100$ . Para superficies impermeables y superficies de agua  $CN=100$ ; para superficies naturales  $CN < 100$  (Chow et al., 1994) De todos modos el  $I_a$  se tomó como una condición inicial.

Por último teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

En esta se aplican las condiciones antecedentes de la humedad (AMC) las normales (AMC II). Para condiciones secas (AMC I) y para condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Estas fórmulas permiten calcular el coeficiente de infiltración. La infiltración afecta el tipo de suelo y la cobertura. En este trabajo, como ya se dijo anteriormente, solo se trabajó con dos coberturas: áreas con vegetación y urbano.

Para las áreas de vegetación se utilizó la tabla de “*descripción del uso de la tierra*” en donde se empleó el grupo de: áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. Teniendo en cuenta que las condiciones óptimas tenían que ser áreas las cuales deberían de estar cubiertas de pasto en el 75% o más. Sin embargo, las condiciones aceptables en este estudio fueron las áreas cubiertas de pasto entre un 50 a 77%.

Para finalizar se obtuvo el SCS mediante el procesamiento de los datos para la precipitación efectiva, por cada mes, en cada estación, se utilizó *raster calculator* para obtener los datos de la precipitación efectiva anual para después restarlo con la capa de ETP por cada año. Habiendo terminado este paso se prosiguió utilizando la herramienta *zonal statistics as a table* para procesar la capa de la UPZ con los datos procesados.

UPZ variables: La información de las variables por UPZ se organizaron de acuerdo a dos de las tres estructuras de la estrategia de ordenamiento propuesto. Dentro de estas dos estructuras se eligieron las variables morfo funcionales utilizadas: Estructura ecológica principal (EEP) y estructura socioeconómica y espacial (ESE). Estas variables se eligieron gracias a las cartillas de unidades de planeamiento zonal (UPZ) proporcionadas por el POT (Plan de Ordenamiento Territorial). Es importante aclarar que estas variables morfo funcionales se utilizaron únicamente en las áreas urbanas de Bogotá.

Se valoraron estas UPZ por medio de las siguientes variables: EEP (Estructura ecológica principal): Zonas verdes actuales, ríos, canales, humedales, áreas de inundación, suelo de protección. ESE (Estructura socio económica y espacial): estratificación, áreas por desarrollar. Es importante aclarar que la variable de ESE es un apoyo para entender mejor los datos que salen de las variables de la EEP.

Se utilizó el software *ArcGIS* para poder intersectar las áreas UPZ con las variables que se eligieron, primero haciendo una fusión de las capas con la herramienta *merge* y luego mediante la herramienta de *intesect* se intersectaron las variables con la capa de UPZ.

### 5.3 Métodos de Recolección de datos

Los datos de las variables de las UPZ se obtuvieron en diferentes páginas: Unidad especial de Catastro y la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá, Sistema de

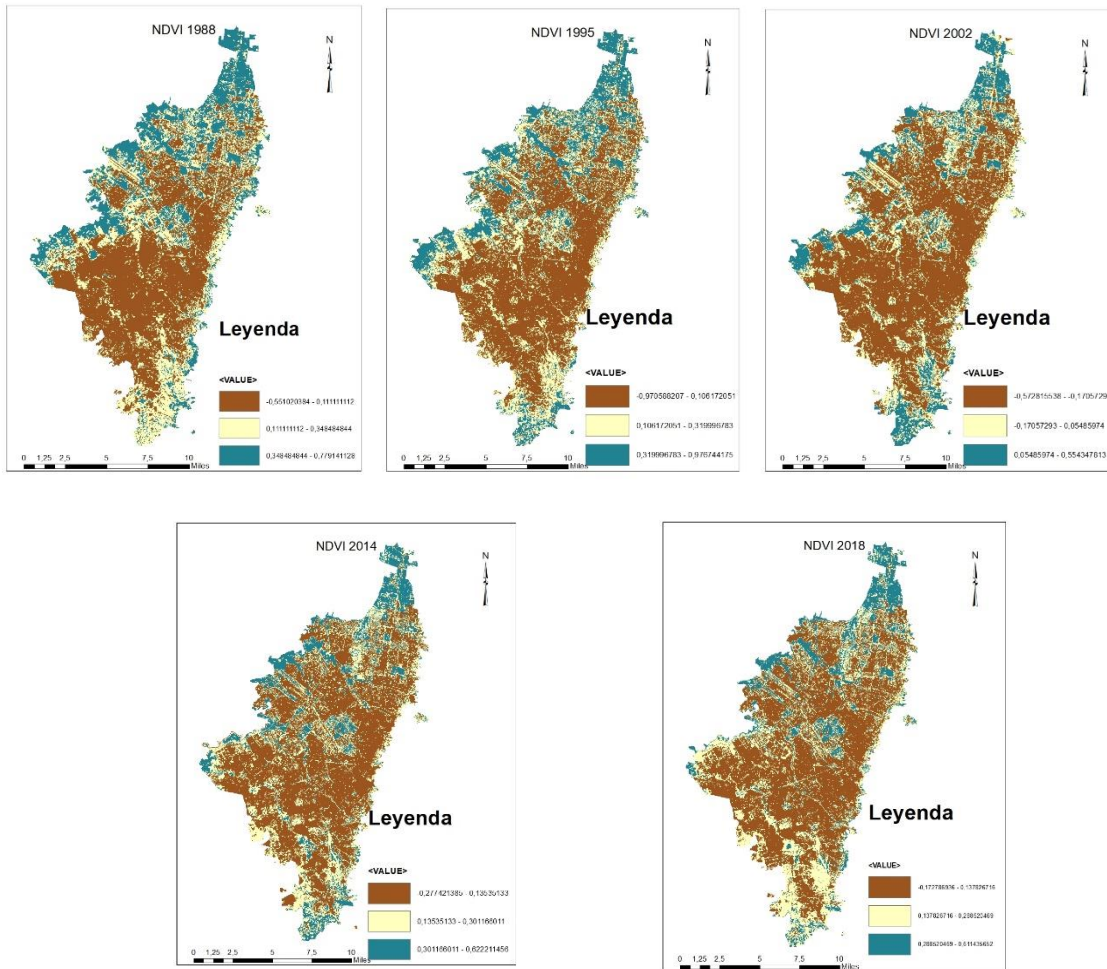
Información para la Gestión del Riego y Cambio Climático, Sistema de Información Ambiental de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi por medio del Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial. Al tener las variables necesarias se montaron en un software (ArcGIS). De este modo fue posible superponerlas e intersectarlas con la capa de UPZ.

Los datos diarios de precipitación y de temperatura disponibles desde 1970 fueron obtenidos en IDEAM.



## 6 RESULTADOS

En el comportamiento de la expansión urbana utilizando el NDVI se obtuvieron 1 plano por cada año (1988, 1995, 2002, 2014, 2018).

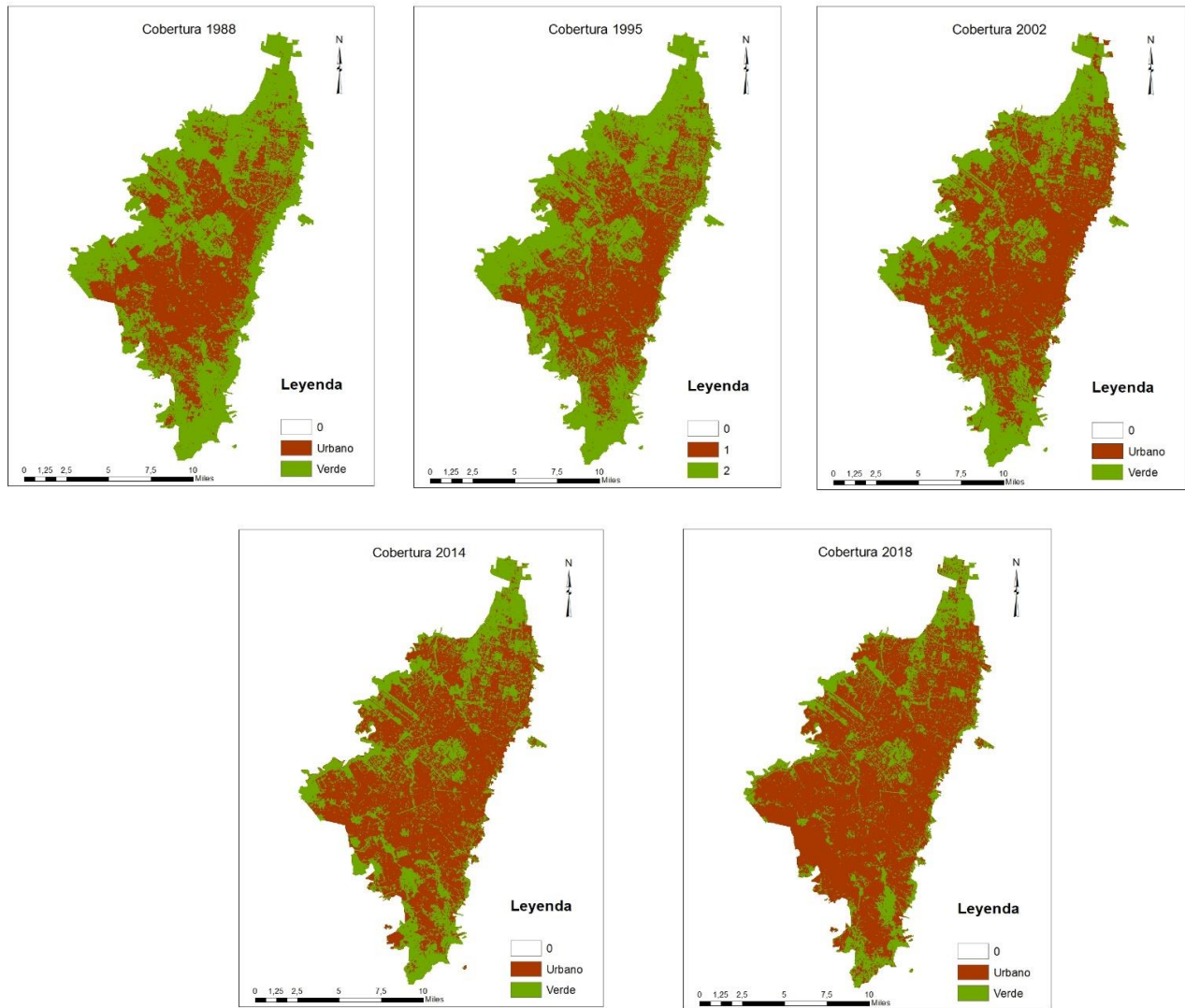


Gráfica 3. Cobertura por método NDVI. 1988, 1995, 2002, 2014 y 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de las imágenes LANSAT

Año	Error Urbano	Error Verde
1988	14%	35%
1995	3%	22%
2002	0%	7%
2014	16%	27%
2018	4%	17%

*Tabla1. Análisis del error de coberturas urbana y verde entre 1988 y 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de las imágenes LANSAT*

Al observar estos los resultados por el método del NDVI en la gráfica 3 se optó por cambiar el método para observar el crecimiento y distribución de la expansión urbana. El método que se utilizó para calcularlo fue el de máxima verosimilitud. Utilizando el programa ENVI se obtuvo los planos siguientes:



*Gráfica 4. Cobertura por método máxima verosimilitud años 1988, 1995,2002,2014 y 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de las imágenes LANSAT*

Adquiriendo los planos con el método de máxima verosimilitud grafica 4, se utilizó la capa de las UPZ para poder saber cuánta área por cada una de estas hay en área verde y área urbana. Teniendo estos datos se pueden obtener los porcentajes totales por cada año. Como se puede ver en la tabla 2, hay un aumento de área urbana y una disminución en el área verde con el paso de los años. En 1988 el área urbana era menor, con un 42% mientras que el área verde era de un 58%, ya para

el 2018 había aumentado a un 72% en el área urbana y reducción del área verde de un 28%.

Año	urbano	verde
1988	42%	58%
1995	43%	57%
2002	58%	42%
2014	62%	38%
2018	72%	28%

*Tabla 2. Análisis de coberturas urbana y verde entre 1988 y 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de las imágenes LANSAT*

Con los estos porcentajes se obtuvo las áreas para poder hacer un shape de polígonos para el margen de error. Esto se obtuvo teniendo el área total de la ciudad de Bogotá multiplicándolo por el 1% para obtener el error como se ve en la tabla 3, finalmente se tomo los porcentajes ya obtenidos y el cálculo acabado de mencionar para obtener por cada cobertura el área a la cual se le iba a sacar la muestra de error. Se decidió tomar por cada cobertura tres polígonos. Para la cobertura urbana se hizo tres polígonos con un área de 80,5491 ha por cada uno para lograr tener un área de 241,6473 ha y para la cobertura verde tres polígonos; cada uno de 57,0561 ha para lograr tender un área de 171,1683ha. Con ayuda del ortofoto mapa de Bogotá de 2014 se pudo hacer el shape de polígonos que contuvieran los 6 polígonos necesarios.

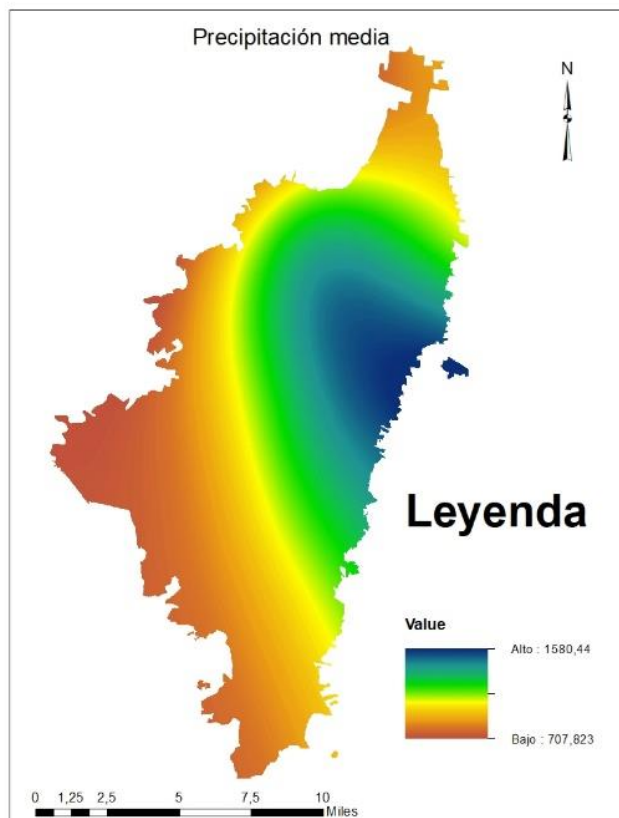
Año	Error Urbana	Error Verde
1988	3%	1%
1995	2%	2%
2002	1%	6%
2014	23%	1%
2018	1%	12%

*Tabla 3. Análisis del error de coberturas urbana y verde entre 1988 y 2018. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de las imágenes LANSAT*

Teniendo los datos de la expansión urbana de la ciudad de Bogotá en los años trabajados se empezó a analizar el balance hídrico, teniendo en cuenta la precipitación la ETP y escorrentía el almacenamiento de agua en el suelo. En primera instancia se utilizaron los datos de la precipitación y temperatura utilizando las 7 estaciones en donde se obtuvo estos resultados haciendo la interpolación. Las estaciones que se utilizaron fueron 21205790 la cual se ubica en el aeropuerto el

dorado , 21206260 esta se encuentra en el norte de la ciudad a la altura de la calle 221 con carrera 55 dentro de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, 21206600 ubicada paralelamente a la avenida la conejera llegando al colegio Celestin Freinet , 21206620 ubicada en la calle 43 sur con carrera 88 g dentro del Colegio Distrital Hernando Durán Dussan, 21206630 ubicada en la carrera 103b con calle 152 , 21201230 ubicada en la avenida suba con calle 117, y 21206660 ubicada en el parque el tunal.

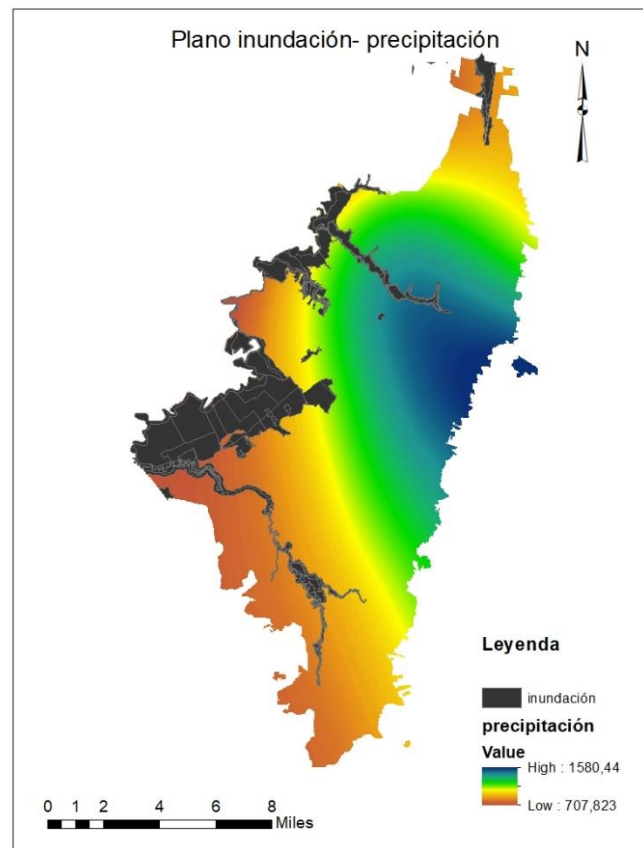
Al hacer una interpolación de los puntos en donde estaban ubicadas las estaciones se puede observar el comportamiento de la precipitación en la ciudad de Bogotá como se puede ver el en siguiente plano (grafica 5).



*Gráfica 5. Precipitación. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de IDEAM 2018*

En estos planos obtenidos se puede observar la ubicación de los cerros orientales los cuales se encuentran al lado derecho de este, al tiempo que se puede apreciar como el lado demarcado de azul representa el más alto valor de la precipitación media y de temperatura. Obteniendo los datos se puede saber que la precipitación media.

Se aprecia que la precipitación más alta se percibe en los cerros orientales con una dirección hacia el noroccidente. Se puede distinguir, por otro lado, que una gran parte del sur tiene la precipitación más baja en donde anualmente puede alcanzar una precipitación de 707 mm. Sin embargo, esta zona con poca precipitación es donde se encuentra las áreas con riesgo de inundación.



*Gráfica 6. Datos de Precipitación e inundaciones Fuente Precipitación IDEAM 2018: Inundaciones POT Plano inundaciones amenaza media POT 2014*

En el plano de inundación- precipitación (grafica 6), se muestra como es que en las áreas planas cerca al rio de Bogotá es donde hay más inundación. Esto ocurre ya que la escorrentía aumenta drásticamente debido a las zonas impermeables que se van construyendo por toda la ciudad.

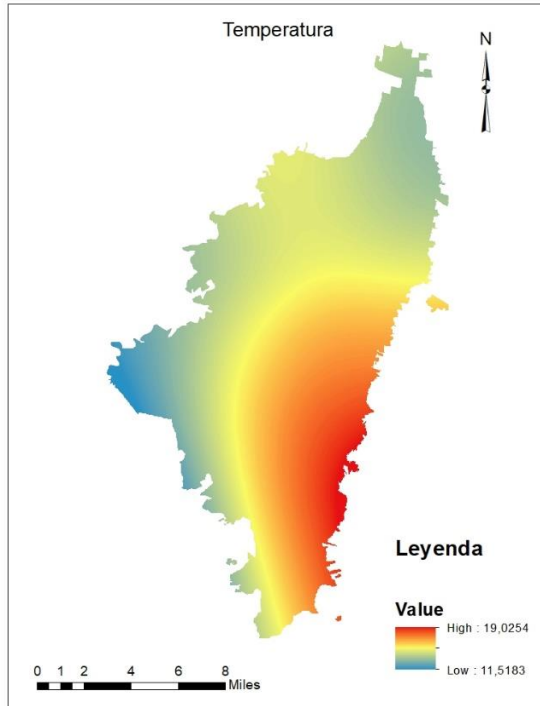
Con los datos obtenidos se pudo observar la precipitación media por cada mes. Los meses de abril, mayo, octubre y noviembre fueron los que más precipitación



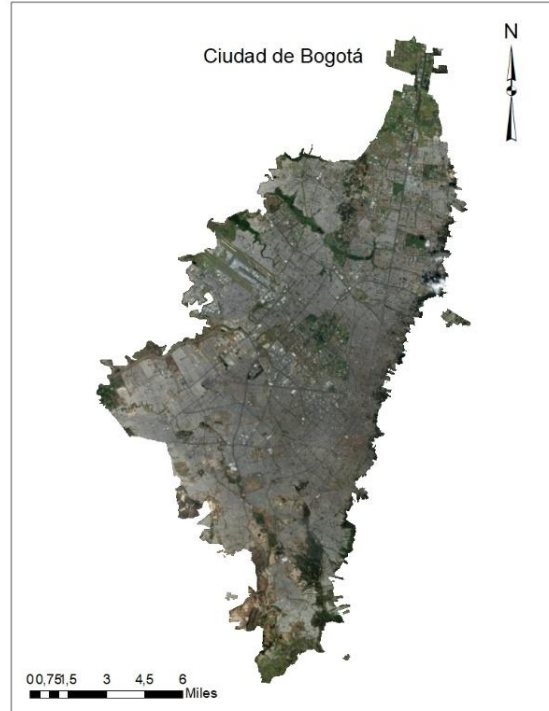
presentar, mientras que los meses de julio y agosto son los meses más secos del año.

Para la temperatura también se utilizaron estas estaciones y se elaboró la interpolación para obtener el siguiente mapa en donde nos muestra la conducta de esta. Como se ve en la gráfica 7a, la temperatura media más alta es de 19 grados mientras que la temperatura más baja es de 11 grados. Claro está que la ciudad de Bogotá, puede llegar a tener una temperatura de hasta los 23 grados y la más baja que -2 grados, aunque esto es poco común. Este plano muestra como es el comportamiento de la temperatura con respecto a la densidad de la urbanización, teniendo presente las islas de calor urbano (ICU). Por consiguiente, se puede ver una relación directa entre la temperatura y la urbanización (gráfica 7b) .

a



b



*Gráfica7-a. Temperatura. Elaboración propia a partir de los datos de IDEAM 2018*

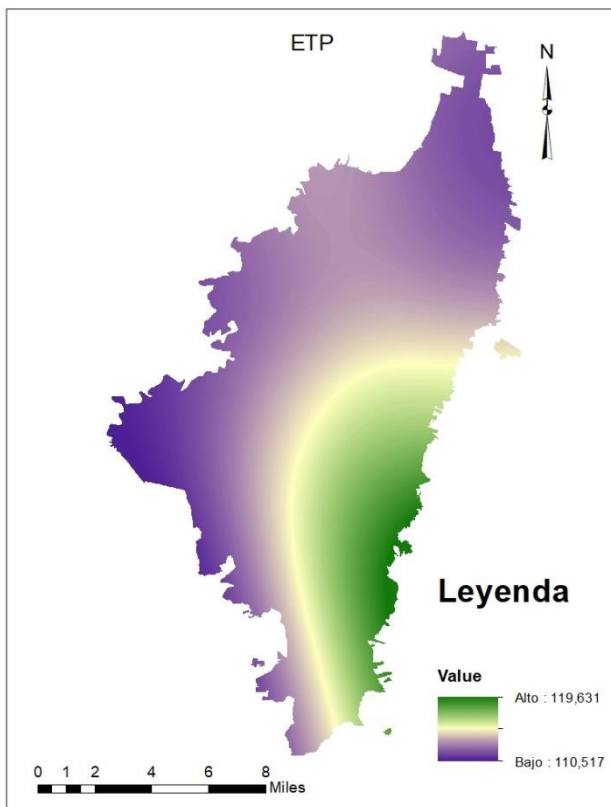
*Gráfica7-b. Ciudad de Bogotá. Fuente: Basemap 2018*

Por otro lado, las áreas con mayor densidad urbana se encuentran en donde la temperatura se concentra más, debido a la poca ETP que se percibe en las áreas impermeables, por este motivo la temperatura también. Por consiguiente se puede apreciar una relación directa entre la temperatura y la ETP. Dado que la ETP es la

cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera por medio de la transpiración de las plantas se puede observar en el plano que la zona sur central colindante con los cerros orientales de Bogotá, tiene más ETP debido a la cantidad de vegetación que existe allí.

Dentro de esa área se encuentra el “parque entre nubes” y el sistema de parques metropolitanos que incluyen, en su sector occidental, el conjunto del parque del Simón Bolívar y el sector de la Universidad Nacional. Sin embargo, la zona que aparece en color morado, es donde no se encuentra mayor presencia de vegetación, lo que implica poca evapotranspiración. Uno de los factores importantes a precisar es la incidencia de las corrientes de aire, vientos, que provienen del sector de los Llanos Orientales, por esta razón la temperatura y la ETP se ven afectas por esta condición climatológica.

Es importante tener presente que, en el sector donde se presenta la mayor cantidad de ETP (gráfica 8), es donde, según las gráficas, se encuentra la temperatura mas alta. Esto podría corresponder a la relación entre la temperatura y la ETP debido a la condensación que se localiza en esta zona.



*Gráfica8. ETP. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del IDEAM 2018*



Analizado los resultados de las anteriores variables se pudo obtener la variable de precipitación efectiva. Esta se calculó a partir del área de la cobertura verde y la cobertura urbana, tres CN (número de curva ) medido por la cantidad de humedad que se encuentra en el mes teniendo presente que abril, mayo, octubre y noviembre se midieron como los meses con mayor precipitación.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de los 5 días anteriores (mm)				
	Mes seco	Mes húmedo	NCI	NC	NCIII
I	Menor que 1.0	Menor que 5.0	82,8473413	92	96,3570128
	1.0-2.0	5.0-15.0	62,6865672	80	90,1960784
II	Sobre 2.0	Sobre 15.0	S-NCI	S-NC	S-NCIII
			2,07039337	0,86956522	0,37807183
III			5,95238095	2,5	1,08695652

Estos datos obtuvieron la precipitación efectiva (PE) por cada UPZ por medio de la suma del área verde mas el área el área por UPZ menos el ETP.

En el año de 1988, la PE era de 267.390 metros cúbicos por año, teniendo presente que las UPZ en donde se observa que las PE se encontraban en la UPZ de Niza con un valor de 4.898 metros cúbicos por año. En 1995 no hubo mayor cambio 267.876 para la UPZ de Niza, la cual siguió siendo la mas afectada por la PE.

Para el año del 2002 la PE había aumentado: 302.151 metros cúbicos por año; la UPZ el Rincon paso a ser la UPZ con mayor PE para este año teniendo un valor de 5.484 seguido por la UPZ de Bosa Central 5.415. En el 2014 la PE estaba en 276.204 donde la UPZ con mayor PE era la UPZ de Niza 4.995.

Para el año 2018 se encontró una precipitación efectiva 280.729 de metros cúbicos por año, contándolo solo hasta febrero de este año. La UPZ donde se encuentra la mayor PE es la de Niza con 5.106, seguida por la de Bosa central 5.056.

Dentro de la ciudad de Bogotá el 60% de los ríos, se encuentran en las UPZ de: Paseo de los Libertadores, La Gloria, Los Libertadores, Gran Yomasa y Lucero, mientras que el 24% de las cuencas de la muestra se encuentran en el Río Bogotá y el 76% en el Río Tunjuelito. El 70% de las sub-cuencas se encuentran en el Río Tunjuelito, el 20% en Torca y el 10% entre Río Bogotá y Quebrada Yomasa.

El 28% de las micro cuencas se encuentran en la Quebrada Chiguaza, el 20% en Torca, el 26% en la Quebrada Hoya del Ramo y Quebrada Yerbabuena, y el 26%

restante en las Quebradas de Salitrosa, Yomasa, Hoya del Ramo, Yerbabuena, Mochuelo, Limas, El Infierno y Zanón de la Estrella. La mayoría de estos cuerpos de agua exceptuando las sub-cuencas de los ríos Tunjuelo, Juan Amarillo y Fucha, están canalizadas lo que implica un flujo del caudal más rápido.

A partir del análisis de los canales que se encuentran dentro del área urbana de la ciudad de Bogotá se pudo constatar que el 40% de los canales se encuentran en las UPZ de Tintal Sur, Niza y El Mochuelo, mientras que el 60% se encuentran en Venecia, El Porvenir, Timiza, Tintal Norte, Modelia, Capellania, Aeropuerto el Dorado, Fontibón y Garces Navas. El 27% de las cuencas de la muestra se encuentran en el Río Tunjuelito y 73% en el Río Bogotá. El 80% de las sub-cuencas de la muestra se encuentran en el Río Tunjuelito, Tintal y Río Fucha, mientras que el 20% se concentra en el Río Salitre y Jaboque. El 66.7% de las micro cuencas se encuentran en el Canal de Cundinamarca, el Río Tunjuelito y Capellania, mientras que el restante 33.3% se concentra en el Canal de Capellania, San Antonio, Niza y Río Salitre.

La ciudad tiene 16 humedales reconocidos y 17 humedales no reconocidos, esto sin contar los que están en parques, clubes o cementerios.

El 25% de los humedales se encuentran en las UPZ de Tibabuyes y Castilla, mientras que el 75% se concentra en las demás; teniendo en cuenta que la localidad de Kennedy (25%) y Suba (43,7%) cuentan con la mayor concentración de humedales en la muestra. En promedio, la mayor área por metro cuadrado por UPZ son Engativa, El Rincón y Tibabuyes. Sin embargo, la mayor área en metros cuadrados por localidad es Engativa y Suba.

Nombre UPZ	Nombre Humedal	Area m2
PASEO DE LOS LIBERTADORES	Humedal Torca	244972,25
BOSA CENTRAL	Humedal Tibanica	177381,72
CASTILLA	Humedal El Burro	116224,55
CASTILLA	Humedal de Techo	92554,74
CALANDAIMA	Humedal El Burro	34893,31
CORABASTOS	Humedal La Vaca	46462,47
FONTIBON	Humedal Capellania	212612,63
BOYACA REAL	Humedal Santa Maria del Lago	85013,58
ENGATIVA	Humedal Jaboque	1163567,24
EL PRADO	Humedal Cordoba	23629,45
LA ACADEMIA	Humedal Guaymaral	347971,6
NIZA	Humedal Cordoba	261205,93
SUBA	Humedal La Conejera	246434,27
EL RINCON	Humedal Juan Amarillo	503123,23
TIBABUYES	Humedal La Conejera	331778,65
TIBABUYES	Humedal Juan Amarillo	1063741,27

*Tabla 2. Humedales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos del IDEAM 2014*

El 47.6% del área urbana con áreas protegidas se encuentran en las UPZ de Paseo de los Libertadores, Castilla, Niza, Suba y Tibabuyes, mientras que el 52.4% se concentra en las demás; teniendo en cuenta que la localidad de Suba tiene la mayor concentración de áreas protegidas con un 38.1%. En promedio, la mayor área por metro cuadrado de áreas protegidas por UPZ son Engativá, Tibabuyes y el Rincón. Así mismo, la mayor área en metros cuadrados de áreas protegidas por localidad se localiza en la UPZ Engativá y Suba. Respecto al tipo de área protegida, el 81% de las UPZ pertenecen a Parque Ecológico Distrital de Humedal, 9.5% pertenece a Parque Ecológico Distrital de Montaña y 9,5% en área Forestal Distrital.

Tipo	Frecuencia	%	UPZ
Área Forestal Distrital	2	9,5	NIZA Y SUBA
Parque Ecológico Distrital de Humedal	17	81,0	PASEO DE LOS LIBERTADORES, BOSA CENTRAL, TINTAL SUR, CASTILLA, CALANDAIMA, CORABASTOS, CAPELLANIA, BOYACA REAL, BOLIVIA, ENGATIVA, LA ACADEMIA, NIZA, SUBA, EL RINCON, TIBABUYES
Parque Ecológico Distrital de Monaña	2	9,5	PARQUE ENTRENUBES

*Tabla 3. Áreas de protección por UPZ*

El 29.2% de los Parques Urbanos se encuentran en las UPZ de Gran Yomasa, Comuneros, Parque Entrenubes, Castilla, Calandaima, Corabastos, Gran Britalia, y Patio Bonito específicamente localizados en las localidades de Usme y Kennedy, mientras que el 7.8% se concentra en las demás. En promedio, la mayor área por metro cuadrado por UPZ pertenece al Parque Entrenubes en la UPZ Venecia. Así mismo, la mayor área en metros cuadrados de área protegida por localidad esta en Tunjuelito, Usme y Bosa. •Respecto al tipo de Parque Urbano, el 85% de las UPZ cuentan con Parques Zonales y el 14.6% al Parque Metropolitano.

El 42.9% de los Zona de Manejo y Preservación Ambiental (MPA) se encuentran en las UPZ de Tintal Norte, Calandaima, Patio Bonito, Bolivia, Guaymaral, Monte Blanco, Lucero y Paseo de los Libertadores. específicamente localizados en las localidades de Engativa, Suba, Ciudad Bolívar y Kennedy, mientras que el 57.1% se concentra en las demás. En promedio, la mayor parte de la zona de manejo y preservación ambiental se localizan en las UPZ El Porvenir, Tintal Sur, Garces Navas y Engativa, y en mayor extensión corresponden a las localidades de Engativa y Bosa.

## 4. DISCUSIÓN

En la discusión de este trabajo se contrasta la condición contemporánea de la ciudad de Bogotá, desde la perspectiva de la planeación urbana del territorio, y el análisis de las dinámicas de los flujos que caracterizan la aproximación analítica a partir de las propuestas del metabolismo urbano.

Se hablará históricamente de los flujos hidrológicos, en donde se tendrá una idea de la aparición de los alcantarillados los cuales son fundamentales en cualquier ciudad. Después se presentará en crecimiento urbano por diversas causas, una de ellas es debido al desarrollo del POT en el 2002; sin tener en cuenta el flujo hidrológico. A continuación, se presenta en caso de las inundaciones en la ciudad de Bogotá debido a la poca importancia que se le dio al flujo hidrológico, seguido por la importancia de la temperatura. Por último, se habla del análisis de las imágenes.

Nos enfrentamos hoy en día a un mundo globalizado donde todo lo que ocurre, de una u otra forma, está mediado por lo urbano. En el que prevalece un paradigma económico, que genera desigualdades socioeconómicas y desequilibrios ecológicos, que amenazan con destruir los elementos fundamentales para la vida de los seres humanos (Osorio G, 2011). Las ciudades pueden considerarse como sistemas complejos debido, entre otros, a su tamaño, estructura social, sistema económico, entorno geopolítico y la evolución de la tecnología (Bai, 2007). Son sistemas abiertos, que dependen del mundo externo para proporcionar materias primas y asimilar los desechos para mantener sus funciones (Niza et al., 2009).

Las economías industriales dependen en gran medida de los recursos naturales para satisfacer las necesidades sociales básicas y facilitar las mejoras en los niveles de vida (Havránek et al., 2009). Para promover el manejo sostenible del flujo de materiales en una región urbana, es vital comprender el metabolismo de la región, y esto requiere un conocimiento detallado de los principales flujos de material. (Niza et al., 2009). Los esfuerzos para comprender y cuantificar los flujos de recursos han llevado al desarrollo de diferentes conceptos, enfoques y técnicas de modelado, influenciados en parte por diferentes trasfondos conceptuales (por ejemplo, análisis de flujo de materiales (MFA), espacio ambiental, huella ecológica, huella hídrica etc.) (Havránek et al., 2009)

Es así como una de las mejores formas de abordar la sostenibilidad de una ciudad, de una región o de un país, consiste en analizarla de manera análoga a como se haría con un organismo vivo. Es así como es posible caracterizar su metabolismo viéndolo como un sistema complejo que, para mantener sus funciones vitales, consume materia y energía y, después de hacerlo, acumula materiales y descarga residuos de varias maneras, creando con frecuencia impactos ambientales (Niza et al., 2009).

En el caso de estudio, la ciudad de Bogotá, hasta la década de 1920, mantuvo la forma de la ciudad colonial, compacta y sin grandes cambios morfológicos, a pesar

de haberse vuelto más densa durante el siglo XIX, debido al inicio del proceso de crecimiento urbano (Beuf, 2012). Ya para 1988 la ciudad, desde la planeación, tenía un manejo diferente, aunque todavía los temas centrales tuvieran que ver con el urbanismo, se centraban básicamente con el suministro de vivienda y servicios públicos.

Se empezaron a hacer proyectos de planeamiento urbano de la municipalidad con el acompañamiento de organizaciones no gubernamentales y las cooperaciones internacionales. El ejemplo más emblemático de este tipo de proyectos fue Ciudad Bolívar cuyo plan, aprobado en 1983 y apoyado por el Banco Interamericano de Desarrollo, se propuso legalizar masivamente los terrenos invadidos, urbanizar lotes con servicios, equipar los barrios (carreteras, suministro de agua) y crear la localidad 19 del Distrito de Bogotá (Beuf, 2012). Fue de este modo, como la ciudad de Bogotá se regularizó en tanto se expandía. En el 2002 ya se encontraba construido el alcantarillado: en la cuenca del Salitre se encontraban tres alcantarillados, uno pluvial, otro sanitario y otro compartido. En la cuenca del Tunjuelo se encontraba un alcantarillado sanitario, uno de aguas negras y de lluvia y otro de agua pluvial. Para la cuenca del Tintal se encontraban cuatro acueductos, dos de estos eran sanitarios, y los otros de agua pluvial; esta cuenca también tenía colector de agua de lluvias. La cuenca del Jaboque tenía, para ese año, un alcantarillado pluvial y el alcantarillado sanitario. La cuenca de Torca poseía un alcantarillado pluvial, uno sanitario y otro compartido. Para el río Bogotá había toda una obra de mitigación de inundaciones, ya que como se pudo ver en los resultados del presente trabajo, la zona en donde se encuentra la mayor amenaza de inundación es una franja alargada, paralela al río Bogotá (Esta franja aún se evidencia en el sector próximo a la Caro, donde hace poco tiempo se produjeron fuertes inundaciones que afectaron instituciones y conjuntos construidos recientemente). Es evidente que al tener tantas áreas impermeables el exceso de precipitación, o precipitación efectiva, la cual no puede retenerse en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo, hace que el agua lluvia se convierta en escorrentía. Horton (1933) describió el flujo superficial de la siguiente manera: “la escorrentía superficial es aquella parte de lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración” (Chow et al., 1994)

La periodización planteada en el estudio sirve como referencia para precisar las fechas de la expansión de la ciudad. Del año 88 al 95 no hubo cambios radicales significativos; aumento solo un 1% del crecimiento urbano y por consiguiente una disminución del 1% en las áreas verdes.

Para el 2002, se formuló el primer POT en donde al parecer hizo que la ciudad aumentara su crecimiento a un 15% más de lo que se venía viendo. Dentro del POT no solo estaba las normas urbanas para construir la ciudad, también se planteo tener una estructura ecología principal que conectara los cerros orientales con el río Bogotá. Cabe mencionar que, aunque se haya planteado la EEP, esta no fue tomada en cuenta. Del 2002 al 2014 la ciudad creció un 4% más y ya para el 2018 la ciudad tiene una cobertura del 72% urbana y un 28% de cobertura verde.

El urbanismo en su búsqueda de alternativas para el desarrollo de las ciudades, ha encontrado en el desarrollo sostenible una solución al deterioro ambiental de las grandes metrópolis y la pérdida de la calidad de vida en las mismas. De acuerdo con Hendriks y colegas (2000), esta gestión debe incluir, en términos estratégicos la tarea de cuantificar los flujos de materias y el crecimiento de las existencias de materiales, evaluar las consecuencias de los flujos y la acumulación de existencias en varios niveles, a saber, ambientales, económicos y sociales y controlar y acortar los flujos de material (concretamente a través de estrategias de desmaterialización, cierre de ciclos de materiales y sustitución de materiales y fuentes de energía) y considerando objetivos de desarrollo sostenible (Niza et al., 2009)

En el documento se ha resaltado la importancia del agua como elemento fundamental para la sostenibilidad de las áreas urbanas (Thériault y Laroche, 2009). Sin embargo, la planeación de la ciudad no ha tenido en cuenta el ciclo hidrológico al interior de la ciudad. Variables como la precipitación, la escorrentía, infiltración y evapotranspiración, habitualmente no son determinantes principales a tener en cuenta en los modelos y planes de desarrollo urbanos.

Para el caso de la ciudad de Bogotá, se observó una precipitación media entre 1000mm y 707mm anual. Estos resultados demuestran que Bogotá es una ciudad en donde llueve mucho, sea en las épocas más lluviosas tanto como en las más secas. En 1920 se realizó la construcción del primer alcantarillado para una zona húmeda en Bogotá. En 1927 se constituyó la Comisión Municipal de Aguas como ente encargado de buscar soluciones al abastecimiento de agua de la ciudad (J. A. Osorio, 2008). Para ese entonces (la segunda y tercera décadas del siglo XX) ya se empezó a tener la idea de entubar las corrientes, canalizar los ríos, que se encontraban en la superficie urbana de Bogotá. En términos de flujos, se atenuó la relación tradicional de la ciudadanía con la presencia evidente de los caudales de agua transportados por ríos y quebradas desde las faldas de los cerros orientales, en la red de afluentes que alimentaban, después de atravesar la ciudad, el caudal del río Bogotá.

En 1949 dos de los problemas más críticos y recurrentes, paralelamente al del río Tunjuelo, fueron la urbanización ilícita y desorganizada, y por el otro, las inundaciones, como efecto del proceso de desarrollo desordenado de la ciudad. La desproporción entre la demanda de agua y la exigua oferta, entre 1950 y 1960, exigieron nuevas fuentes de abastecimiento, desplazando el protagonismo que inicialmente tuvo el río Tunjuelo.

El efecto de la urbanización es el incremento en el potencial de inundaciones en pequeñas cuencas urbanas. Este efecto incrementa el volumen de escorrentía y aumenta los caudales. Esto indujo a que hubiese los primeros trabajos de hidrología.

El incremento de las zonas impermeables, como los parqueaderos, las calles, los lugares techados, reducen la cantidad de infiltración haciendo que el volumen de agua superficial aumente. La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en

la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cobertura vegetal (Chow et al., 1994).

El pavimento y los edificios caracterizan la ciudad, en la cual la velocidad del viento es disminuida (con incremento en el impacto del viento), la temperatura y la precipitación son elevadas, la humedad es reducida y el sombreado es común en muchos "cañones" que forman las calles. Las condiciones de crecimiento también pueden ser difíciles debido a los usos recreacionales (Nowak et al., 1998).

La localización de la ciudad, recostada sobre el pie de monte de los cerros orientales, su expansión hacia el occidente de la sabana y la afectación de las corrientes de viento procedentes del sector de los llanos orientales, produce fenómenos de diferencias de presión que incrementan los niveles de ETP, lo mismo que ocurre con la temperatura.

La temperatura es una variable que ha venido cambiando a través de los años. El planeta en su conjunto viene experimentando durante los últimos años un proceso de calentamiento, cuya principal causa señala a la acumulación de los gases de invernadero en la atmósfera (Angel et al., 2010). La temperatura en 1998 era de 13.0 grados promedio anual, hoy en día se puede observar que la temperatura promedio es de 15.0 grados en promedio. Esto puede tener varias razones. Aunque es importante tener en cuenta que la ciudad es una isla de calor, y entre mas aumente su densidad la concentración de temperatura aumentara. Las islas de calor o islas térmicas urbanas, se refieren al gradiente térmico que se observa entre los espacios urbanos densamente ocupados y construidos y la periferia rural o periurbana (Córdova Sáez, 2011). De otro lado, ha sido ampliamente documentado el hecho de la existencia de islas térmicas al interior de las ciudades producto, principalmente, del cambio de suelos cubiertos por vegetación por otros de índole urbana como asfalto, concreto, ladrillos, etc (Angel et al., 2010). Se ha encontrado que la parte interna de la ciudad exhibe una temperatura aproximada de 3 grados C superior a la de la periferia como resultado de la presencia de construcciones e interacciones urbano-urbano en la primera, frente a interacciones urbano-rurales y un mayor componente vegetal en la segunda. Se evidencia entonces la presencia de una isla de calor que se expande no sólo por el centro de la ciudad, sino que ha alcanzado el norte y el occidente de la misma (Angel et al., 2010).

La urbanización influye directamente en el ciclo hidrológico y los caudales en el paisaje urbano mediante un mayor uso del agua, contaminación del agua, superficies impermeables, patrones de escorrentía alterados y tasas de evapotranspiración modificadas (Pickett et al., 2011)

En diferentes publicaciones se enfatiza la importancia de mantener áreas verdes con sus respectivos componentes; uno de estos artículos muestra que los árboles urbanos pueden mitigar muchos de los impactos ambientales del desarrollo urbano: ellos atemperan el clima; conservan la energía, disminuyen la concentración del bióxido de carbono y retienen agua; mejoran la calidad del aire; disminuyen la escorrentía pluvial y las inundaciones; reducen los niveles de ruido, y suministran el hábitat para la fauna silvestre (Nowak et al., 1998). En este libro se presenta un capítulo titulado "los beneficios y costos del enverdecimiento urbano" en donde se

muestra que son importantes las áreas verdes por razones tales como las que se acaba de citar. No obstante también se puede tener problemas provocados por los mismos árboles, tales como la producción de polen, emisiones de compuestos orgánicos volátiles que contribuyen a la formación de ozono, generación de basura y alto consumo de agua (Nowak et al., 1998).

La vegetación es un parámetro importante en la calidad ambiental urbana por muchas razones, que incluyen consideraciones estéticas, control de temperatura debido a la evapotranspiración y el sombreado, el filtrado y el reciclaje de contaminantes y como hábitats de vida silvestre urbana (Nichol y Wong, 2005) En áreas pavimentadas sin vegetación, la evapotranspiración puede ser cero, por lo que la mayoría de la radiación entrante se transfiere a la atmósfera urbana en forma de calor. En parques y áreas con pastos de riego como el hipódromo de Hong Kong, donde la pérdida de calor latente puede exceder la radiación entrante neta, el resultado es un marcado efecto de enfriamiento (Nichol y Wong, 2005).

En Bogotá el POT del 2002 se planteo un programa para el plan de desarrollo por medio de la estructura ecológica principal. Este programa pretendía fortalecer la gestión en recuperación, conservación y crecimiento de la estructura ecológica principal y del sistema distrital de espacio público por medio de la ampliación de la oferta de espacio público natural y construido, adecuadamente arborizado y con cuerpos de agua de buena calidad, al tiempo que una vigilancia especial a los cerros orientales (Maldonado, 2001).

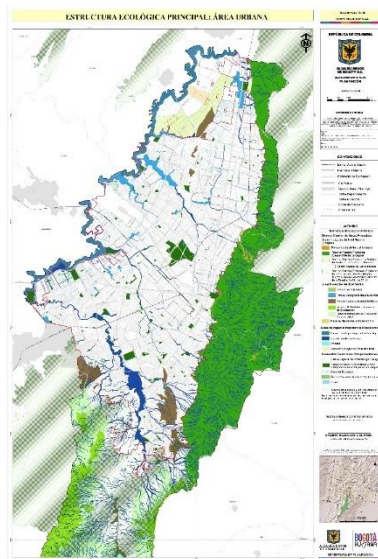
La ciudad de Bogotá posee numerosas áreas verdes y más de 4000 parques distritales (sin contar los privados), que según la teoría de la ecología del paisaje de Forman y Godron (1986), pueden ser considerados como parches de vegetación, ya sean naturales o creados por el hombre, que difieren tanto en estructura como en composición de su matriz urbana dominante (Berget, 2007). En esta ciudad se cuenta con una amplia diversidad de avifauna que permanecen todo el año o aves migratorias gracias a las riquezas que ofrece la sabana de Bogotá. Se observa en los espacios naturales y semi-naturales especies de aves migratorias neotropicales, ya que se generan rutas migratorias utilizadas por las aves que anidan en Norteamérica, y que durante su migración usan la ciudad como lugar de paso o estadía (J. Osorio, 2012). Es interesante este artículo Aves migratorias neotropicales en parques y jardines de Bogotá: 1945 – 2005 y otro artículo titulado: Efecto del tamaño y de cobertura vegetación de parques urbanos en la riqueza y diversidad de la avifauna de Bogotá, Colombia, ya que podemos asegurar que, si es necesario estas áreas verdes, no solo para el aprovechamiento de los seres humanos sino para otras especies que también requieren de estos espacios. Por otro lado, otro artículo: Efecto del tamaño y de la cobertura vegetal de parques urbanos en la riqueza y diversidad de la avifauna de Bogotá, Colombia, investigó cómo ciertas características de parques (tamaño, distancia a cerros, cobertura y diversidad vegetal) afectan la diversidad de la avifauna de éstos (Berget, s.d.).

Al no tener en cuenta la valoración e importancia de los espacios verdes, se va construyendo, incluso en zonas donde está la estructura ecológica principal.



Es importante tener presente que el crecimiento de la superficie que ocupan la ciudad tiene una estrecha relación con el aumento de las poblaciones que albergan (L. Herrera, Pecht y Urbano, 1976). Por lo tanto, si la población crece a un ritmo exorbitante la construcción en la ciudad también tendrá que hacerlo y, sin un planteamiento anticipado de la expansión de la ciudad, los ciudadanos se asentaran en las zonas que ellos consideren disponible. Estos lugares pueden llegar a estar localizados dentro de las rondas de río, o humedales; en zonas de protección; en suelos degradados para recuperación morfológica etc, al hacer esto la población se expone a los riesgos y, en términos ambientales, se afecta el suelo debido a que esas áreas colaboran en el equilibrio del ciclo hidrológico.

El análisis de las imágenes satelitales, en los periodos establecidos, muestran resultados ambiguos. Es así como al comparar la propuesta de la EEP con las condiciones de la temperatura o la ETP, se supone, debería existir una relación ambientalmente determinada. Eso es, que en la imagen resultante del análisis debería hacerse evidente la secuencia de los elementos que conforman la EEP. No obstante, al superponer el esquema de la EEP sobre las imágenes resultantes solo se aprecian coincidencias generales. Por esa razón, si damos por hecho la aceptación de la calidad de los resultados en la lectura de las imágenes satelitales, podemos concluir que la EEP es tan solo una propuesta teórica, cimentada en las huellas históricas de cuerpos hídricos que, con las afectaciones causadas por el crecimiento de la construcción de la ciudad, ha generado desarticulación, discontinuidades, de los elementos considerados partes componentes del sistema. En ese caso, el aporte de este trabajo de investigación sería la indicación de la necesidad de recuperar, desde la planeación, en la medida de lo posible, el vínculo entre los elementos componentes de la EEP. En términos generales, sería hacer el tránsito entre la propuesta teórica académica de la EEP y el ajuste posible de la realidad ambiental fundamental para el desarrollo equilibrado entre las áreas construidas y la secuencia de áreas verdes en Bogotá.



*Imagen 2. Estructura ecológica principal*

Desde otra perspectiva, asumiendo que la lectura interpretativa de las imágenes satelitales aún no es suficiente, será necesario revisar la calidad de la información y de las imágenes como documentos básicos de análisis, y a partir de las precisiones logradas, ajustar el proceso de lectura e interpretación, brindando la posibilidad de obtener información nítida, de mejor calidad, y en escalas, distancias de aproximación, consecuentes con la indagación sobre las cualidades de las áreas verdes y el grado de permeabilidad de las superficies urbanas construidas.

Tanto en la primera como en la segunda consideración el trabajo brinda resultados que podrán ser evaluados en ejercicios necesarios en el próximo futuro. Como en toda aproximación científica inicial, donde se trabaja con rigor, los resultados obtenidos son importantes no solo por lo que dicen y comprueban, sino por las preguntas e interrogantes que deben ser constatados en análisis posteriores. La hipótesis inicial, enfrentada en este trabajo, nos permite, con el proceso aquí planteado, presentarla como una tesis inicial de apoyo a la planeación físico-ambiental de la ciudad de Bogotá.

El instrumento conceptual del metabolismo urbano, al aplicarlo como método de análisis para reconocer la dinámica de los flujos del complejo organismo urbano de la ciudad actual, nos ha permitido entender, a manera de radiografía clínica, algunos de los síntomas que deben ser atendidos para llegar a formular la sostenibilidad del conjunto urbano, con el equilibrio suficiente para albergar la comunidad urbana que hoy la habita.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El concepto del desarrollo ha hecho que en la mayoría de las ciudades del mundo haya fuertes impactos ambientales debido al rápido crecimiento. En el caso de la ciudad de Bogotá se ha observado como se incrementa el crecimiento en donde, las áreas verdes que aún persisten se convierten en una opción de negocio para la especulación por medio de la construcción.

En relación a la expiación urbana histórica y el aumento de las superficies impermeables, se concluye que si continua su aumento, las aguas superficiales no se retendrán en el suelo y tampoco se infiltrará en este, lo que hará que haya un aumento de escorrentías en las superficies urbanas y por lo tanto un peligro creciente de inundación en las zonas bajas de la ciudad.

Al hacer el plano de la temperatura, se puede ver el incremento de calor en la ciudad, el cual, es otro factor importante a la hora de ver el aumento de las construcciones urbanas.

En relación a los análisis del ciclo hídrico, a partir de los conceptos metabólicos urbanos, se pudo plantear su gran utilidad para la obtención de información científica aplicable a la planeación responsable de la ciudad. Los fenómenos producidos por el crecimiento continuo de las áreas construidas deben ser considerados en relación con la disminución de las superficies verdes, permeables, arborizadas, necesarias para mantener un equilibrio en la temperatura tolerable, en los rangos de confort del ambiente urbano.

Como parte de los resultados, la metodología desarrollada permitió un primer avance en el campo. La limitación de los instrumentos y la falta de información rigurosa de las estaciones de medición ambiental debe ser superada en próximos estudios. El tiempo dedicado al análisis de los resultados debe ser considerado dado el volumen de datos que pueden ser procesados por un investigador en un tiempo limitado por el programa académico. No obstante, los resultados presentados en este trabajo han dejado una información valiosa para compartir con los profesionales y las instituciones dedicadas a la planeación del crecimiento de la ciudad.

Finalmente, se identificó que el trabajo a partir de imágenes satelitales permitió identificar el cambio en el tipo de coberturas -verdes o construidas- durante los periodos analizados, permite considerar los efectos y los peligros que llevan implícitas la disminución de las áreas verdes en el contexto urbano.

Los análisis de las imágenes y el procesamiento a través de SIG permiten el manejo de gran cantidad de información. Esto solo es posible por estas herramientas, por lo tanto, si estas no existieran, los análisis de metabolismo serían imposibles de hacer o al menos muy limitados.

La medición científica aporta información que debe ser considerada en los procesos de planeación urbano-ambiental. La prevención, en este caso, de inundaciones o el desequilibrio en la humedad del suelo urbano, las variaciones en la intensidad del calor, contribuye a la mejora de la calidad ambiental de la ciudad en el próximo futuro.

La EEP con su relación en el ciclo hidrológico permiten observar la necesidad que se presente en el momento de construir la ciudad de Bogotá

## 8 REFERENCIAS

- Alaña, T., Beatriz, L. y Guido, J. (2016). Desarrollo sostenible y evolución de la legislación ambiental en las Mipymes del Ecuador, 210-217.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.d.-a). Lo esencial del POT- Plan de ordenamiento territorial-.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.d.-b). Secretaría Distrital de Planeación. Repéré 4 de marzo de 2018, à [http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estratificacion\\_Socioeconomica/QueEs](http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estratificacion_Socioeconomica/QueEs)
- Andrade, G. I., Remolina, F., Wiesner, D. y Montenegro, F. (2014). La Estructura Ecológica Principal en lo local. Propuesta de aplicación en la renovación urbana de Fenicia, Las Aguas, Bogotá. *Revista nodo*, 16(8), 42-54.
- Angel, L., Ramirez, A., Dominguez, E., Ramirez, A., Domínguez, E. y Ángel. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 34(131), 173-183.
- Arango, S., Niño, C., Ramírez, J. y Saldarriaga, A. (2012). *Bogotá y la Sabana* (Universida; editado por M. Dolores).
- Bai, X. (2007). Industrial Ecology and the Global Impacts of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 1-6. doi:10.1162/jie.2007.1296
- Barco, C., Ibel, R., Forero, J. F., Jaramillo, M., Cubillos, R., Escallón, C. y Chalela, J. (2000). *Plan de ordenamiento territorial: Documento Técnico de Soporte*.
- Berget, C. (s.d.). Efecto del tamaño y de la cobertura vegetal de parques urbanos en la riqueza y diversidad de la avifauna de Bogotá, Colombia.
- Berget, C. (2007). *Efecto del tamaño y de la cobertura vegetal de parques urbanos en la riqueza y diversidad de avifauna de Bogotá, Colombia. Gestión y Ambiente* (vol. 10). Universidad Nacional de Colombia.
- Beuf, A. (2012). Concepción de centralidad urbana y planeación del crecimiento urbano en la Bogotá de siglo XX, 1-21.
- Bischoff, N. T. y Jongman, R. H. G. (1993). *Development of Rural Areas in Europe: The Claim for Nature. Preliminary and background studies*.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (s.d.). Plan de Ordenamiento Territorial. Repéré 7 de marzo de 2018, à <https://www.ccb.org.co/Transformar-Bogota/Gestion-Urbana/Ordenamiento-territorial/Plan-de-Ordenamiento-Territorial>
- Campbell, S. (1996). Green cities, growing cities, just cities? Urban Planning and the Contradictions of sustainable development. . *Journal of the American Planning Association*.

- Cárdenas Jirón, L. A. (1998). Definición de un marco teórico para comprender el concepto del desarrollo sustentable. *Revista INVI*. doi:10.4067/invi.v13i33.228
- Carlos, J., Becerra, G., Alonso, R., Jaimes, V., Alonso, R., Jaimes, V., ... Ramos, F. (2016). BogotáEconómica.
- Carrion, F. (1989). Espacio público: punto de partida para la alteridad. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 160. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Chow, V. Te, Maidment, D. y Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. *Santa Fe de Bogota McGraw-Hill 1994*.
- Congreso de Colombia. (1997). *Ley 388 del 18 de Julio De 1997. Diario Oficial No. 43.091* (vol. 1997).
- Consejo Nacional de Desarrollo Urbano. (s.d.). Función y usos del suelo; integración urbana y ordenamiento territorial. - CNDU. Repéré 4 de marzo de 2018, à <http://cndu.gob.cl/funcion-y-usos-del-suelo-integracion-urbana-y-ordenamiento-territorial-2/>
- Córdova Sáez, K. (2011). Heat Island Impacts , and Urban Heat Islands in the Environment and Human Health . Comparative Seasonal Analysis : Caracas , October 2009 , March 2010.
- Dascal, G. (2007). Los espacios públicos y el capital social : aportes para comprender la relación entre ambos conceptos, 19-26.
- Dourojeanni, A. (1999). La dinámica del desarrollo sustentable y sostenible.
- Eken, C. (s.d.). Learning from architecture of metabolism: future city and urbanism.
- Franklin, J. F. y Forman, R. T. T. (1987). Creating landscape patterns by forest cutting: Ecological consequences and principles. *Landscape Ecology*, 1(1), 5-18. doi:10.1007/BF02275261
- Galvis, L. A., Shuirupdqfh, D., Wrzdugv, S., Flw, W. K. H., Lnhzlvh, V. V., Ghqvlw, S., ... Sulqflsdohv, O. D. V. (2013). ¿ El triunfo de Bogotá ? : desempeño reciente de la ciudad capital. *Coyuntura económica: investigación económica y social*, XLIII, 199-236.
- Garcia, M. (2009). Raíces económicas del deterioro ecológico y social : Más allá de los dogmas . *Arxius*, 79-81.
- Garnett, T. (1996). Growing food in cities A report to highlight and promote the benefits of urban agriculture in the UK. *National Food Alliance D*.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. y Briggs, J. M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864), 756-760. doi:10.1126/science.1150195
- Grulois, G., Tosi, M. C. y Crosas, C. (2018). *Designing territorial metabolism* (jovis). Berlin.

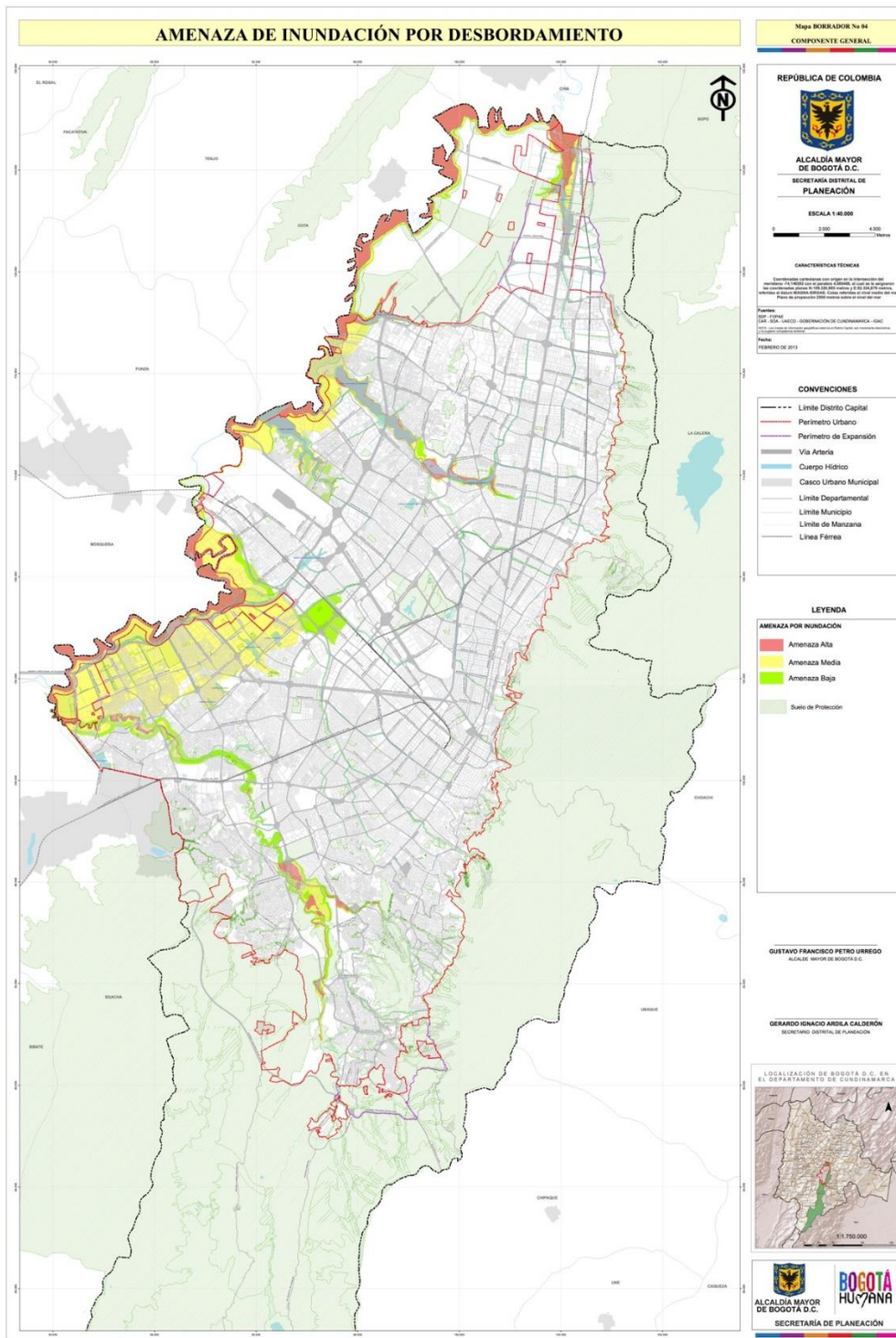
- Havránek, M., Brattebø, H., Bringezu, S., Erkman, S., Giampietro, M., Lifset, R., ... Weisz, H. (2009). *ConAccount 2008 Urban metabolism: measuring the ecological city*.
- Hayakawa, I. F. (2010). Planeación urbana en Curitiba. *Quivera*, 12, 52-69.
- Herrera, L., Pecht, W. y Urbano, C. (1976). Crecimiento urbano de america latina, 548.
- Herrera, P. y Díaz, E. (2013). Ecología del paisaje, conectividad ecológica y territorio. una aproximación al estado de la cuestión desde una perspectiva técnica y científica. *Dossier*, 1(2013), 43-70.
- Julián, C. y Álvarez, D. (2014). Metabolismo urbano: herramienta para la sustentabilidad de las ciudades / Urban metabolism: a tool for the sustainability of cities. *Interdisciplina*, 2(2), 51-70.
- Maldonado, M. M. (2001). La Estructura Ecologica Principal : Del Plan de Ordenamiento al Plan De Desarrollo del Distrito Capital, 53.
- Naredo, J. M. (2004). La economía en evolución : invento y configuración de la economía en los siglos XVIII y XIX y sus consecuencias actuales. *Manuscripts*, 22, 83-117. doi:10.1016/j.procs.2014.08.154
- Nichol, J. y Wong, M. S. (2005). Modeling urban environmental quality in a tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 73(1), 49-58. doi:10.1016/j.landurbplan.2004.08.004
- Niza, S., Rosado, L. y Ferrdo, P. (2009). Urban metabolism methodological advances in urban material flow accounting based on the lisbon case study. *Journal of Industrial Ecology*, 13(3), 384-405. doi:10.1111/j.1530-9290.2009.00130.x
- Nowak, D., Dwyer, J. y Childs, G. (1998). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe.*, 231-251.
- Osorio, J. (2012). Aves migratorias neotropicales en parques y jardines de Bogotá: 1945 – 2005. *Revista Nodo*, 6(12), 67-82.
- Osorio, J. A. (2008). La historia del agua en Bogotá: una exploración bibliográfica sobre la cuenca del río Tunjuelo. *Memoria y Sociedad*, 12(25), 107-116.
- Osorio G, A. M. (2011). Dimensión ambiental y problemáticas urbanas en Colombia (1960-2010). *Environmental dimension and urban problems in Colombia (1960-2010). (English)*, 4(7), 90-109.
- Þcke, S. R. y Aldunce, I. M. F. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en santiago de chile. *Eure*, 36(109), 89-110. doi:10.4067/S0250-71612010000300004
- Pérez, A. (2000). La estructura ecológica principal de la Sabana de Bogotá. *Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas*, 1-37.

- Pérez, D. F. y Zamora, D. A. (2015). Informe Técnico: Descripción Y Contexto De Las Cuencas Del Distrito Capital (Torca, Salitre, Fucha Y Tunjuelo). *Secretaría distrital de ambiente*, 36.
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Boone, C. G., Groffman, P. M., Irwin, E., ... Warren, P. (2011). Urban ecological systems : Scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 331-362. doi:10.1016/j.jenvman.2010.08.022
- Preciado Beltrán, J. (2009). Bogotá región: Crecimiento urbano en la consolidación del territorio metropolitano. *Seminario internacional Bogotá y Cundinamarca: Avances y perspectivas en la integración regional*, 1-18.
- Quintero, C. y Tabares, A. (2015). *Metabolismo urbano en el flujo de materiales de construcción de vivienda de la ciudad de Pereira*.
- Ramírez, A. y Sánchez, J. (2009). Enfoques de desarrollo sostenible y urbanismo. *Revista Digital Universitaria*, 1-9.
- Ramírez, J., Mejía, G. y Niño, C. (2017). *Plan especial de manejo y protección del centro histórico de Bogotá D.C.*
- Rojas, S. M., Antonio, J., Escalante, N., Enrique, J., Callejas, P., Sepúlveda, O. V. y Luna, H. T. (2008). *Calidad del sistema hídrico de Bogotá*.
- Romera Jiménez Carlos. (2012). La urbanización y lo urbano, realidades divergentes. *Urban*, 4, 15-26.
- Romero, H. y Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Eure*, 31(94), 97-119. doi:10.4067/S0250-71612005009400006
- Rueda, S. (2011). Il trasversale gioco dei saperi nel progetto e nella promozione della città. Capítulo: El Urbanismo Ecológico. *Scientifiche Italiane*, 6, 17.
- Sánchez, R. (2013). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. ... /Comisión Económica para América Latina y el Caribe. ....
- Secretaría Distrital de Planeación - Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.d.). Repéré 31 de marzo de 2018, à <http://www.sdp.gov.co/PortalSDP>
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K. y Williams, J. (1998). Manejo de las áreas verdes urbanas. *División de Medio Ambiente del Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Interamericano de Desarrollo*, 80.
- Soriano. (2001). Flujo De Energia, 12.
- Soriano. (2012). Sucesión Ecológica.
- Subirós, J., Varga, D., Llausas, A. y Ribas, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 48, 151-166.



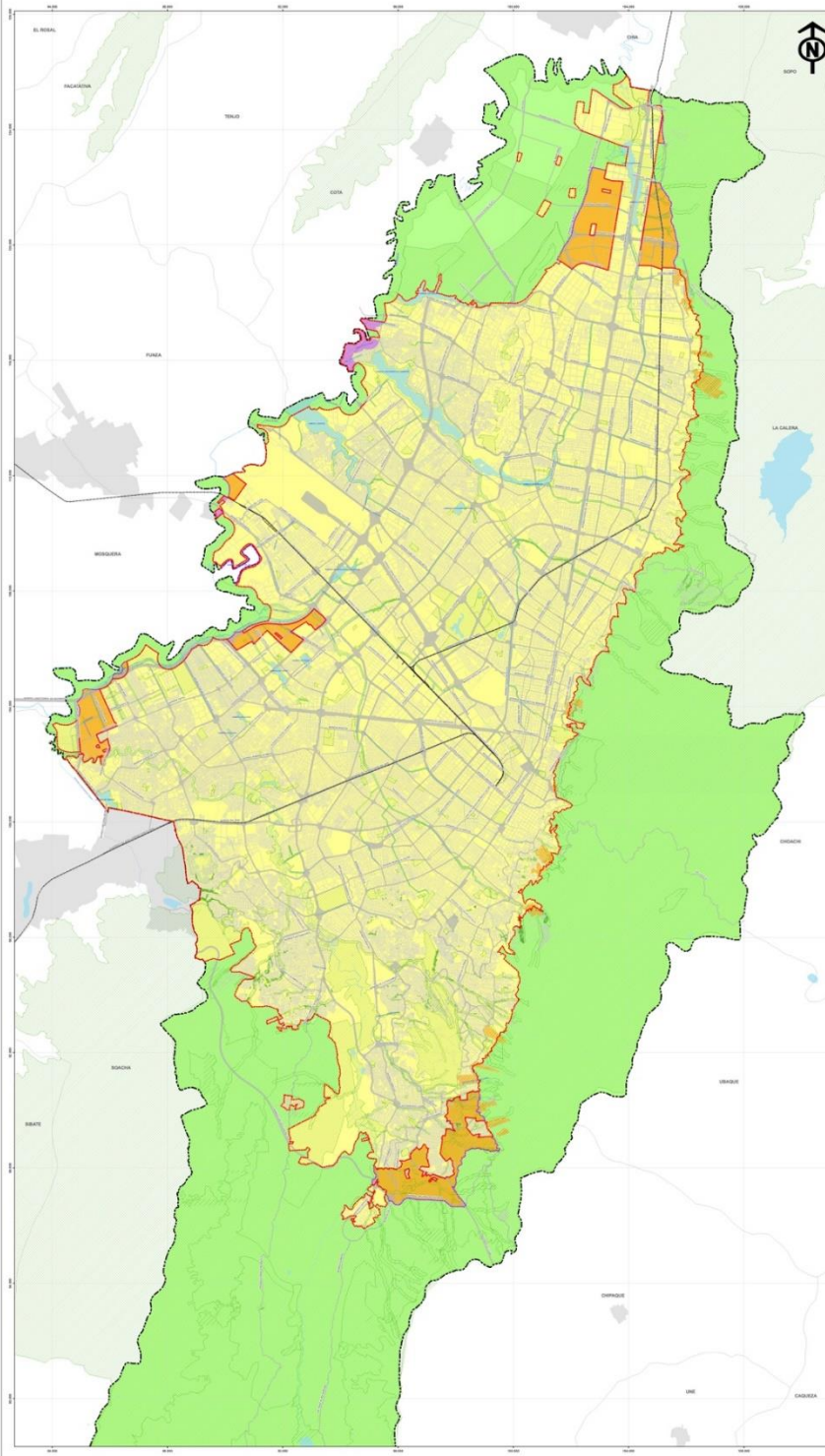
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K. y Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571. doi:10.2307/3544927
- Thériault, J. y Laroche, A.-M. (2009). Evaluation of the urban hydrologic metabolism of the greater Moncton Region, New Brunswick. *Canadian water resources Association*, 255-268.
- Van der Hammer, T. y Andrade, G. (2003). Estructura Ecológica Principal de Colombia: primera aproximación, 74.
- Villegas, E. (2003). *El agua en la historia de Bogotá 1538- 1937*.
- Zambrano, C. y Triana, M. (2002). La biodiversidad bogotana. *Revista La tadeo*, (67), 89-98.
- Zannin, P. H. T., Diniz, F. B. y Barbosa, W. A. (2002). Environmental noise pollution in the city of Curitiba, Brazil. *Applied Acoustics*, 63(4), 351-358. doi:10.1016/S0003-682X(01)00052-4
- Zhang, Y., Yang, Z. y Yu, X. (2009). Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis: A case study for Beijing (China). *Ecological Modelling*, 220, 1690-1696. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.04.002

# 9 ANEXOS



# CLASIFICACIÓN DEL SUELO URBANO Y DE EXPANSIÓN

Mapa Borrador No 02  
COMPONENTE GENERAL



  
**REPUBLICA DE COLOMBIA**  
**ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.**  
**SECRETARIA DISTRITAL DE PLANEACION**  
 ESCALA 1:40.000  

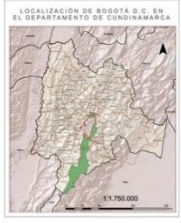

**CARACTERISTICAS TECNICAS**  
 Clasificación elaborada con origen en la información del catastro, INEGI, con el apoyo técnico de la Oficina de Planeación y Desarrollo Urbano de Bogotá D.C., con el apoyo técnico de la Oficina de Planeación y Desarrollo Urbano de Bogotá D.C. Para su aprobación por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.

**Fuente:**  
 OMI - OMI - GOBERNACION DE CUNDINAMARCA - OMI - FOPAE  
 OMI - OMI - GOBERNACION DE CUNDINAMARCA - OMI - FOPAE  
**Fecha:**  
 FEBRERO DE 2013

- CONVENCIONES**
- Límite Distrito Capital
  - Perímetro Urbano
  - Perímetro de Expansión
  - Via Arterial
  - Cuerpo Hídrico
  - Casco Urbano Municipal
  - Límite Departamental
  - Límite Municipio
  - Límite Manzana
  - Línea Férea

- LEYENDA**
- CLASES DE SUELO**
- Suelo Urbano
  - Suelo de Expansión Urbana
  - Suelo Rural
  - Barríos ilegales que serán considerados como urbanos, según el Plan del Consejo de Estado, pendiente de la acción Popular No. 2005-0002
  - Barríos ilegales, ubicados en suelo urbano y de protección que mantendrán sus clasificaciones de suelo, hasta que se hayan trasladado desde las familias, que actualmente se ubican en la zona, en el marco del Subprograma de Reasentamiento y del Plan de Adaptación y Mitigación del cambio climático. En ese momento cambiará la clasificación a suelo rural.
  - Suelo de Protección
- \*NOTA: Los Planes Parciales adoptados en su momento como de expansión urbana, dentro del Área Urbana, y de protección de suelo, dentro del Área Rural, de acuerdo con el Decreto 1074 de 2008 y el Decreto 1075 de 2008.

**GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO**  
 ALCALDE MAYOR DE BOGOTÁ D.C.  
  
**GERARDO IGNACIO ARDILA CALDERÓN**  
 SECRETARIO DISTRITAL DE PLANEACION

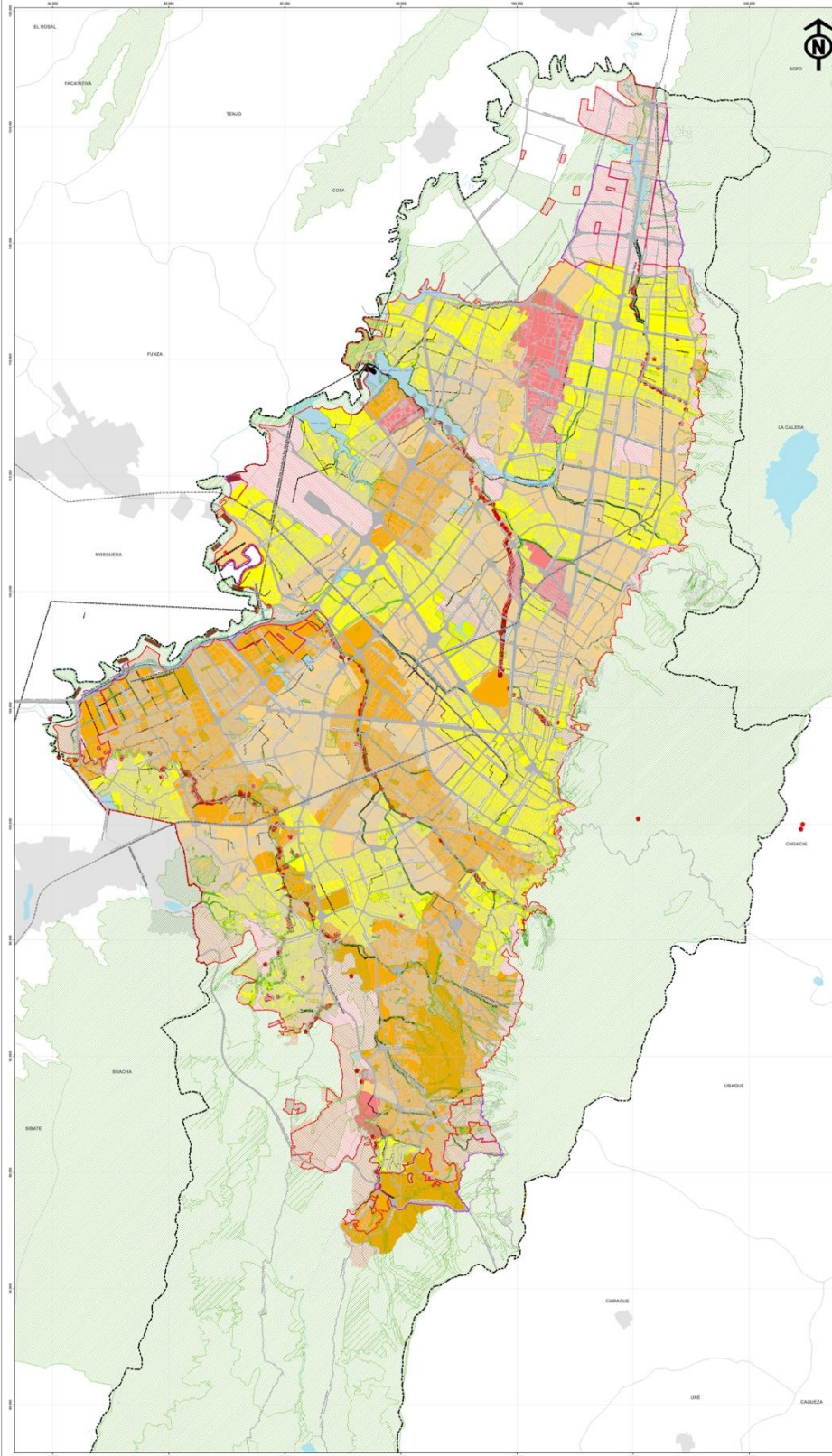


  
**BOGOTÁ**  
**ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.**  
**SECRETARIA DE PLANEACION**



# SISTEMA DE ALCANTARILLADO

Mapa Borrador No 20  
COMPONENTE URBANO



REPÚBLICA DE COLOMBIA



ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.  
SECRETARÍA DISTRITAL DE PLANEACIÓN

ESCALA 1:40.000



### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Coordenadas geográficas con origen en la intersección del meridiano 74°00'00" con el ecuador (0°00'00"), el cual se lo originaron las coordenadas planas 0 000 000 metros y 0 00 000 000 metros. Método: Datum: BOGOTÁ-93MDS. Como resultado de un ajuste del tipo: Método de proyección: UTM (metro sobre el nivel del mar).

### ABRIL:

DAE: SOA - OBSERVATORIO DE CLIMATOLÓGICA - IDEC - FOMAE  
Cada 15 días de observación para el control de la calidad del agua.  
Cada 15 días de observación para el control de la calidad del agua.  
Cada 15 días de observación para el control de la calidad del agua.

Fecha:  
FEBRERO DE 2013

### CONVENCIONES

- Límite Distrito Capital
- Perímetro Urbano
- Perímetro de Expansión
- Via Arterial
- Cuerpo Hídrico
- Casco Urbano Municipal
- Límite Departamental
- Límite Municipio
- Límite de Manzana
- Línea Férrea

### LEYENDA

- SISTEMA ALCANTARILLADO**
- Puntos Vertimientos
  - Interceptores
  - Jarillones
  - Plantas de Tratamiento
- UNIDADES DE GESTIÓN DE ALCANTARILLADO SANITARIO - UGAS**
- Capacidad
- Sin servicio
  - Crítica
  - Restringida
  - Moderada
  - Alta
  - Suelo de Protección

GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO  
ALCALDE MAYOR DE BOGOTÁ D.C.

GERARDO IGNACIO ARDILA CALDERÓN  
SECRETARIO DISTRITAL DE PLANEACIÓN

