

TESIS DE PREGRADO

**APLICABILIDAD DE TANQUES DE TORMENTA COMO METODOLOGÍA
PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CIUDAD DE
BOGOTÁ**

Paula Valentina Martín Doncel

Asesor: Juan Guillermo Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PREGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2019**

AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quisiera agradecer a las instituciones, profesores, amigos y familia que me acompañaron en la elaboración de este trabajo de investigación.

En primer lugar, quiero agradecer a **ECOPETROL S.A** por confiar en el talento humano de las regiones y brindarles la posibilidad a cientos de jóvenes de estudiar en las mejores universidades del país. La beca, “Mario Galán Gómez”, me permitió salir de mi ciudad, Villavicencio, e ingresar en la **Universidad de los Andes**, una universidad pluralista, diversa y con unos altos estándares de calidad académica que me permitieron desarrollar mi capacidad crítica, sensibilidad social y ser la mujer que en la actualidad soy, a ellos muchas gracias.

A mis profesores, especialmente al doctor **Juan Guillermo Saldarriaga**, a quien agradezco aceptar ser mi director de tesis, por la dedicación y apoyo que me ha brindado durante la elaboración de este trabajo, por su respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas; al profesor **Luis Alejandro Camacho**, director del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, y el ingeniero **Manuel Rodríguez Susa**, quienes me enseñaron a amar mi carrera y a comprometerme activamente en la transformación de la realidad social, ambiental y económica del país; al profesor **Camilo Andrés Salcedo Ballesteros**, fuente de motivación y soporte, quien confió en mis capacidades y amablemente me invitó al “**Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados**” (**CIACUA**) desde el año 2018, en donde conocí a personas valiosas como **Alexander Garzón**, apoyo constante durante este proceso de investigación.

Gracias al profesor **Juan Pablo Rodríguez Sánchez** del Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA), por su apoyo en la obtención de información para este proyecto, especialmente por el mapa del nivel freático de la ciudad de Bogotá. Al ingeniero **Ricardo Camacho Castilla**, profesor de geomática y experto en sistemas de información geográfica (SIG), gracias, sin su asistencia no hubiera podido generar los resultados de esta tesis. A **Alejandra Figueroa** mi agradecimiento por su disposición constante para ayudar, sus correcciones e ideas me guiaron en la redacción de este documento.

Por último, quisiera expresar mi agradecimiento a mi familia, especialmente a mi madre, **Olga Lucía Doncel Rojas**, quien me ha brindado amor y apoyo constante durante este proceso. A mis abuelos, **Jaime Ortiz** y **Adela Rojas**, por sus mensajes de apoyo y aliento en todos estos años de formación universitaria. A mi tía, **Yohana Ortiz**, por sus charlas y discursos que siempre me reconfortaron en los momentos que más los necesitaba; y finalmente, a mis dos hermanos, **Samuel** y **Luna**, por ser la fuente de inspiración y motivación para todos los proyectos que he emprendido.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	5
1.1	Objetivos	7
1.1.1	Objetivo General	7
1.1.2	Objetivos Específicos	7
2	Marco teórico	8
3	Metodología	10
4	Resultados y Análisis de resultados	17
5	Conclusiones y Recomendaciones	33
6	Referencias	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Mapa de Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA).....	18
Ilustración 2. Mapa Red de alcantarillado	19
Ilustración 3. Mapa Profundidad del nivel freático	20
Ilustración 4. Mapa Áreas de parques y zonas verdes	21
Ilustración 5. Mapa Pendiente del terreno	22
Ilustración 6. Mapa Pozos pluviales	23
Ilustración 7. Mapa Usos de suelos	24
Ilustración 8. Mapa final - Áreas para la ubicación de tanques de tormenta	26
Ilustración 9. Mapa de la localidad de Suba	27
Ilustración 10. Áreas para la ubicación de tanques de tormenta - Localidad de Suba.....	28
Ilustración 11. Mapa de la localidad de Usaquén.....	30
Ilustración 12. Áreas para la ubicación de tanques de tormenta - Localidad de Usaquén	31
Ilustración 13. Imágenes satelitales ubicaciones tanques de tormenta – Localidad de Usaquén	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de porcentajes de las variables	11
Tabla 2. Escala de evaluación de indicadores.....	12
Tabla 3. Variable <i>Usos del suelo</i>	13
Tabla 4. Variable <i>Cercanía al sistema de alcantarillado</i>	13
Tabla 5. Variable <i>Áreas de parques y zonas verdes</i>	14
Tabla 6. Variable <i>Pendientes</i>	14
Tabla 7. Variable <i>Profundidad del nivel freático</i>	15
Tabla 8. Variable <i>Cercanía a los pozos pluviales</i>	15
Tabla 9. Categorización de variables	25
Tabla 10. Localización de los tanques de tormenta - Localidad de Suba	29
Tabla 11. Imágenes satelitales ubicaciones tanques de tormenta – Localidad de Suba	29
Tabla 12. Localización de los tanques de tormenta - Localidad de Usaquén	32

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ponderación de variables	15
--	----

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno global que provoca la alteración de las temperaturas y los ciclos atmosféricos dependiendo de la localización donde tenga efecto, esto quiere decir que en algunas zonas se presentan sequías y en otras ubicaciones geográficas se produce un aumento de precipitación. Las alteraciones climáticas han sucedido a lo largo de la historia, sin embargo, estas últimas variaciones han sido provocadas por la acción del hombre, especialmente por la actividad industrial con quema de combustibles fósiles y con esto, producción de gases de efecto invernadero cuyo impacto es irreversible.

Por ello, la comunidad internacional se ha enfocado en tomar acciones de prevención y sobretodo adaptación a los efectos del cambio climático como un reto ambiental, social y económico. Lo anterior, es aún más dramático para Colombia, ya que pese a ser uno de los países con menor aporte de gases de efecto invernadero, sufre con mayor afectación las alteraciones climáticas. Según el ranking de “vulnerabilidad climática”, realizado por The Hong Kong and Shanghai Banking Corporation (HSBC), Colombia se encuentra en el puesto número siete, debido a su sensibilidad frente a este fenómeno del clima por sus condiciones geográficas y por las pocas medidas de políticas públicas para hacerle frente (García, M., et al, 2012).

Las estrategias de adaptación al cambio climático se desarrollan principalmente en las grandes ciudades donde se encuentra la mayor densidad poblacional. En el caso de Bogotá D.C., las proyecciones y los análisis de riesgo muestran un aumento de precipitación en la zona norte de la capital, el cual generará una sobrecarga al sistema de alcantarillado pluvial existente (Desinventar, s.f). Para solventar este problema se han presentado algunas propuestas como la sustitución de la red de tuberías del alcantarillado por unas con un mayor diámetro. Sin embargo, esta no es una opción viable para la ciudad debido a los altos costos que generaría un cambio total de esta estructura. Por ello, varios autores expertos en técnicas hidráulicas de adaptación al cambio climático presentan los tanques de tormenta como una alternativa poco invasiva y de bajo costo para ciudades con riesgo de inundación por la saturación del sistema de alcantarillado.

Debido a lo anterior, este proyecto de investigación pretende identificar las áreas ideales para la ubicación de tanques de tormenta, según el riesgo de inundación, de las localidades administrativas de Usaquén y Suba de la ciudad de Bogotá D.C., en respuesta a un escenario de aumento de precipitación por acción del cambio climático. Esta propuesta busca minimizar el impacto ambiental, social y económico que generarían la sobrecarga e inundación desde el sistema de alcantarillado en la capital.

En primer lugar, respecto al aspecto ambiental, una inundación como una forma de dispersión no controlada de los contaminantes que puede llegar hasta fuentes hídricas, afectaría la calidad de este recurso vital y con ello, la biodiversidad asociada. Además, dependiendo de la magnitud de la inundación, puede generarse un desprendimiento de la vegetación y un aumento de sedimentos en la corriente de agua. En segundo lugar, la afectación social de un manejo no regulado del agua transportada en la red de alcantarillado, aumentaría el riesgo sanitario y de seguridad por las posibles fugas de aguas contaminadas que pueden ingresar al sistema pluvial. Finalmente, los costos económicos relacionados con una inundación se centran en los daños de la estructura y bienes públicos de la ciudad. Por ello, los tanques de tormenta representan una tecnología accesible y eficaz frente a las consecuencias con altos costos de los aspectos nombrados.

Esta tesis se divide en cinco secciones: en la primera parte, se introducirá el tema principal de investigación y se presentará los objetivos que guían el desarrollo de esta; en la segunda parte, se desarrolla el marco teórico que resume los principales estudios en torno a los métodos hidráulicos de adaptación al cambio climático en ciudades, con enfoque en estructuras de almacenamiento de agua como los tanques de tormenta. En la tercera parte, se presenta la metodología diseñada para identificar las áreas idóneas para el establecimiento de este tipo de estructuras, en las localidades de mayor riesgo de inundaciones de Bogotá D.C., como lo son Suba y Usaquén. En la cuarta parte, se presenta los resultados y su respectivo análisis a través de la interpretación de los mapas con información geográfica que brinda coordenadas de los lugares identificados para la ubicación de los tanques de tormenta, gracias a las variables relacionadas con aspectos determinantes para su construcción y mantenimiento. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones pertinentes para la apropiación de este tipo de estructuras en la ciudad como una herramienta de adaptación a las consecuencias irreversibles del cambio climático.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Identificar las áreas ideales para la ubicación de tanques de tormenta según el riesgo de inundación de las localidades administrativas de Usaquén y Suba de la ciudad de Bogotá D.C., en respuesta a un escenario de aumento de precipitación por acción del cambio climático.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la importancia de diferentes factores relacionados con las características del suelo y el espacio para la ubicación de tanques de tormenta en la ciudad de Bogotá D.C.
- Recolectar información geográfica relevante para la ubicación de tanques de tormenta para la ciudad de Bogotá con las instituciones y entidades territoriales pertinentes.
- Diseñar una metodología para la identificación de la ubicación óptima de los tanques de tormenta en las localidades con mayor riesgo de inundación en la ciudad de Bogotá.
- Procesar la información recolectada con el software para el análisis de información geográfica ArcGIS, que permita la ponderación de las capas según su influencia para la ubicación de tanques de tormenta.
- Verificar las áreas resultantes después del tratamiento metodológico para garantizar que son ideales para la ubicación de tanques de tormenta en la ciudad de Bogotá.
- Elaborar un mapa con las zonas óptimas para la ubicación de tanques de tormenta en las Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) de la zona norte de la ciudad de Bogotá.

2 MARCO TEÓRICO

Uno de los mayores retos que la humanidad debe hacer frente en el presente siglo es el cambio climático, el cual genera cambios acelerados de temperatura, precipitación y disponibilidad de recursos naturales. Lo anterior produce alteraciones en las dinámicas económicas, sociales y del medio ambiente, especialmente sobre los sistemas naturales de los que dependen las actividades productivas de la población y el complejo urbano.

Según el ranking de “vulnerabilidad climática” de The Hong Kong and Shanghai Banking Corporation (HSBC), Colombia se encuentra en el séptimo puesto de los países con mayor impacto y sensibilidad al cambio climático (HSBC, 2018); por ende, es necesario contar con estrategias para enfrentar este fenómeno y minimizar el impacto negativo sobre el territorio, pues los efectos del cambio climático están determinados según la variabilidad espacial del terreno.

Esto impacta la planificación de las obras públicas pues deben ser cuidadosamente desarrolladas para que cumplan su función a cabalidad a lo largo del tiempo y en condiciones óptimas de operación, teniendo en cuenta escenarios extremos en función de la mutabilidad climática. Para ello es necesario suscribirse a la tendencia actual de las obras públicas en las grandes ciudades donde se plantean proyectos para escenarios de cambio climático, como lo que se está haciendo en Barcelona con el documento técnico y de políticas públicas “Plan Clima”.

Por esta misma línea Colombia ha realizado apuestas por seguir en este modelo con propuestas adaptativas representadas en análisis bibliográficos como: “Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100” y “Política Nacional De Cambio Climático”. Estos documentos sirven de guía en la agenda ambiental para los tomadores de decisiones en la planificación de las ciudades para un correcto desarrollo territorial que aproveche las oportunidades y los retos que genera el cambio climático. Sin embargo, la información puntual sobre los impactos de este fenómeno sobre el recurso hídrico es limitada.

El documento “Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático en Colombia” del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2017), señala que Bogotá es la ciudad del país con mayor afectación por este fenómeno debido a su sensibilidad en el manejo del recurso hídrico. Una de las razones de la anterior afirmación es el incremento de la intensidad de la lluvia que aumenta la escorrentía, la cual no es capaz de soportar los sistemas de drenaje urbano actuales, por lo que se generan Descargas de los Sistemas Unitarios, comúnmente conocidas como DSU.

Existen diversas alternativas para aprovechar las aguas lluvias y evitar el desbordamiento de las aguas en el sistema de alcantarillado. Algunos usos se enfocan en el almacenamiento para uso en sectores con poco acceso al recurso hídrico con el fin de suplir necesidades diarias o simplemente almacenar temporalmente el agua para prevenir inundación. También existen propuestas de

solución que buscan generar la creación de redes independientes de agua lluvia, ampliación y/o rehabilitación de conductos con mayor capacidad de transporte y depósitos anti-inundación. Para ello se requiere conocer el área de captación, la dimensión del tanque de almacenamiento y la demanda de agua (Reyes et al., 2014).

Un depósito anti-inundación utilizado para minimizar y controlar los impactos de las DSU en el medio receptor es el Tanque de Tormentas (aliviaderos). Estas estructuras funcionan como elementos de control para regular el caudal generado por eventos de lluvia que superan la capacidad del sistema y funcionan como punto de captación de la primera fase de la lluvia que posee la mayor contaminación, aliviando así el punto de posible descarga.

El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) ha evaluado y diseñado tanques de almacenamiento temporal en el sistema de alcantarillado. Esta idea se ha buscado implementar en ciudades como Bogotá en la que el cambio climático tiene como efecto un aumento de precipitaciones por temporada al igual que una baja capacidad en el sistema de alcantarillado para evitar inundaciones.

Algunas investigaciones desarrolladas por el CIACUA que sirven como base para estudios y proyectos son: “Drenaje urbano y cambio climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro” (Saldarriaga et al., 2014); “Evaluación de una metodología para la determinación de eventos futuros de precipitación extremos bajo cambio climático” (Saldarriaga et al., 2016); “Validación de modelos climáticos globales para la determinación de eventos extremos de precipitación en Colombia” (Saldarriaga et al., 2016) y “Rehabilitación de redes de drenaje mediante la combinación de tanques de retención y sustitución de conducciones” (Saldarriaga et al., 2016).

Las anteriores publicaciones a través de algoritmos y Modelos Climáticos Globales (MCGs) han analizado los picos de eventos de precipitación y los puntos de posibles inundaciones en el sector de Chicó en Bogotá, dimensionando el impacto de los tanques de tormenta y determinando la pre-localización de los tanques de retención y de las tuberías potencialmente sustituibles.

Estos estudios evidencian la viabilidad y la necesidad de aplicación de estos sistemas de almacenamiento temporal de agua en la ciudad de Bogotá debido al alto factor de riesgo por inundación. Debido a lo anterior es necesario evaluar la topografía total de este territorio, junto a factores como el diámetro de las tuberías de la red de alcantarillado, y así encontrar lugares estratégicos para la ubicación de tanques de tormenta. Respecto a ello, el autor recomienda que dichas estructuras se encuentren ubicados en zonas con amplio espacio y pocas edificaciones como parqueaderos o parques.

Se sostiene que la implementación de estos tanques para la adaptación al cambio climático es una necesidad que requiere la población total de Bogotá, con el fin de mantener un estado de bienestar y salubridad en su entorno. Siendo así, es necesario estudiar cada localidad según sus características específicas y generar con ello una guía para quienes toman las decisiones en temas de planeación en la ciudad.

3 METODOLOGÍA

La presente tesis se enmarca dentro de un proyecto de investigación para el año 2019, con estudio de caso de la zona norte de Bogotá (localidad de Usaquén y Suba), cuyo análisis y alcance de resultados son de tipo analítico y descriptivo, puesto que recolectó información específica y exhaustiva de todas las localidades de Bogotá para la posterior interpretación de datos. La elección de localidades se realizó teniendo en cuenta los mapas de riesgo a inundaciones de la ciudad, debido a que la aplicabilidad de los tanques de tormenta depende de la necesidad de aliviar la carga hídrica en el sistema de alcantarillado. Teniendo en cuenta esto, las localidades de Usaquén y Suba son las que presentan mayor afectación por el aumento de precipitación debido al cambio climático (Desinventar, s.f).

Los resultados esperados de esta tesis buscan definir las zonas ideales para la ubicación de tanques de tormenta en las áreas de la ciudad de Bogotá nombradas. Lo anterior, se realizó a partir de un análisis de capas que permite analizar datos de características geográficas del territorio contenidos en submapas con información específica llamados *capas*, los cuales son procesados con el fin de realizar inferencias de aspectos de interés como en este caso áreas ideales para la ubicación de los tanques de tormenta en la ciudad.

Los anteriores submapas fueron procesados usando el programa ArcGIS, el cual es un software para Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permite el procesamiento, análisis, tratamiento e impresión de la información recolectada. Para este proyecto de investigación se utilizaron variables de información geográfica relevantes para la ubicación de tanques de tormenta para la zona norte de Bogotá, según la literatura especializada en estructuras hidráulicas, tales como: “usos del suelo”, “cercanía a los pozos pluviales”, “cercanía al sistema de alcantarillado pluvial y troncal”, “áreas de parques y zonas verdes”, “pendiente” y “profundidad del nivel freático”. Sin embargo, cabe aclarar que no se tuvo en cuenta para este estudio zonas privadas tales como el Club El Country y Carmel Club Campestre debido a la dificultad para el acceso a la información disponible.

La selección de estas variables se debe a que las condiciones del suelo y el espacio constituyen aspectos determinantes para la ubicación de los tanques de tormenta. Por ello, se le asignó un porcentaje a cada una de estas variables de acuerdo a su incidencia en dos criterios: aspectos relacionados con la construcción de los tanques y su mantenimiento. Las variables relacionadas con la construcción constituyen un 85% del peso de la ponderación, las cuales son: uso del suelo, cercanía al sistema de alcantarillado, áreas de parques y zonas verdes, profundidad del nivel freático y pendiente del terreno. Por otro lado, la variable correspondiente al mantenimiento de los tanques le corresponde el 15% restante de la sumatoria y se relaciona con la cercanía a los pozos pluviales, ya que es un punto de acceso al sistema de alcantarillado y, por ende, al tanque de tormenta vinculado.

Se presenta la tabla de distribución de porcentajes de las variables (Tabla 1.):

Tabla 1. Distribución de porcentajes de las variables

Categoría	Variable	Porcentaje
Construcción	Usos del suelo	10%
	Cercanía al sist.de alcantarillado local (Diámetro tuberías > 1 m)	15%
	Cercanía al sist.de alcantarillado troncal (Diámetro tuberías > 1 m)	
	Área de parques y zonas verdes	20%
	Pendientes (grados)	20%
	Profundidad a la cual se encuentra el nivel freático	20%
Mantenimiento	Cercanía a los pozos pluviales	15%
		100%

Con el fin de realizar la ponderación se manejaron una serie de indicadores dentro de cada variable que permitieron medir la viabilidad de situar un tanque de tormenta bajo estas condiciones de terreno y espacio.

Para esto se estableció una escala que parte de un valor 0 para una *condición inaceptable* para la ubicación de tanques de tormenta y 3 para una *condición óptima* para la localización de estas estructuras. Adicionalmente, se incluyó la categoría *No aplica* cuando la condición no permite la ubicación de tanques de tormenta, como es el caso de áreas de interés histórico (Tabla 2.).

Tabla 2. Escala de evaluación de indicadores

Categoría	Descripción	Valor
Óptimo	La categoría es ideal para la ubicación de tanques de tormenta	3
Adecuado	La categoría presenta varias características que permiten ubicar tanques de tormenta	2
Aceptable	La categoría presenta características admisibles que permite ubicar tanques de tormenta	1
Inaceptable	La categoría presenta viabilidad baja para ubicar tanques de tormenta	0
No aplica	La categoría no permite la ubicación tanques de tormenta	No aplica

A continuación, se explica con más detalle las variables utilizadas teniendo en cuenta su definición conceptual y su operacionalización.

1. Usos del suelo

Según la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá (s.f) se define como uso del suelo “la obtención del (obtener el) dictamen escrito sobre uso o usos permitidos en un predio o edificación, de conformidad con las normas urbanísticas del plan de ordenamiento territorial y los instrumentos que lo desarrollen”. De acuerdo a lo anterior, la entidad territorial realiza una clasificación de los suelos según su uso que fueron evaluados según la métrica de la escala de medición de indicadores presentada en la Tabla 3. Se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella en la que el uso del suelo son zonas verdes o sin construir; la adecuada son áreas industriales y oficiales; la aceptable es para espacios comerciales y, finalmente, la inaceptable es para zonas históricas.

Tabla 3. Variable Usos del suelo

Usos del suelo	
Comercial	1
Industrial	2
Oficial	2
Residencial	0
Sin construir	3
Zona historica	No data
Zona verde o humedal	3

2. Cercanía al sistema de alcantarillado troncal y local (Diámetro tuberías > 1 m)

Para el análisis de la ubicación de los tanques de tormenta es importante la cercanía al sistema de alcantarillado pluvial con tuberías de diámetro mayor a 1 metro, puesto que con este radio se tiene la capacidad de transportar el caudal para el volumen de un tanque de tormenta y su cercanía a estas tuberías disminuye el costo de interconexión entre el tanque de tormenta y el sistema de alcantarillado. Teniendo en cuenta esto, para la variable de cercanía al sistema de alcantarillado troncal y pluvial se aplicó la escala de medición de indicadores. Debido a lo anterior, se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella en la que la cercanía del sistema de alcantarillado con tuberías mayor a un metro y esta estructura hidráulica se encuentra a menos de cincuenta metros; la adecuada es aquella que se encuentra entre los cincuenta y cien metros; la aceptable es aquella que se encuentra entre los cien y trescientos metros y, finalmente, la inaceptable es aquella cuya distancia es mayor a trescientos metros (Tabla 4.).

Tabla 4. Variable Cercanía al sistema de alcantarillado

Cercanía al sist.de alcantarillado troncal y local (Diametro tuberías > 1 m)	
$x \leq 50$ metros	3
50 metros < $x \leq 100$ metros	2
100 metros < $x \leq 300$ metros	1
300 metros < x	0

3. Áreas de parques y zonas verdes

Debido a que los tanques de tormenta tienen un gran tamaño por su objetivo de almacenar un volumen de agua significativo, es necesario contar con un área extensa idealmente sin edificaciones. Teniendo en cuenta esto, zonas perfectas para la ubicación de tanques de tormenta son los parques, parqueaderos y demás zonas verdes. Para ponderar la capa de *Área de parques y zonas verdes* se usó la escala de medición de indicadores. Teniendo en cuenta esto, se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella donde el área de parques y zonas

verdes tiene un área mayor a ciento un mil metros cuadrados; la adecuada es aquella que se encuentra entre los cinco mil cien y ciento un mil metros cuadrados; la aceptable es aquella que se encuentra entre los cien y cinco mil cien metros cuadrados y, finalmente, la inaceptable es aquella cuya área es menor a cien metros cuadrados (Tabla 5.).

Tabla 5. Variable Áreas de parques y zonas verdes

Áreas de parques y zonas verdes	
101000 m ² < x	3
5100 m ² < x ≤ 10100 m ²	2
100 m ² < x ≤ 5100 m ²	1
100 m ² ≥ x	0

4. Pendientes (grados)

Según Baquero et al (2018) se recomienda que la pendiente para la construcción de un tanque de tormenta no sobrepase el 1% lo que equivale a 0°35'. Sin embargo, se adaptó la limitación a las condiciones de la ciudad y en la escala de medición de indicadores para la ponderación de variables. Por eso, se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella en la que la pendiente del terreno es de cero grados; la adecuada es aquella que se encuentra entre los cero y diez grados; la aceptable es aquella que se encuentra entre los diez y veinte grados y, finalmente, la inaceptable es aquella cuya pendiente es mayor a veinte grados (Tabla 6.).

Tabla 6. Variable Pendientes

Pendientes (grados)	
0 grados	3
0 grados < x ≤ 10 grados	2
10 grados < x ≤ 20 grados	1
20 grados < x	0

5. Profundidad del nivel freático

La profundidad del nivel freático se refiere a la distancia desde la superficie de la tierra a la cual se encuentra la capa superior de agua subterránea o de un acuífero. Por ello, es necesario que la construcción de un tanque de tormenta se realice lo más alejado posible de este nivel para evitar inundaciones dentro de la estructura. Debido a lo anterior, se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella en la que el nivel freático se encuentra a más de seis metros; la adecuada es aquella que se encuentra entre los cinco y seis metros; la aceptable es aquella que se encuentra entre los cuatro y cinco metros y, finalmente, la inaceptable es aquella cuya profundidad está entre los cero y tres metros (Tabla 7.).

Tabla 7. Variable Profundidad del nivel freático

Profundidad del nivel freático	
6 metros < x	3
5 metros < x ≤ 6 metros	2
4 metros < x ≤ 5 metros	1
0 metros < x ≤ 3 metros	0

6. Cercanía a los pozos pluviales

Los pozos pluviales al ser un agujero en el suelo que permite la infiltración de aguas lluvias, es también un punto de acceso a los tanques de tormenta para facilitar el mantenimiento de estas construcciones. Debido a lo anterior es un punto estratégico para un tanque de tormenta contar con la cercanía a un pozo pluvial. Por ello, se adecuó la escala de medición de indicadores para la ponderación de variables, considerando la distancia en metros entre las dos estructuras. Debido a lo anterior, se considera que la ubicación óptima para los tanques de tormenta es aquella en la que la cercanía entre los tanques de tormenta y los pozos pluviales se encuentra a menos de cincuenta metros; la adecuada es aquella que se encuentra entre los cincuenta y cien metros; la aceptable es aquella que se encuentra entre los cien y trescientos metros y, finalmente, la inaceptable es aquella cuya distancia es mayor a trescientos metros (Tabla 8.).

Tabla 8. Variable Cercanía a los pozos pluviales

Cercanía a los pozos pluviales	
$x \leq 50$ metros	3
$50 \text{ metros} < x \leq 100$ metros	2
$100 \text{ metros} < x \leq 300$ metros	1
$300 \text{ metros} < x$	0

En la fase de recopilación de información con los archivos de la reserva documental de la Universidad de los Andes y de entidades territoriales como la Empresa de Acueducto Agua y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se recolectaron los submapas de las variables nombradas. Estos archivos fueron procesados y reclasificados a la escala de medición de indicadores correspondientes según el análisis realizado para cada una de las variables por medio del software ArcGIS. Lo anterior, con el fin de sobreponer las capas en formato raster y con la herramienta *Raster Calculator* se realizó la siguiente ponderación con sumatoria simple:

$$\text{Puntaje capa final} = W1 * C1 + W2 * C2 + \dots Wn * Cn$$

Ecuación 1. Ponderación de variables

W = Porcentaje asignado a cada variable. (Tabla 1)

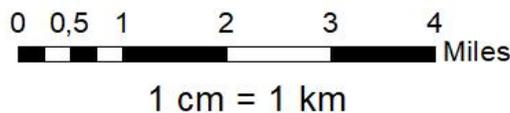
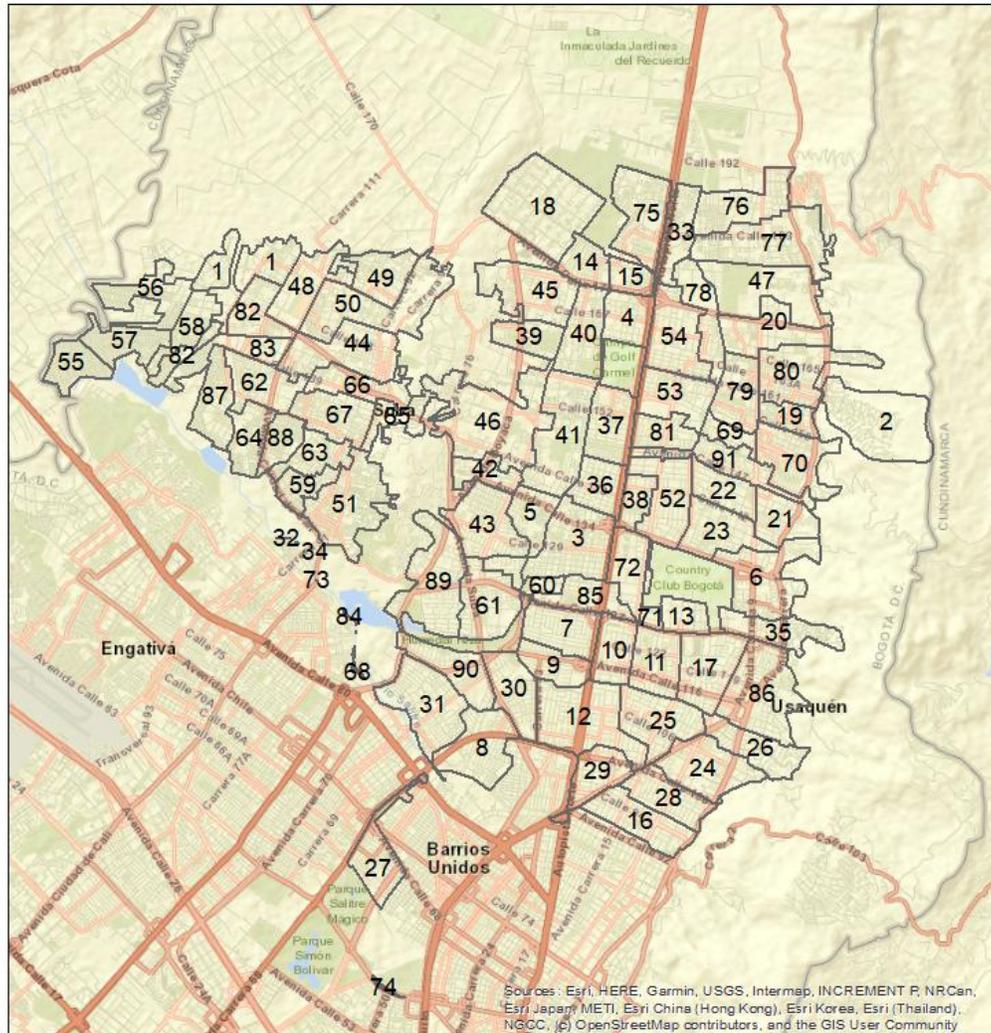
C = Valor en la escala de medición de indicadores para cada variable

Al aplicar la anterior operación con los submapas, cada variable contribuyó con un peso para generar el mapa final que grafica las zonas óptimas para la ubicación de tanques de tormenta en cada Unidad de Gestión de Alcantarillado (UGA). El peso de cada variable se tomó a partir de resultados de estudios previos del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA). Teniendo en cuenta lo anterior, las localizaciones resultantes se reportaron con coordenadas de un punto central del área con la mejor condición para la ubicación de tanques de tormenta por UGA en cada una de las localidades estudiadas.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de identificar las observaciones espaciales para las variables dentro de las Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA), se presenta un mapa guía con la numeración de estas divisiones territoriales dentro de la localidad de Suba, ubicada en el lado occidental de la autopista Norte, y Usaquén, ubicada en el lado oriental de la autopista Norte. Este mapa tiene utilidad para la presente tesis puesto que permite ubicar espacialmente la posición de las UGA para el análisis de las variables. Lo anterior simplifica el proceso de ubicación de los tanques de tormenta y nos permite identificar los límites territoriales para reconocer los agentes de interés a los que se debe recurrir para llevar a cabo esta propuesta de localización de estructuras para la adaptación al cambio climático.

Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) Zona norte de Bogotá



Convenciones



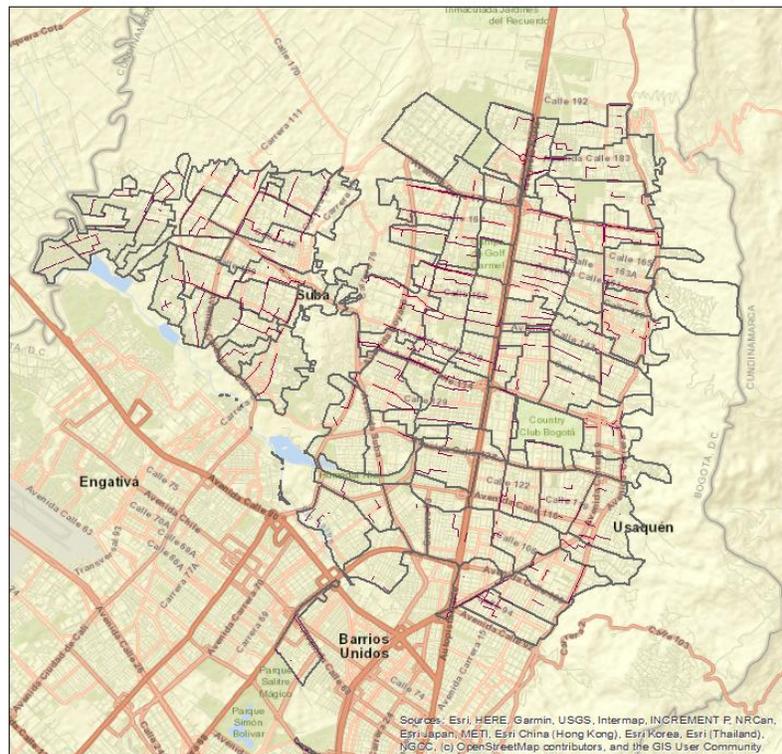
Ilustración 1. Mapa de Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA)

A continuación, se presentan y analizan los mapas generados para cada variable, cuyos valores relacionados determinaron el resultado final para la ubicación ideal de los tanques de tormenta.

- **Sistema de alcantarillado troncal y local (Diámetro tuberías > 1 m)**

Dentro del sistema de alcantarillado troncal y local del norte de Bogotá es posible observar que para tuberías con diámetro mayor o igual a un metro se evidencian tramos muy cortos dentro la red hidráulica, específicamente en cada Unidad de Gestión de Alcantarillado (UGA) hay en promedio dos tramos. Esto significa que la red de alcantarillado de la ciudad cuenta con pocos tramos con tuberías mayores a un metro de diámetro que permiten la correcta ubicación de los tanques de tormenta, con el fin de facilitar el mantenimiento de la estructura. Teniendo en cuenta lo anterior, modificar segmentos de la tubería del sistema de alcantarillado por una de mayor diámetro ayudaría a generar más ubicaciones para los tanques de tormenta.

Red de alcantarillado troncal y local
(Diámetro tuberías > 1 m)
Zona norte de Bogotá



Convenciones

-  UGA
-  Red de alcantarillado troncal y local (Diámetro tuberías > 1 m)

0 0,5 1 2 3 4 Miles

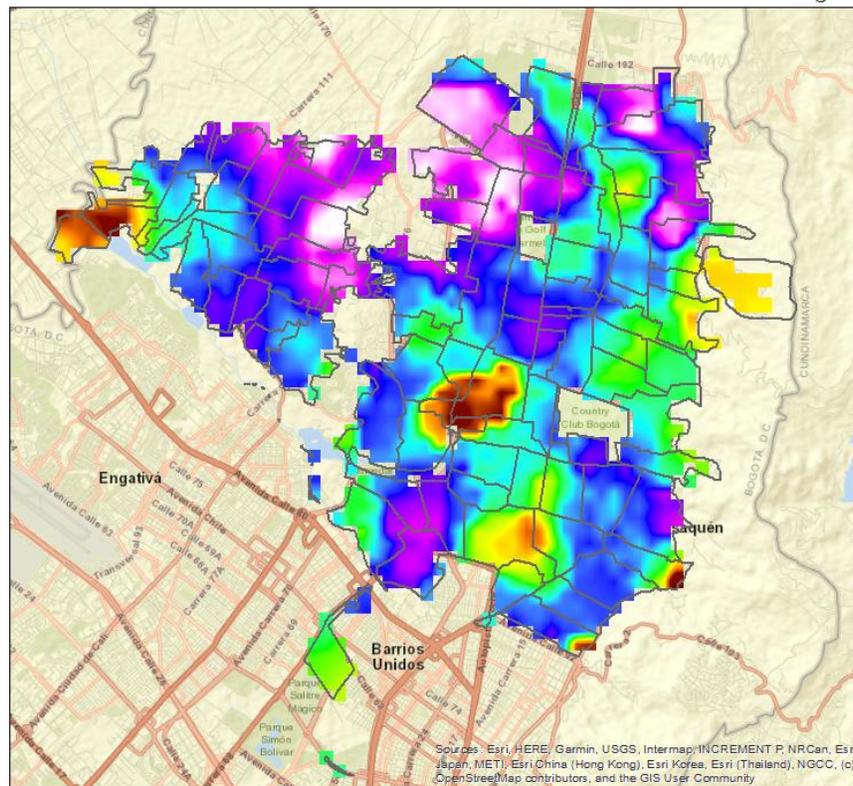
1 cm = 1 km

Ilustración 2. Mapa Red de alcantarillado

- **Profundidad del nivel freático**

El mapa de la profundidad del nivel freático señala que, siguiendo la ruta sobre la autopista hacia la zona norte de las localidades de Suba y Usaquén, las aguas subterráneas se encuentran más cercanas a la superficie del terreno. Esta variable es importante puesto que en la zona norte hay un riesgo de inundaciones en contraste con la zona sur como consecuencia a la cercanía del terreno con la superficie del nivel freático, lo cual afecta la utilidad de los tanques de tormenta.

Profundidad del nivel freático en metros Zona norte de Bogotá



Convenciones

 UGA

Profundidad del nivel freático (metros)

Value

 High : 6,97962

 Low : 0,935895

0 0,5 1 2 3 4 Miles

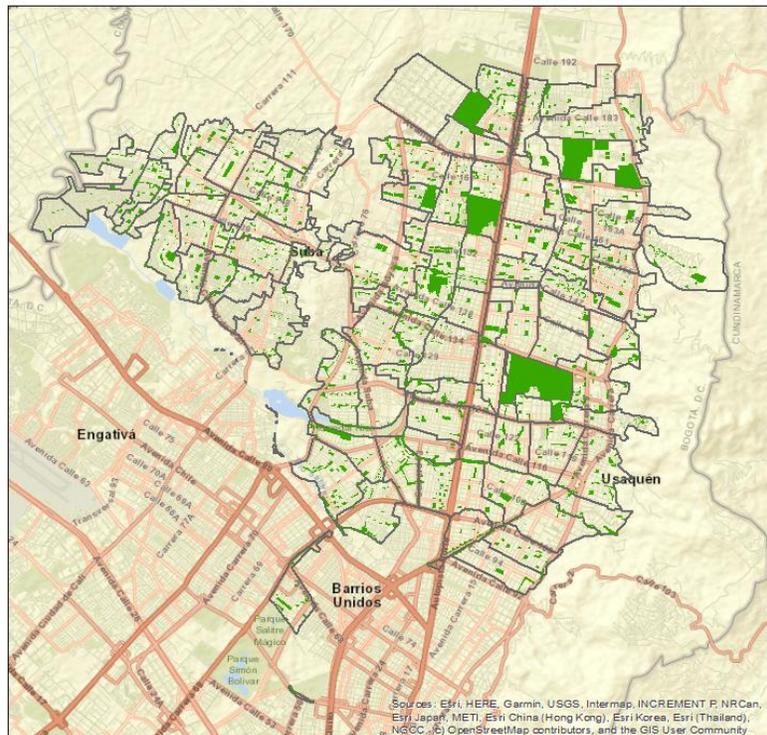
1 cm = 1 km

Ilustración 3. Mapa Profundidad del nivel freático

- **Áreas de parques y zonas verdes**

Los parques y zonas verdes se concentran principalmente alrededor de la Autopista Norte. Las áreas más extensas de este tipo son el Club El Country, al oriente de la autopista, y Carmelo Club Campestre, al occidente de la autopista. Ahora bien, teniendo en cuenta los parámetros para la ubicación de tanques de tormenta, las zonas verdes son ideales para su ubicación, por ende, es probable que las localizaciones nombradas y los espacios de parques, coincidan con las ubicaciones finales para los tanques de tormenta. Sin embargo, como se mencionó en el punto de la metodología, no se posee suficiente información de dichas zonas debido a la dificultad para el acceso a la información.

Área de parques y zonas verdes
Zona norte de Bogotá



Convenciones

-  UGA
-  Parques y zonas verdes

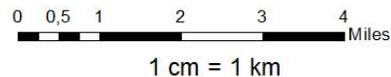
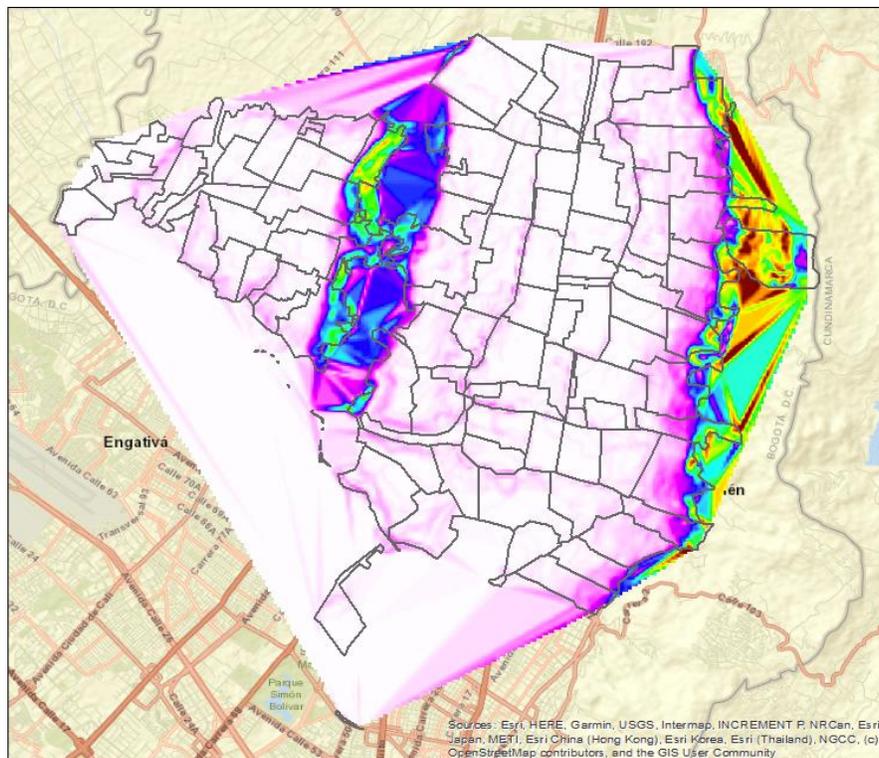


Ilustración 4. Mapa Áreas de parques y zonas verdes

- **Pendiente del terreno**

El mapa de la pendiente en grados del terreno muestra que hacia la zona oriental de la localidad de Usaquén se encuentra la mayor inclinación, esto se atribuye a la cadena montañosa de los Cerros Orientales. Esto se presenta como un contraste con los demás espacios de la zona norte de Bogotá D.C., cuya pendiente es baja y en la zona intermedia de la localidad de Suba donde se identifica un aumento medio de la pendiente. Lo anterior es importante para la ubicación de tanques de tormenta, puesto que se espera instalar estas estructuras en terrenos planos, es decir, con baja pendiente, para aprovechar el máximo volumen de los tanques de tormenta.

Pendiente del terreno en grados Zona norte de Bogotá



Convenciones

 UGA

Pendiente del terreno (grados)

Value

 High : 36,5355

 Low : 0



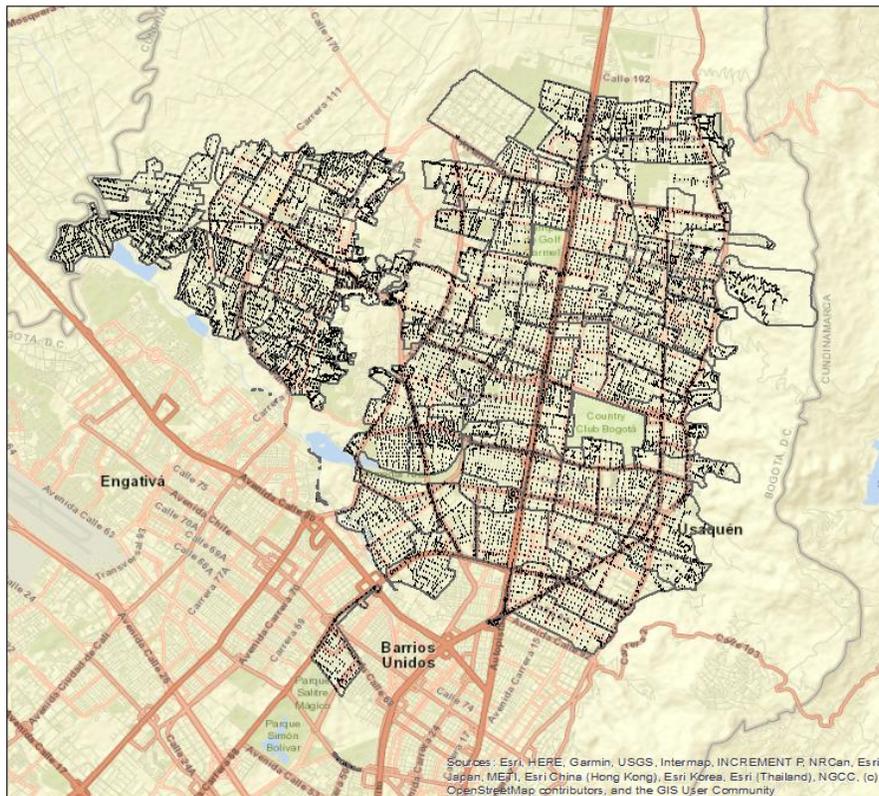
1 cm = 1 km

Ilustración 5. Mapa Pendiente del terreno

- **Pozos pluviales**

El valor de la cercanía de los tanques de tormenta con los pozos pluviales, es la facilidad que brindan estos accesos al sistema de alcantarillado para el mantenimiento de los tanques. Sin embargo, debido a la abundante presencia de pozos pluviales a lo largo de la zona norte de Bogotá D.C., se considera que esta no es una variable determinante para la ubicación de tanques de tormenta, ya que se brindan condiciones similares en cualquier punto del área para la ubicación de estas estructuras.

Pozos pluviales Zona norte de Bogotá



Convenciones

- UGA
- Pozos Pluviales

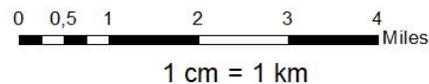


Ilustración 6. Mapa Pozos pluviales

- **Usos de suelos**

El mapa de *Usos de suelos* para la zona norte de la ciudad de Bogotá D.C, presenta mayoritariamente terrenos con ocupación residencial. A la anterior vocación del suelo, le precede espacios sin construcciones, zonas oficiales y comerciales. Por ello, es necesario tener en cuenta esta división de usos de suelos para identificar *zonas verdes* y *áreas sin construir* para la ubicación de tanques de tormenta ya que estos espacios no requieren una alta intervención con el fin de preparar el terreno para la ubicación de estas estructuras hidráulicas.

Usos de suelos Zona norte de Bogotá

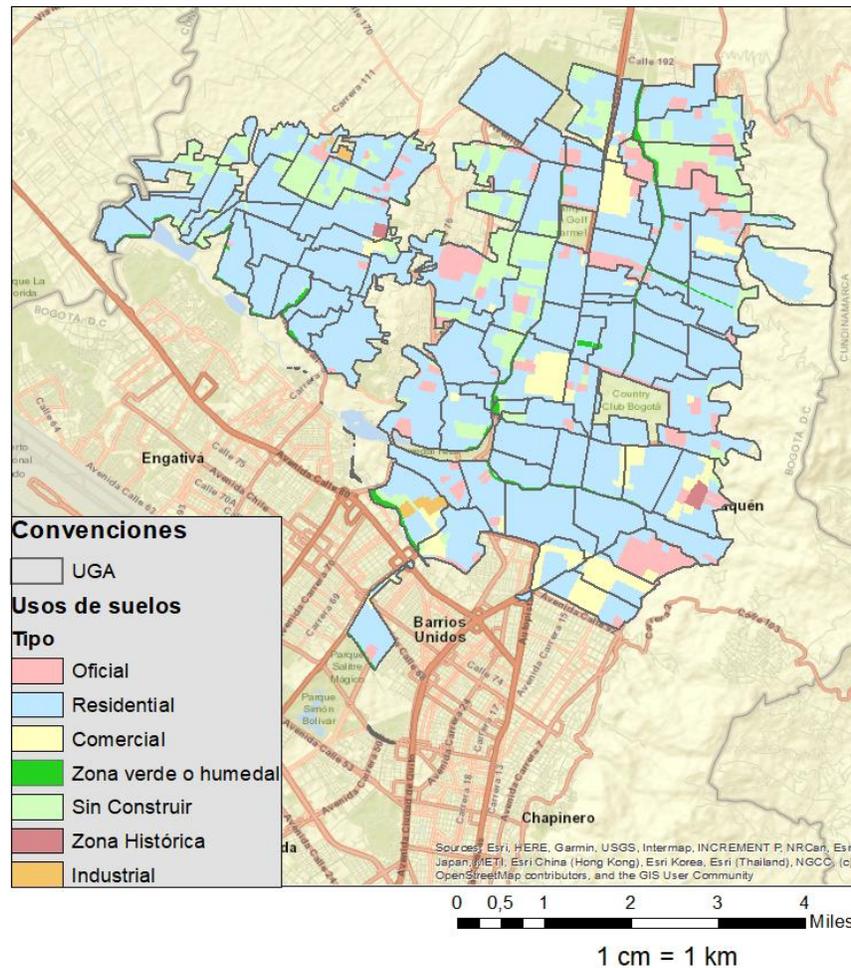


Ilustración 7. Mapa Usos de suelos

Después de realizar el tratamiento metodológico, contenido en la sección número tres con los submapas de cada variable, se generó un mapa de la zona norte de Bogotá con información geográfica sobre las localizaciones óptimas para la ubicación de los tanques de tormenta. La lectura de las localizaciones se realizó a través de una escala numérica, diferenciada en una gama de colores y agrupada en tres categorías. La primera categoría contiene el intervalo de valores entre 35 y 120 considerada con viabilidad *baja* para la ubicación de tanques de tormenta; la segunda categoría, con valores mayores a 120 hasta 165, hace referencia a localizaciones con viabilidad *media* para la ubicación de tanques de tormenta; y, finalmente, la tercera categoría con intervalo de valores mayores a 165 hasta 240 está relacionado con las áreas con las condiciones más favorables para la ubicación de tanques de tormenta. La anterior clasificación se representa en la Tabla 9.

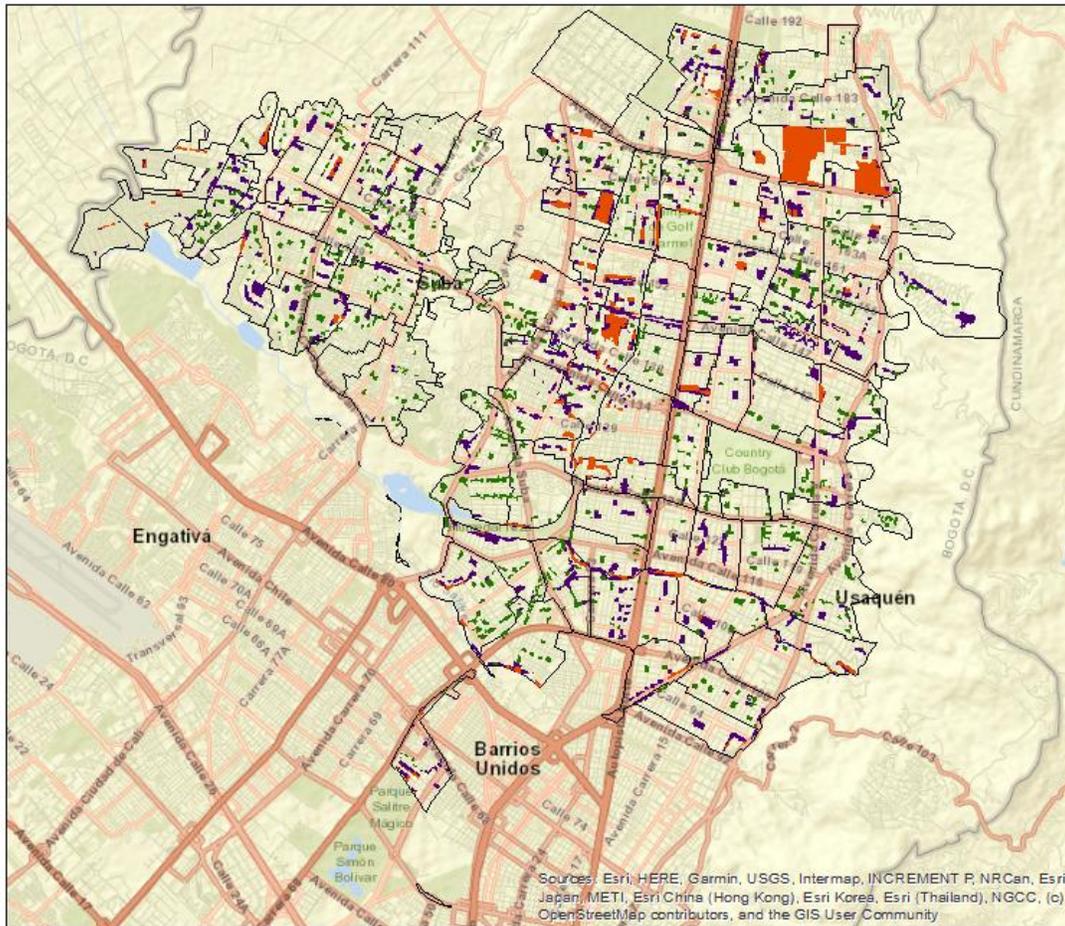
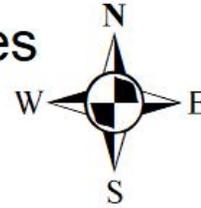
Tabla 9. Categorización de variables

Categoría	Descripción	Intervalo de valores
Alta	La categoría presenta características ideales para la ubicación de tanques de tormenta	165 - 240
Media	La categoría presenta viabilidad media para la ubicación de tanques de tormenta	120 - 165
Baja	La categoría presenta viabilidad baja para ubicar tanques de tormenta	35 - 120

De la misma manera esta clasificación se puede observar en las convenciones del mapa final que se presenta a continuación:

Áreas para la ubicación de tanques de tormenta por categorías.

Zona norte de Bogotá



Convenciones

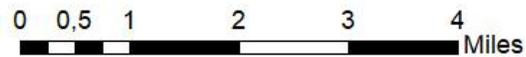
 UGA

Categorías

 Baja

 Media

 Alta



1 cm = 1 km

Ilustración 8. Mapa final - Áreas para la ubicación de tanques de tormenta

Con el fin de analizar de manera más detallada las localizaciones ideales para los tanques de tormenta, se estudió las ubicaciones por localidad y UGA.

- **Localidad de Suba**

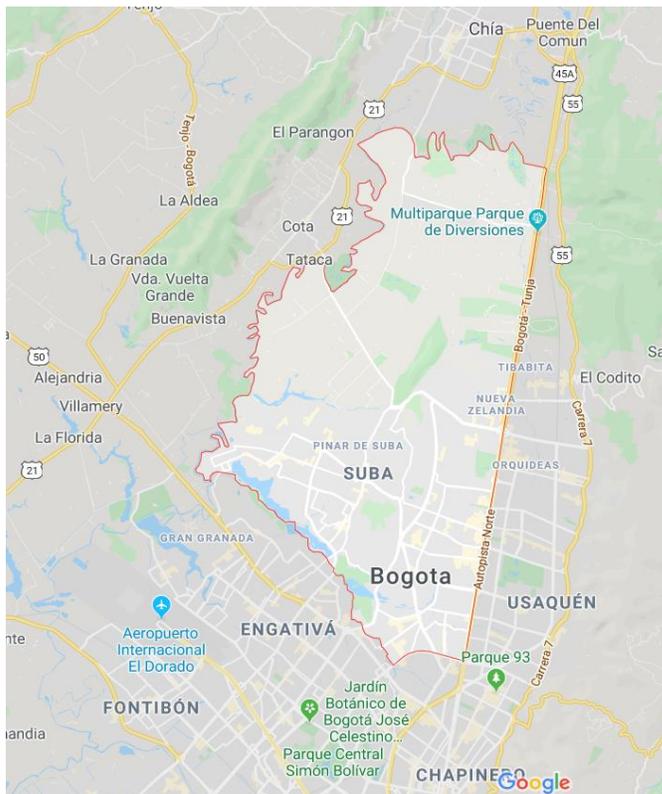


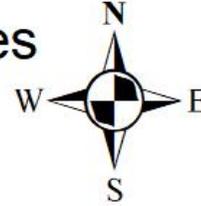
Ilustración 9. Mapa de la localidad de Suba.

Tomado de: <https://www.google.com/maps/@4.6782408,-74.0491421,11z>

Según la página de la Alcaldía de la capital (s.f) “Suba está en el norte de Bogotá. Se destaca por sus zonas verdes, sobre todo en los cerros de Suba y La Conejera, aunque tiene una vasta zona residencial, mezclada con industrias, comercio y servicios. Se destaca por ser la más poblada con más de un millón de habitantes”. Además, cuenta con 935 parques y escenarios públicos deportivos.

Para esta localidad, la ponderación de los submapas de las variables generó dos sitios estratégicos para el posicionamiento de los tanques de tormenta. Una de estas estructuras está en la UGA número 39 y la otra en la UGA número 41. La posición geográfica de estos puntos se observa en el mapa y en la tabla siguiente se brinda información del número de UGA en el que están ubicados, el número de sitios estratégicos dentro de cada UGA y, por último, la localización del terreno entre calles y carreras.

Áreas para la ubicación de tanques de tormenta por categorías. Localidad Suba - Bogotá



Convenciones

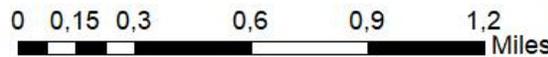
 UGA

Categorías

 Baja

 Media

 Alta



1 cm = 0 km

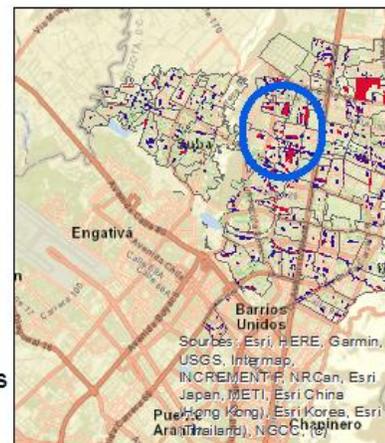


Ilustración 10. Áreas para la ubicación de tanques de tormenta - Localidad de Suba

Tabla 10. Localización de los tanques de tormenta - Localidad de Suba

Localidad	Número de UGA	Número de sitios estratégicos	Localización en medio de:
Suba	39	1	Calle 160 - 165a
			Carrera 57 - 58c
	41	1	Calle 160 - 165a
			Carrera 57 - 58c

Por último, el cumplimiento de las características de las áreas verdes para la localización de los tanques de tormenta se verificó a través de imágenes satelitales obtenidas mediante el programa computacional *Google Earth Pro*, a pesar que estos espacios tienen un nivel freático en algunas zonas inaceptable y en otras aceptable. Lo anterior, permite inferir que hubo mayor peso de otras variables cuya puntuación fue óptima respecto a la del nivel freático en estas áreas.

Tabla 11. Imágenes satelitales ubicaciones tanques de tormenta – Localidad de Suba


- **Localidad de Usaqué**



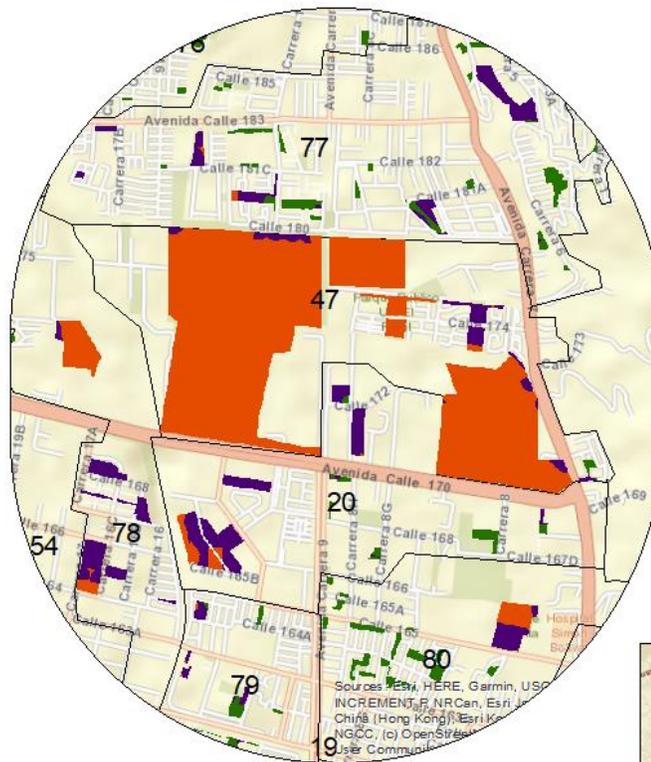
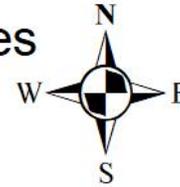
Ilustración 11. Mapa de la localidad de Usaqué.

Tomado de: <https://www.google.com/maps/@4.6782408,-74.0491421,11z>

Por otro lado, según la página de la Alcaldía de la capital (s.f) “Usaqué está ubicada en el norte de Bogotá. En el pasado fue asiento de extensas haciendas, hoy convertidas en urbanizaciones y centros comerciales. Una gran parte de la zona Este comprende los cerros orientales de la ciudad”. Cabe agregar que en esta localidad hay 20007 establecimientos comerciales y 152 sedes de colegio.

La ponderación de los submapas de las variables para la localidad de Usaqué produjo tres ubicaciones estratégicas para el posicionamiento de los tanques de tormenta. De la misma forma que la localidad de Suba, para Usaqué las posiciones geográficas de las localizaciones ideales para los tanques de tormenta se observan en la Ilustración 8. Adicionalmente, en la Tabla 12. se brinda información del número de UGA en el que está ubicada, el número de zonas dentro de cada UGA y, por último, la localización entre calles y carreras.

Áreas para la ubicación de tanques de tormenta por categorías. Localidad Usaquén - Bogotá



Convenciones

 UGA

Categorías

 Baja

 Media

 Alta

0 0,1250,25 0,5 0,75 1 Miles

1 cm = 0 km

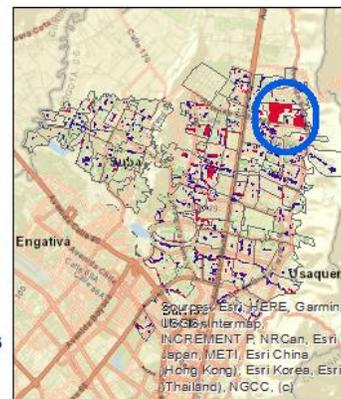


Ilustración 12. Áreas para la ubicación de tanques de tormenta - Localidad de Usaquén

Tabla 12. Localización de los tanques de tormenta - Localidad de Usaquén

Localidad	Número de UGA	Número de sitios estratégicos	Localización en medio de:
Usaquén	47	1	Calle 170-180
			Carrera 9 -15
		2	Calle 175-180
			Carrera 7d -9
		3	Calle 170-173
			Carrera 7 -8

Tal como se realizó en la localidad de Suba, para Usaquén se verificó las ubicaciones para los tanques de tormenta. Las imágenes satelitales muestran zonas verdes con características ideales para la localización de estas estructuras, a pesar de que el mapa del nivel freático presenta un nivel aceptable en esta zona.



Ilustración 13. Imágenes satelitales ubicaciones tanques de tormenta – Localidad de Usaquén

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el propósito de presentar las conclusiones de esta tesis de manera estructurada se abarcan en primer lugar los hallazgos por cada localidad y al final, de forma general respecto a la metodología y los resultados para la localización de tanques de tormenta obtenidos en la zona norte de Bogotá.

Respecto a la localidad de Suba, las localizaciones ideales para la ubicación de tanques de tormenta son dos áreas dentro de las UGA 39 y 41, por ende, en número son menos que Usaquén. Sin embargo, debido a que la localidad con mayor extensión para esta tesis es Suba, es posible observar en la Ilustración 8 pequeñas áreas en categoría alta, es decir, en el sistema de clasificación propuesto, estos espacios presentan características ideales para la ubicación de tanques de tormenta. También, cabe destacar que las localizaciones ideales para los tanques de tormenta se encuentran muy cercanas a la autopista norte, lo cual coincide con espacios residenciales y de estrato socioeconómico mayor al resto de la localidad, lo que presupondría que en estas zonas con esas características específicas hay mayor disponibilidad de áreas verdes como espacios de recreación y esparcimiento para la comunidad.

A pesar que la localidad de Usaquén es de menor tamaño que Suba, presenta tres localizaciones ideales para la ubicación de tanques de tormenta dentro de la UGA 47, cuya área es mayor que las resultantes en las UGA 39 y 41 de la localidad de Suba. Lo anterior, se puede deber a la vocación de uso del suelo de esta localidad para la ubicación de haciendas en el pasado, predominio de zonas verdes y cercanía a los cerros orientales.

Por otro lado, se encontró que existen áreas resultantes con presencia de zonas verdes extensas y sin construir, como los terrenos del Club El Country y Carmel Club Campestre que debido a su gran área verde se sugieren como ubicaciones ideales para tanques de tormenta. Esta suposición se puede comprobar aplicando la metodología presentada sobre los mapas de variables de estos espacios. No obstante, este análisis no se reporta en esta tesis, debido a la dificultad para el acceso a la información de estos terrenos privados. Teniendo en cuenta lo anterior, y como recomendación sobre el proceso de obtención de información, se necesitan mapas de variables con información actualizada y cuyo acceso sea facilitado por las autoridades pertinentes.

Adicionalmente, considerando el riesgo de inundación en estas localidades, la distribución baja de espacios ideales para la ubicación de tanques de tormenta y la amplia extensión de la localidad de Suba y Usaquén, requieren con urgencia aumentar las zonas con características ideales para la ubicación de tanques de tormenta. Es decir, que los espacios ideales para la localización de estas estructuras hidráulicas deben seguir las siguientes condiciones para su ubicación: áreas verdes y/o

sin construir, cercanas a tuberías mayores a un metro del sistema de alcantarillado y pozos pluviales, terreno de baja pendiente y lejano a la superficie del nivel freático.

6 REFERENCIAS

- Alcaldía de Bogotá (s.f). Localidad de Suba. Enero 13, 2020. Sitio web: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/suba>
- Alcaldía de Bogotá (s.f). Localidad de Usaquén. Enero 13, 2020. Sitio web: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/localidades/usaquen>
- Ayesa, A. (2006). Tanques de tormenta. *Retema: Revista técnica de medio ambiente*, 19(114), 64-67. <https://www.hidrostank.com/downloads/016.1-Tanques-de-tormenta.pdf>
- Baquero, L. & Vanegas, W. (2018). Optimización del sistema de alcantarillado pluvial de la carrera doce entre las calles sexta y primera en el municipio de Chía-Cundinamarca, diseñando un tanque de tormenta, con el fin de minimizar inundaciones. Noviembre 22 del 2019, de Universidad Católica de Colombia. Sitio web: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22380/1/ARTICULO%20CIENTIFICO%20DE%20LA%20TESIS.pdf>
- Desinventar (s.f). Sistema de Inventario de Desastres. Diciembre 7 del 2019, de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED). Sitio web: <http://online.desinventar.org/desinventar/#COL-20180227192609/>
- García, M., Piñeros, A., Bernal, F. & Ardila, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Diciembre 4 del 2019, de IDEAM. Sitio web: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a12.pdf>
- HSBC. (2018). Fragile Planet. Agosto 22 del 2019, de HSBC Centre of Sustainable Finance Sitio web: <https://www.sustainablefinance.hsbc.com/-/media/gbm/reports/sustainable-financing/fragile-planet.pdf>
- IDEAM. (2017). Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático en Colombia: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Agosto 22, 2019, de IDEAM. Sitio web: <http://documentacion.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=38186>
- Reyes, M, & Rubio, J. (2014). Descripción de los sistemas de recolección y aprovechamiento de aguas lluvias. Agosto 22 del 2019, de Universidad Católica de Colombia Sitio web: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2089/1/Recoleccion-aguas.pdf>
- Saldarriaga, J., Camilloni, I., Cumha, M., Iglesias, P., Martínez, F., & Paez, D. (2014). Drenaje urbano y cambio climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro. Bogotá: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J., Camilloni, I., Bohorquez, J., Páez, D. & Uribe, M. (2014). Determinación de eventos de Precipitación en ciudades colombiana con escenarios de Cambio Climático. Bogotá: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J., Camilloni, I., Bohorquez, J., & Paez, D. (2014). Validación de modelos climáticos globales para la determinación de eventos extremos de precipitación en Colombia. Bogotá: Universidad de los Andes.

Saldarriaga, J., Ngamalieu, U., Iglesias, P., & Martinez, F. (2014). Rehabilitación de redes de drenaje mediante la combinación de tanques de retención y sustitución de conducciones. Bogotá: Universidad de los Andes.

Secretaria Distrital de Planeación de Bogotá, (s.f). Concepto de uso del suelo. Noviembre 4 del 2019. Sitio web: <http://www.sdp.gov.co/transparencia/tramites-servicios/concepto-de-uso-del-suelo>

UNESCO. (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: agua y empleo. Agosto 22, 2019, de WWAP-UNESCO. Sitio web: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244103>