

Propuesta metodológica para la evaluación de la probabilidad de falla por obstrucciones causadas por eventos de lluvias en la infraestructura de alcantarillado, Caso cuenca La Picacha, Medellín

JOHNNY ALEJANDRO RUIZ GALLÓN



ASESOR: Libardo Antonio Londoño Ciro

CO-ASESOR: Lina Julieth Cano Casas

Universidad de Antioquia

Faculta de ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín Colombia

2018

CONTENIDO

CONTENIDO	2
GLOSARIO	3
1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
1.1. Objetivo General	7
1.2. Objetivos Específicos.....	7
3. ESTADO DEL ARTE.....	8
4. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	13
5. METODOLOGIA	14
5.1. Identificación de variables y fuentes de información.	15
5.2. Preparación de los datos.....	19
5.3. Aplicación de funciones de análisis espacial.	19
5.4. Superposición de capas	20
5.5. Mapificación del riesgo.....	25
5.6. Desarrollo del modelo espacial.	27
6. RESULTADOS Y DISCUSION.	31
7. CONCLUSIONES	37
8. RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
10. BIBLIOGRAFÍA	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación cuenca la Picacha, Fuente: elaboración propia	13
Figura 2. Fases desarrolladas durante la metodología, fuente elaboración propia	14
Figura 3. Identificación de variables, Fuente elaboración propia	15
Figura 4. Pasos para la preparación de datos. Fuente elaboración propia	19
Figura 5. Analisis espacial de las variables identificadas. Fuente elaboración propia	20
Figura 6. Clasificación por niveles de criticidad. Fuente elaboración propia.....	21
Figura 7. Mapificación del riesgo. Elaboración propia.....	26
Figura 8 Propuesta metodológica para determinar el riesgo de obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado	28
Figura 9. Resultado del desarrollo del modelo.	32
Figura 10. Comparación entre resultado y las cuatro variables con mayor peso en el modelo	33
Figura 11 Resultado del modelo y selección 5 zonas con mayor riesgo de obstrucción.	34
Figura 12. Reporte de obstrucciones 2014-2019	35
Figura 13. Comparación de las zonas 6,7 y 8 entre los reportes reales y las variables que reportaron algún tipo de novedad	36

GLOSARIO

ALCANTARILLADO DE AGUAS COMBINADAS. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte, de aguas residuales y de aguas lluvias conjuntamente.

ALCANTARILLADO DE AGUAS LLUVIAS. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de aguas lluvias (provenientes de la precipitación).

ALCANTARILLADO DE AGUAS RESIDUALES. Sistema compuesto por todas las instalaciones destinadas a la recolección y transporte de las aguas residuales domésticas y/o industriales.

ALCANTARILLADO SEPARADO. Sistema constituido por un alcantarillado de aguas residuales y, otro de aguas lluvias que recolectan en forma independiente en un mismo sector.

ALIVIADERO. Estructura diseñada en colectores de alcantarillado combinado, con el propósito de separar los caudales que exceden la capacidad del sistema y conducirlos a un sistema de drenaje de agua lluvia.

ÁREA TRIBUTARIA. Superficie que drena hacia un tramo o punto determinado.

COLECTOR. Conducto cerrado circular, semicircular, rectangular, entre otros, sin conexiones domiciliarias directas que recibe los caudales de los tramos secundarios, siguiendo líneas directas de evacuación de un determinado sector.

CCTV. Circuito Cerrado de Televisión empleado para la inspección de las redes de alcantarillado.

CONEXIONES ERRADAS. Contribución adicional de caudal debido al aporte de aguas pluviales en la red de aguas sanitarias y viceversa

COTA DE BATEA. Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.

COTA DE CLAVE. Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.

MANHOLE O CÁMARA DE INSPECCIÓN (MH). Estructura de ladrillo o concreto, de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma troncocónica, y con tapa removible que permite la ventilación, el acceso y el mantenimiento de los colectores.

SISTEMAS DE ALCANTARILLADO. es un sistema de estructuras y tuberías usado para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvia, (alcantarillado pluvial) desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten al cauce o plantas de tratamiento. Los sistemas de alcantarillado pueden ser residuales, aquellos que solo recogen aguas de este tipo, pluviales o de lluvia y los alcantarillados combinados, aquellos que recogen y transportan aguas residuales y lluvias simultáneamente.

SIGMA: Base de datos del sistema de acueducto y alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín.

TRAMO. Red de alcantarillado comprendida entre dos cámaras de inspección o entre una cámara y una descarga o aliviadero.

TUBO Ó TUBERÍA. Conducto prefabricado, o construido en sitio, de concreto, concreto reforzado, plástico, polietileno, asbesto-cemento u otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumple con las normas técnicas correspondientes. Por lo general su sección es circular.

1. INTRODUCCIÓN.

Con el constante aumento de la población urbana se ve la necesidad de generar infraestructura nueva y actualizar y/o modificar la existente, lo que demanda una planificación y optimización de los recursos existentes, a tal punto que se han creado nuevas tecnologías para impactar lo menos posible la calidad de vida de sus habitantes. En este sentido, la movilidad y acceso a los servicios básicos están ligados directamente con el desarrollo de las grandes ciudades, pero cuando la infraestructura asociada a estos servicios se deteriora o fallan por condiciones internas o externas del entorno, surge la necesidad de realizar reparaciones o reposiciones que pueden afectar directa e indirectamente a todos los pobladores. Estas afectaciones pueden ir desde la suspensión de uno o más de los servicios básicos hasta la pérdida de tiempo por la inmovilidad en el sistema de transporte. Por lo anterior, se ha generado la necesidad de desarrollar estrategias que mitiguen o eviten el colapso de cualquier infraestructura necesaria para el desarrollo económico y cultural de la ciudad.

Partiendo de lo anterior, la presente monografía busca proponer una metodología basada en sistemas de información geográfica (SIG) e información secundaria para determinar el riesgo de obstrucción en el sistema de alcantarillado y así poder planear mantenimientos preventivos que mitiguen el posible impacto por el colapso del sistema.

Para lograr el objetivo principal de la propuesta metodología, es necesario realizar un análisis de los trabajos desarrollados por diferentes autores y que hacen referencia especialmente a la atención urgente del sistema de alcantarillado y a los potenciales riesgos a los cuales están sometidos, posteriormente se identificarán las principales variables que afectan el modelo y que a juicio de expertos pueden tener una afectación mayor o menor en el desarrollo éste, paso seguido se explican las diferentes etapas y herramientas geomáticas en las que se desarrolló el modelo espacial y los criterios establecidos para determinar el riesgo en la infraestructura existente; finalmente se hará la comparación de los resultados con los reportes de obstrucciones en la zona de estudio y así presentar las conclusiones y recomendaciones para la posible implementación del modelo.

2. OBJETIVOS.

1.1. Objetivo General

Diseñar una propuesta metodológica basado en SIG para determinar la probabilidad de falla por obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado causadas por eventos de lluvia.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar las variables y procesos involucrados en una evaluación geomática de un área con problemas de obstrucciones.
- Caracterizar los criterios de clasificación del riesgo de obstrucción en la infraestructura de alcantarillado en una zona de estudio.
- Analizar la estructura de los procesos geomáticos que permiten modelar el cambio en la funcionalidad y estado de la infraestructura de alcantarillado debido a las obstrucciones causadas por un evento de lluvia.
- Implementar un piloto a partir de información secundaria para probar la propuesta metodológica.

3. ESTADO DEL ARTE

Con el desarrollo de las ciudades se ha incrementado la impermeabilidad de los suelos y ante eventos de precipitación la mayor parte de esta se transforma en escorrentía y esta llega a las redes de alcantarillado, por lo que la infraestructura se ve sometida a trabajar bajo condiciones extremas y es susceptible de ser afectada con cualquier alteración de sus propiedades, lo que genera impactos significativos en las comunidades, el ambiente y en la movilidad. Adicionalmente, debido al envejecimiento de las redes y las prácticas inadecuadas de gestión de activos, los sistemas de alcantarillado de muchas de las ciudades del mundo están en un estado que demanda atención urgente (Baah, Dubey, Harvey, & McBean, 2015)

Durante varios años las fallas en sistemas de alcantarillado ha sido sujeto de investigación intensiva, y de allí se puede determinar que existen dos tipos de predicciones: la basada en las tuberías individuales y la basada en toda la red (grupo); para el primer tipo de predicción los métodos de inteligencia artificial son ampliamente utilizados, mientras que para el segundo tipo la minería de datos es utilizada para predecir cuales tuberías son más propensas a sufrir cualquier tipo de fallo. Carvalho (2015) utilizó diferentes técnicas para ello, como los árboles de decisión y algoritmos como las regresiones logísticas.

(Chughtai & Zayed, 2008) propusieron un marco de referencia para la predicción de la condición de las redes de alcantarillado teniendo en cuenta la clase de material, el material del lecho de la tubería, la categoría de las vías, entre otros, para identificar los factores físicos, operacionales y ambientales que contribuyen al deterioro de las tuberías; estos autores desarrollaron un modelo de regresión para generar curvas de deterioro de las redes de alcantarillado y de esta forma representar la relación entre el estado de las tuberías de concreto, asbesto cemento y PVC con la edad de la tubería; pero se debe tener en cuenta que la efectividad de los modelos de predicción depende directamente de la calidad de los datos recolectados y en la selección de las variables.

Teniendo en cuenta las diferentes variables que afectan directa o indirectamente el sistema de infraestructura, las decisiones en la planeación de la rehabilitación urbana de redes de agua tienen impactos a largo plazo en la funcionalidad y calidad de los servicios futuros prestados, las cuales

pueden ser asistidas por diferentes metodologías como la depreciación de los activos, modelos de evaluación de la probabilidad de falla o análisis multicriterio.

Los métodos multicriterio califican cada uno de los criterios seleccionados mediante una escala numérica, que refleja la importancia del criterio. El método más utilizado según la revisión realizada por (Tscheikner-Gratl, Egger, Rauch, & Kleidorfer, 2017) es el Método de Jerarquías Analíticas propuesto por T.L. Saaty a finales de los años 70; las ventajas de este método son la posibilidad de usar criterios cuantitativos y cualitativos, lo cuales son utilizados para una gran variedad de campos de investigación. Con ello se pueden identificar problemas estructurales, obtener una visión integral de los problemas, sus posibles soluciones y la documentación de las hipótesis, criterios y valores asumidos, pero entre las desventajas se encuentra la pérdida de información debido a los efectos potenciales de las calificaciones dadas a las variables y los elevados tiempos de implementación dependiendo de la cantidad de variables a evaluar, lo que aumenta la complejidad del modelo. Por lo anterior la selección del método a utilizar para la evaluación y posterior calificación de las variables depende principalmente de la calidad de información disponible, de los recursos en tiempo y en personal; por ello es recomendable usar métodos simples cuando no se tenga una alta calidad de datos y no se cuente con estos recursos.

La integración entre los SIG y el análisis multicriterio han permitido generar herramientas para gestionar las redes de alcantarillado e identificar los riesgos por obstrucciones. La gestión del riesgo es una herramienta que puede ayudar a priorizar los recursos para un mejor manejo y rehabilitación de los sistemas de agua residual. (Baah et al., 2015) elaboraron una matriz de riesgo y una matriz de decisión multicriterio de pesos ponderados para evaluar la consecuencia y el riesgo de falla para una ciudad intermedia de aproximadamente 120.000 habitantes usando ArcGIS, como resultado de este estudio encontraron que el 6% de las redes no inspeccionadas presentaban una alta consecuencia de falla mientras el 4% de las tuberías tenían un alto riesgo de falla, con lo que pueden establecer prioridades de inspección. El mapa resultante de esta evaluación, que involucra el riesgo de falla de la tubería y la consecuencia es una herramienta que facilita la planeación futura, la rehabilitación y los programas de mantenimiento en los sistemas de alcantarillado.

Con el desarrollo de las herramientas SIG, los métodos para gestionar las redes de alcantarillado se han diversificado y optimizado. Unos de los enfoques utilizados ha sido la lógica difusa la cual se desarrolla para evaluar el riesgo del transporte de materiales peligrosos por carretera y tuberías y así evaluar la incertidumbre de los riesgos sociales e individuales. (Inanloo, Tansel, Shams, Jin, & Gan, 2016) desarrollaron una propuesta en el 2016 para el centro de Miami, Florida; para en la cual evaluaron y visualizaron la vulnerabilidad de las redes de alcantarillado basado en las características individuales de las tuberías, la probabilidad de falla, las consecuencias de la falla y las interacciones con otras redes, la metodología fue desarrollada para evaluar y cuantificar las interacciones entre diferentes redes de infraestructura, identificar y visualizar áreas vulnerables, aplicables tanto para redes de agua potable como para redes de alcantarillado, utilizando para ello ArcMap. En este modelo se analizó del riesgo cuantitativo y se evaluó en términos de la vulnerabilidad individual de cada tubería, y sus interacciones con otras redes, con el área de servicio, entre otros, en conclusión, el análisis espacial y la visualización de las zonas afectadas que resultaron de la implementación de esta metodología son un aspecto de valor agregado para los decisores que tengan acceso a esta información.

La implementación de estudios de gestión del riesgo en los cuales se identifiquen las áreas críticas es de gran importancia. Dado que el riesgo es función de la probabilidad y la consecuencia de falla, este análisis se realiza en las tuberías individualmente, para ello se requiere asignar calificaciones del desempeño a variables previamente identificadas, la cual se realizará mediante una formulación del problema, elección de expertos, elaboración y lanzamiento de los cuestionarios y finalmente el desarrollo práctico y explotación de resultados basada en el conocimiento de expertos en la materia. (Astigarraga, 2003).

Las obstrucciones son uno de los mayores incidentes que ocurren en las redes de alcantarillado y representan un alto costo para las empresas de servicios públicos y son responsables de inundaciones, interrupciones en el servicio, afectación a la salud pública y contaminación de fuentes hídricas, lo que se resume en sobrecostos, impacto ambiental y afectación a la calidad de vida de los habitantes. Con el fin de mitigar estos problemas, algunas empresas de servicios públicos han direccionado sus prácticas hacia el mantenimiento preventivo de las redes de alcantarillado y de esta manera reducir los costos de mantenimiento correctivo (Bailey et al., 2015).

Las causas de las obstrucciones identificadas por (Bailey et al., 2015) en Gales y parte de Inglaterra estaban divididas en las obstrucciones crónicas causadas especialmente por grasas, aceites y sedimentos, y las obstrucciones agudas o repentinas generadas por trapos y toallas; en su trabajo utilizaron técnicas de minería de datos para encontrar patrones en la ocurrencia de obstrucciones y como resultado de estos análisis se encontraron que las tuberías más pequeñas, más antiguas y más cortas, localizadas en áreas densamente pobladas están relacionadas con una mayor tasa de obstrucción. Adicionalmente, proponen como variables que deben ser estudiadas en investigaciones posteriores, como los datos de inspecciones con Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), datos históricos de bloqueos, lluvias e información del mantenimiento preventivo.

En otro modelo realizado en la ciudad de Oslo se llevó a cabo un estudio para predecir las obstrucciones en la red de alcantarillado mediante análisis estadísticos y modelos evolutivos de regresión polinomial donde buscaron entender la relación entre el desempeño de una tubería y atributos como la edad, material, diámetro y otros, además de la conexión entre eventos de obstrucciones y las características de las tuberías. (Ugarelli, Kristensen, Røstum, Sægrov, & Di Federico, 2009) Las obstrucciones fueron clasificadas de acuerdo con el tipo de red (agua residual, combinada, aguas lluvias). Uno de los hallazgos de esta investigación fue que la edad, el diámetro y el tipo de red tienen una influencia marcada en la propensión de la tubería a las obstrucciones. En otra fase del estudio (Ugarelli, Venkatesh, Brattebø, Di Federico, & Sægrov, 2010) clasificaron las obstrucciones agudas y crónicas. Las agudas ocurren cuando el flujo en las tuberías es obstruido por un período de tiempo relativamente corto mientras que las crónicas ocurren cuando hay acumulación de sedimentos a lo largo de la tubería durante un período de tiempo más prolongado, estas usualmente restringen parcialmente el flujo mientras las aguas lo interrumpen totalmente, los procesos que se combinan para crear este tipo de fallas son los siguientes:

- Intrusión de raíces
- Taponamiento por sedimentación
- Diseño ineficiente por baja pendiente
- Juntas desplazadas

- Problemas estructurales

La limitación de los modelos de consecuencia de falla es la subjetividad inherente introducida por el tomador de decisión y el asesor y es algo que debe tenerse en cuenta en el momento de analizar los resultados de cualquiera de los modelos usados.

4. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

En la figura 1 se muestra la zona de estudio escogida y corresponde a la cuenca la Picacha, la cual fue delimitada principalmente por la cantidad y calidad de datos a los que se tenían acceso, adicionalmente es una zona con historial de afectaciones causadas por eventos de lluvias y varios reportes de inundaciones en locales, viviendas y especialmente en el deprimido de Bulerías, la cuenca la Picacha está localizada en el suroccidente del municipio de Medellín y posee un área aproximada de 12,1 km², (CPA, 2018)

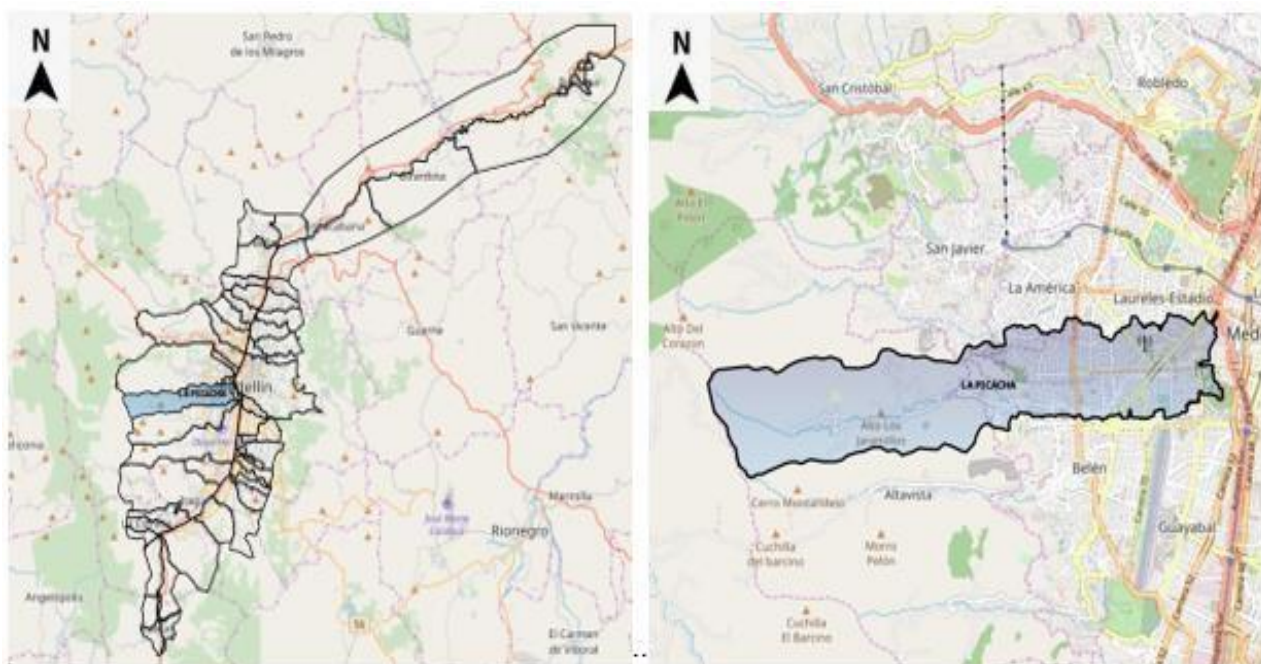


Figura 1. Ubicación cuenca la Picacha, Fuente: elaboración propia

5. METODOLOGIA

Para realizar el diseño de esta propuesta metodológica se utilizaron varias herramientas; inicialmente se analizaron diferentes problemas causados por las obstrucciones o fallas en los sistemas de alcantarillados y metodologías de predicción para obtener información cualitativa y poder lograr una estimación del riesgo sobre un elemento estudiado, finalmente se utilizaron herramientas del software ArcGIS para integrar toda la información obtenida y poder evaluar el riesgo de obstrucción en las tuberías.

Para desarrollar la metodología y determinar los puntos con mayor riesgo de obstrucciones durante un evento de lluvia, se subdividió la metodología en 5 fases, las cuales son visibles en la Figura 2.

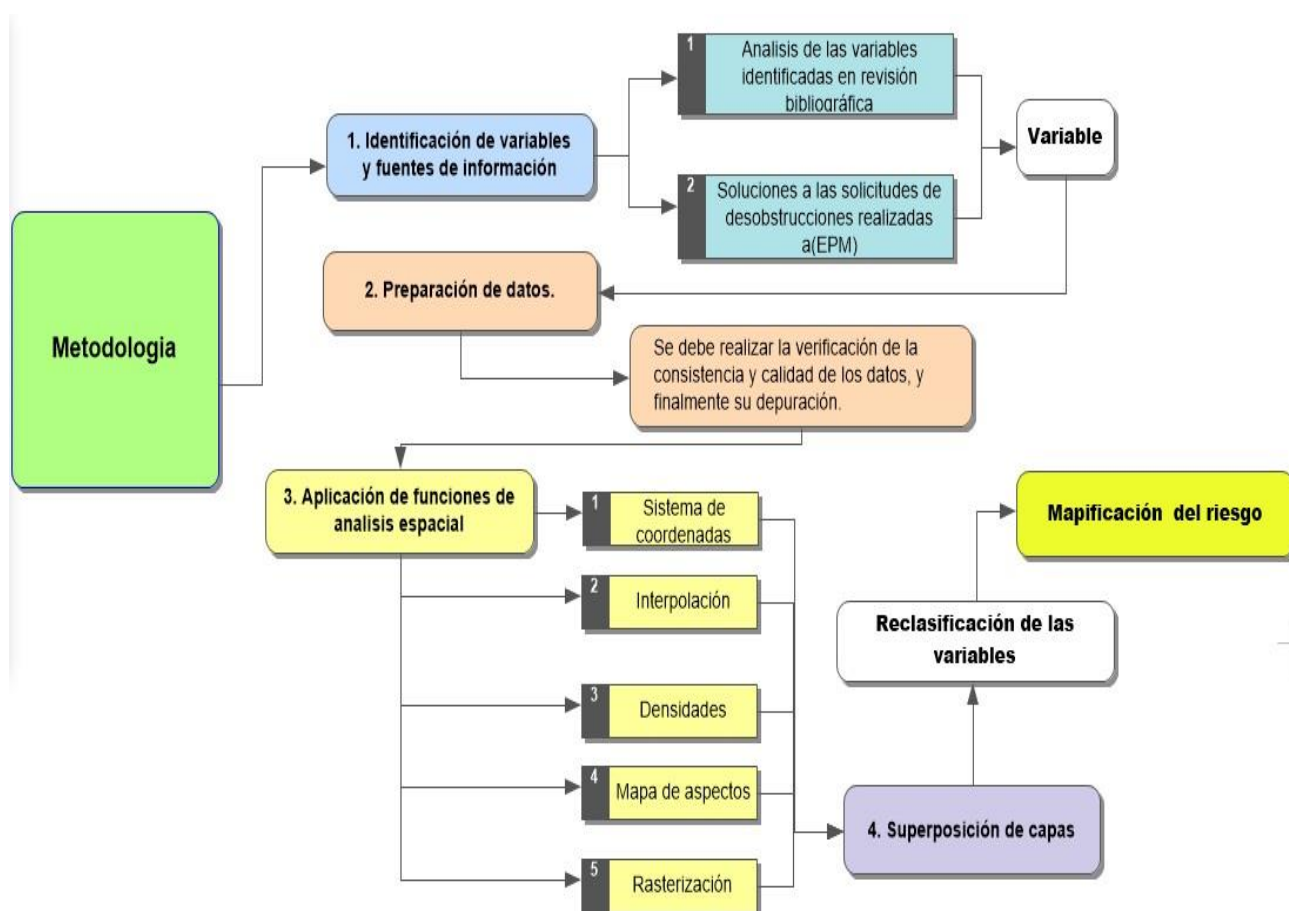


Figura 2. Fases desarrolladas durante la metodología, fuente elaboración propia

5.1. Identificación de variables y fuentes de información.

En esta fase de la metodología se busca principalmente la identificación de las variables que generan directa o indirectamente la falla en el sistema de alcantarillado por obstrucciones, lo anterior se realizará con base a la revisión bibliográfica evidenciada en el numeral 3 del presente trabajo, y el análisis de las soluciones a las solicitudes de desobstrucciones en la infraestructura de alcantarillado realizadas a Empresas Públicas de Medellín (EPM) en los últimos 5 años, en la figura 3 se muestra el procedimiento realizado para la identificación de las variables que harán parte de la propuesta metodológica.

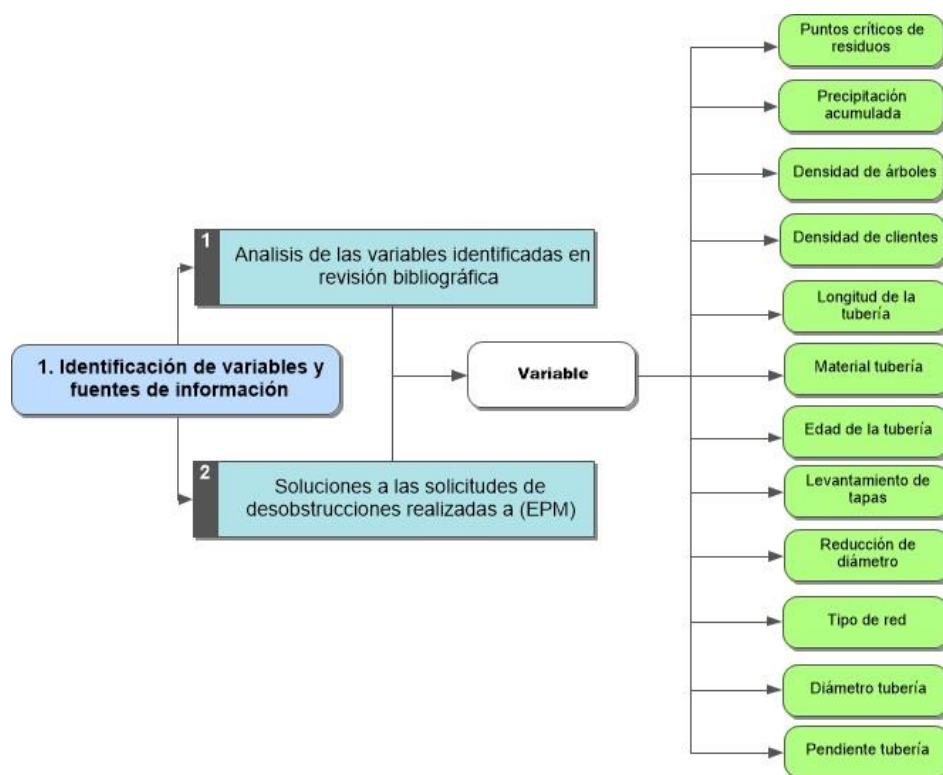


Figura 3. Identificación de variables, Fuente elaboración propia

Con el desarrollo del esquema propuesto en la figura 3, se obtiene un listado de las variables que influyen directa e indirectamente en la determinación del riesgo. Para mayor detalle, en la tabla 2 se presenta una breve descripción de todas las variables que serán parte del modelo.

N°	Variable	Fuente de información	Tipo de Información	Descripción	Tipo de acceso
1	Longitud de la tubería	EPM	Shape de polilíneas Numero de Datos 5.144	<p>Las variables agrupadas en esta descripción hacen parte de las propiedades y/o características internas del sistema de alcantarillado, por tal razón parten desde la misma base de datos. El shape de polilíneas fue obtenida a través de EPM y en su tabla de atributos se presentan la característica necesaria para el modelo.</p> <p>De acuerdo con (Ugarelli, Kristensen, Røstum, Sægrov, & Di Federico, 2009), la edad, el diámetro y el tipo de red (residual, combinada, lluvias), tienen una influencia marcada en la propensión de la tubería a las obstrucciones, es por esa razón que para el diseño de la presente propuesta metodológica se tienen en cuenta todas las características identificadas de las propiedades de las tuberías de alcantarillado y que tienen una influencia directa en la vida útil del elemento.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Material tubería, hace referencia al material con el cual está construido la tubería que hace parte del modelo, el cual puede ser en concreto, PVC u otros. • Edad de la tubería, fecha de instalación registrada de la tubería de alcantarillado. • Reducción de diámetro. Tramos de tubería en la cual se presenta una disminución del diámetro con respecto al tramo inmediatamente anterior. • Tipo de red. Hace referencia al tipo de uso de la tubería la cual puede ser Residual, combinada y de lluvias. 	Base de datos EPM
2	Material tubería				
3	Edad de la tubería				
4	Levantamiento de tapas				
5	Reducción de diámetro				
6	Tipo de red (Residual, combinada, lluvias)				
7	Pendiente tubería				
8	Diámetro tubería				

N°	Variable	Fuente de información	Tipo de Información	Descripción	Tipo de acceso
				<ul style="list-style-type: none"> • Pendiente tubería. Es la pendiente generada en un tramo de alcantarillado. • Longitud de la tubería. Longitud comprendida entre dos cámaras de inspección o entre una cámara y una descarga o aliviadero 	
9	Densidad de clientes	EPM	Shape de puntos Numero de datos: 44.168	De acuerdo con Bailey, y otros (2015), en su trabajo realizado en Gales y parte de Inglaterra, utilizaron técnicas de minería de datos para encontrar patrones en la ocurrencia de obstrucciones y como resultado de estos análisis se encontraron que las tuberías más pequeñas, más antiguas y cortas, están localizadas en áreas densamente pobladas y están relacionadas con una mayor tasa de obstrucción, es por esta razón que la densidad de clientes se incluye como variable para el desarrollo del modelo	Base de datos EPM
10	Precipitación acumulada	SIATA	Shape de puntos Numero de datos: 12	Esta variable contiene las estaciones meteorológicas en las cuales se almacenas los datos de la precipitación acumulada durante un evento de lluvia.	Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA)
11	Puntos críticos de residuos (Emvarias)	Emvarias	Shape de puntos Numero de datos: 12	Puntos de acumulación de basura reportados por Emvarias en la ciudad de Medellín, es importante tener en cuenta que la acumulación de basuras puede generar fallas por el arrastre de este material durante eventos de lluvia y generar obstrucciones en sumideros y tuberías	Informes EMVARIAS

N°	Variable	Fuente de información	Tipo de Información	Descripción	Tipo de acceso
12	Lugares con alta densidad de árboles	Municipio de Medellín	Shape de puntos Numero de datos: 33.001	Esta variable fue considerada teniendo en cuenta los reportes de EPM sobre las reparaciones por obstrucciones del sistema de alcantarillado, y por ser uno de los procesos identificados en diferentes investigaciones, entre ellos una de las fases de estudio realizada por (Ugarelli, Venkatesh, Brattebø, Di Federico, & Sægrov, 2010). En lugares con alta densidad de cobertura vegetal se puede generar fallas debido al taponamiento de las tuberías por raíces y por arrastre y acumulación de material vegetal en sumideros y tuberías	GeoMedellín y el SAU

Tabla 1. Descripción de las variables identificadas.

5.2. Preparación de los datos.

Esta fase de la metodología se centra especialmente en la verificación de la consistencia y calidad de los datos obtenidos de las diferentes instituciones identificadas en la tabla 2, así como los diferentes procesos realizados para garantizar la calidad y consistencia de la información utilizada en el modelo; en la figura 4 se presenta el esquema con todo el procedimiento realizado para la preparación de datos de cada una de las variables.



Figura 4. Pasos para la preparación de datos. Fuente elaboración propia

5.3. Aplicación de funciones de análisis espacial.

El objetivo principal de esta fase es realizar el análisis espacial a todas las variables con el fin de obtener el dato de entrada para posteriormente realizar el álgebra de mapas o superposición de capas, en la figura 5 se evidencia el proceso que se le realizó a cada una de las variables.

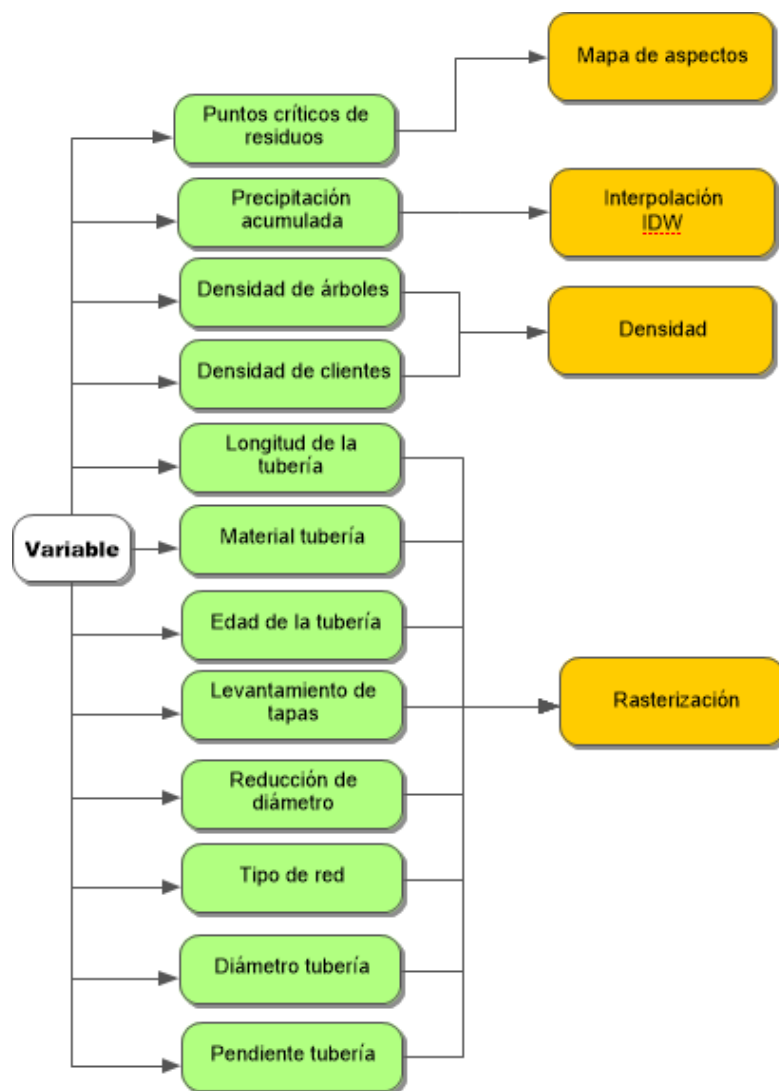


Figura 5. Análisis espacial de las variables identificadas. Fuente elaboración propia

5.4. Superposición de capas

Para la superposición de las capas, primero se debe realizar la identificación y valoración de los atributos de cada variable y reclasificación en 5 niveles de criticidad; en la figura 5 se puede visualizar los criterios de reclasificación que se utilizaron, donde 9 es el valor dado a la característica más favorable para que se presente una obstrucción y 1 a la más desfavorable, es decir donde la probabilidad de taponamiento de la red es baja.

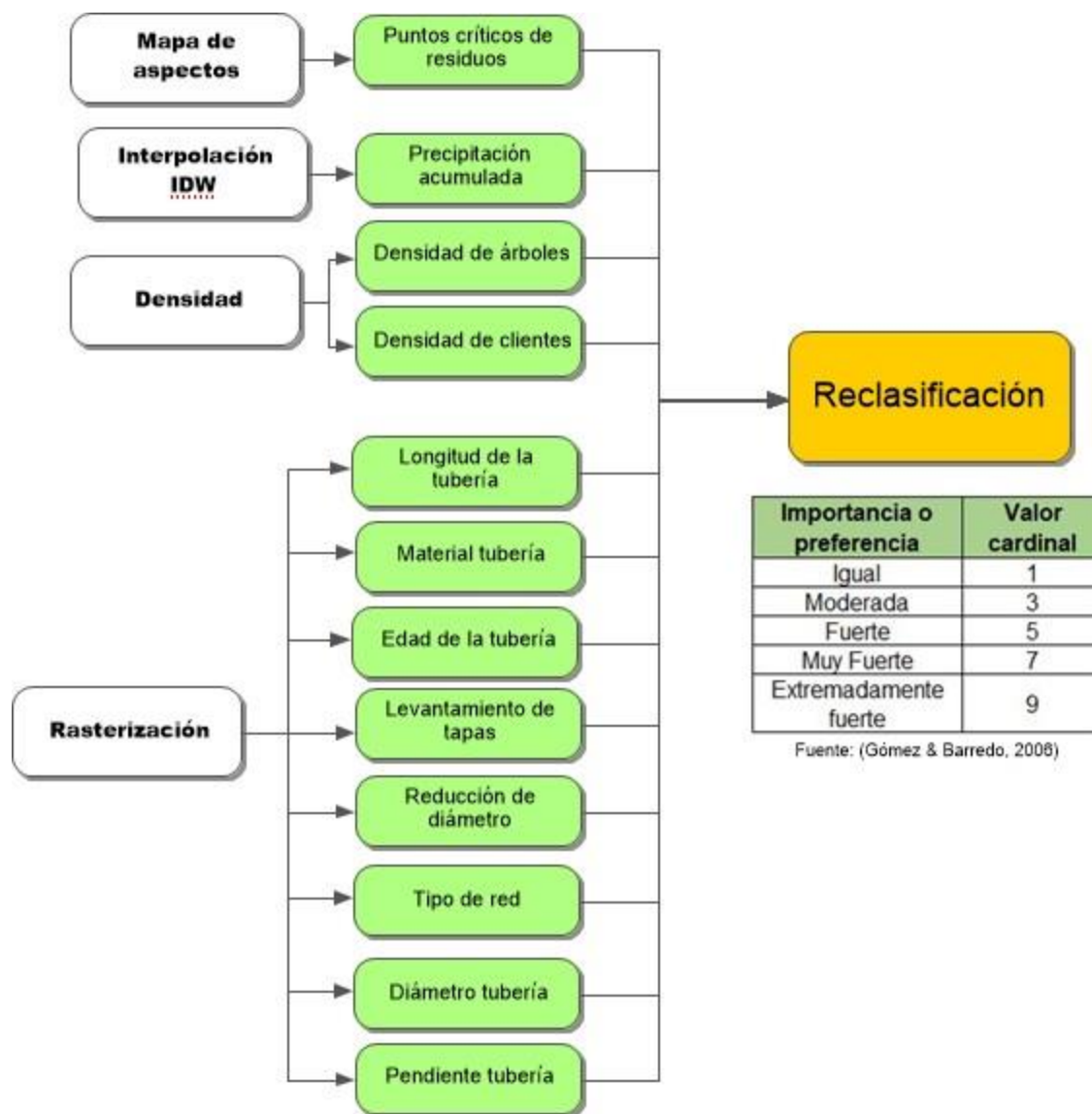


Figura 6. Clasificación por niveles de criticidad. Fuente elaboración propia

En las tablas 6 a la 18, se muestra los criterios utilizados para la reclasificación de cada una de las variables, es importante tener en cuenta que en las tablas 8 y 17 se realiza la clasificación de los intervalos por medio de la función Equal Interval de ArcMap, el cual divide el rango de la variable en sub-rangos de igual tamaño, mientras las tablas 6, 7 y de la 9 a la 16 se realiza manualmente con base a los criterios de varios expertos.

Tabla 2. Reclasificación longitud de tubería

Longitud de Tubería

Importancia o preferencia	Valor reclasificación
< 10 m	1
Entre 10 - 20 m	3
Entre 20 - 30 m	5
Entre 30 - 40 m	7
> 40 m	9

Tabla 3. Reclasificación material de tubería

Material tubería	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
PVC	1
Otros	5
Concreto	9

Tabla 4. Reclasificación densidad de clientes

Densidad de clientes	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
0 - 0,007784	1
0,007784 - 0,015568	3
0,015568 - 0,023352	5
0,023352 - 0,031135	7
0,031135 - 0,038919	9

Tabla 5. Reclasificación edad de tubería.

Edad de la tubería	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
< 20 años	1
Entre 20 y 30 años	3

Entre 30 y 40 años	5
Entre 40 y 50 años	7
>50	9

Tabla 6. Reclasificación levantamiento de tapas

Levantamiento de tapas	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
NO	1
Tres tramos aguas abajo de donde se levante la tapa	9

Tabla 7. Reclasificación reducción de diámetro.

Reducción de diámetro	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
SI	9
NO	1

Tabla 8. Reclasificación tipo de red (Residual, combinada, lluvias).

Tipo de red (Residual, combinada, lluvias)	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
Red de aguas lluvias	1
Red residual	5
Red combinada	9

Tabla 9. Reclasificación pendiente tubería.

Pendiente tubería	
Importancia o preferencia	Valor reclasificación
> 4%<	1

Entre 3 y 4%	3
Entre 2 y 3%	5
Entre 1 y 2%	7
1%	9

Tabla 10. Reclasificación precipitación acumulada.

Precipitación acumulada	
Importancia o preferencia	Valor cardinal
<15 mm	1
Entre 15 y 25 mm	3
Entre 25 y 35 mm	5
Entre 35 y 45 mm	7
> 45 mm	9

Tabla 11. Reclasificación diámetro de tubería.

Diámetro tubería	
Importancia o preferencia	Valor cardinal
<200 mm	1
Entre 200 y 250 mm	3
Entre 250 y 315 mm	5
Entre 315 y 355 mm	7
> 355 mm	9

Tabla 12. Reclasificación puntos críticos basuras.

Punto críticos basuras	
Importancia o preferencia	Valor cardinal
<0	1
North (0-22.5)	1

Northeast (22.5-67.5)	7
East (67.5-112.5)	9
Southeast (112.5-157.5)	7
South (157.5-202.5)	5
Southwest (202.5-247.5)	1
West (247.5-292.5)	1
Northwest (292.5-337.5)	3
North (337.5-360)	1

Tabla 13. Reclasificación densidad de arboles

Densidad de arboles	
Importancia o preferencia	Valor cardinal
0 - 0,004595	1
0,004595 - 0,00919	3
0,00919 - 0,013784	5
0,013784 - 0,018379	7
0,018379 - 0,022974	9

5.5. Mapificación del riesgo

La mapificación del riesgo tiene como objetivo principal evidenciar espacialmente las tuberías que tienen mayor probabilidad de obstrucciones, para esto es necesario realizar el álgebra de mapas, la cual es una herramienta que permite utilizar todas las operaciones entre diferentes capas para lograr un resultado geográfico, para el desarrollo de la propuesta metodológica es necesario utilizar la ecuación 1, la cual se realiza con base a las encuestas que respondieron los expertos y puede ser visualizada en la figura 7.

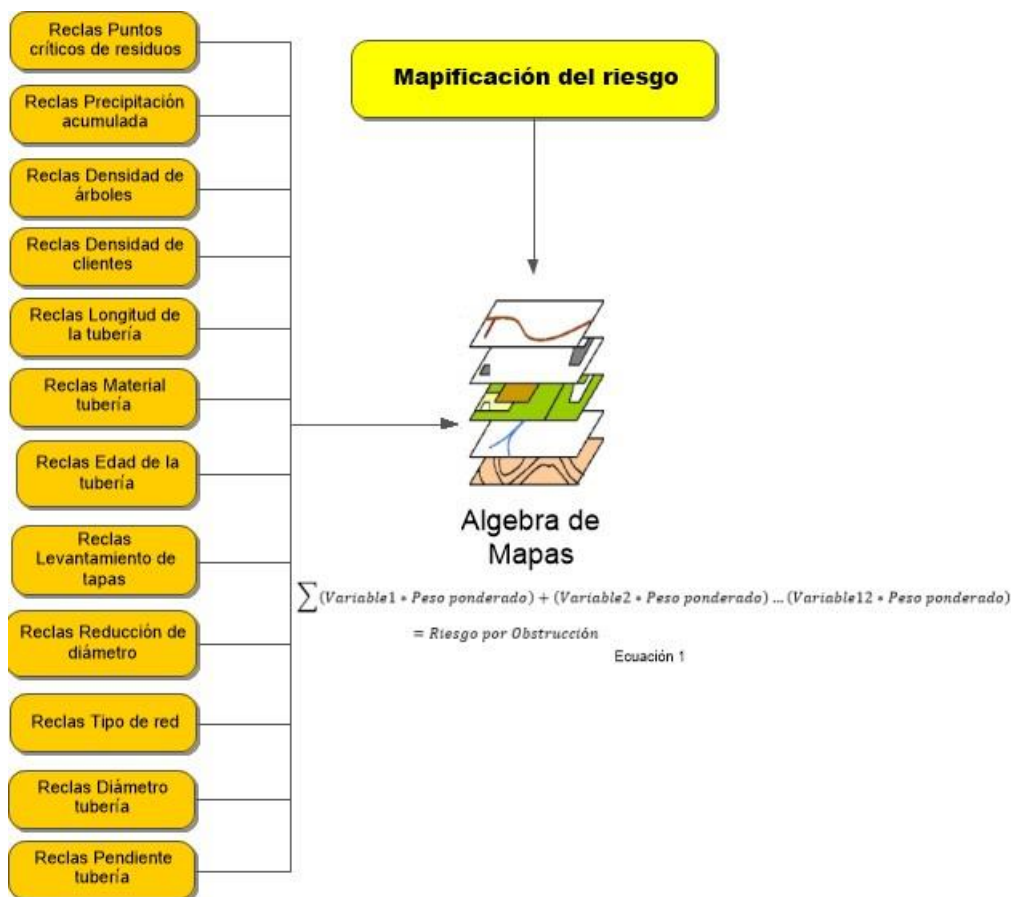


Figura 7. Mapificación del riesgo. Elaboración propia

La definición del peso de cada una de las variables se realizó con la selección de un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión mediante una encuesta sobre las variables previamente identificadas, la cual se realiza de forma anónima y con la mayor autonomía posible para no afectar su evaluación.

En la tabla 4 se estipula la encuesta con la cual el personal de ejecución de proyectos de aguas y el área de operación y mantenimiento de Empresas Públicas de Medellín, realizaron la calificación de cada una de las variables definidas en el numeral 6.1.

Tabla 14. Encuesta realizada a expertos

ENCUESTA

El campo variable hace referencia a los posibles agentes externos o internos por los cuales se puede generar o encontrar una obstrucción en el sistema de alcantarillado; para este ejercicio es necesario dar una calificación entre 0% y 100% a cada una de las variables, al final la suma deber ser igual a 100%, y así determinar las posibles zonas con riesgo de presentar obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado.			
ID	Variable	Porcentaje	porcentaje Acumulado
1	Longitud de la tubería		
2	Material tubería		
3	Densidad de clientes		
4	Edad de la tubería		
5	Levantamiento de tapas		
6	Reducción de diámetro		
7	Tipo de red (Residual, combinada, lluvias)		
8	Pendiente tubería		
9	Precipitación acumulada		
10	Diámetro tubería		
11	Puntos críticos de residuos (Emvarias)		
12	Lugares con alta densidad de árboles		

Una vez obtenida la información de las encuestas, se calcula el promedio ponderado de todas las variables y se obtiene un listado de los criterios con sus respectivas valoraciones para ser utilizadas en el geoprocésamiento del modelo.

5.6. Desarrollo del modelo espacial.

La propuesta metodológica se realizará usando herramientas de sistemas de información geográfica, específicamente el modelador gráfico aplicación Model Builder del software SIG ArcGIS 10.5.1, el cual puede ser visualizado en la figura 8.

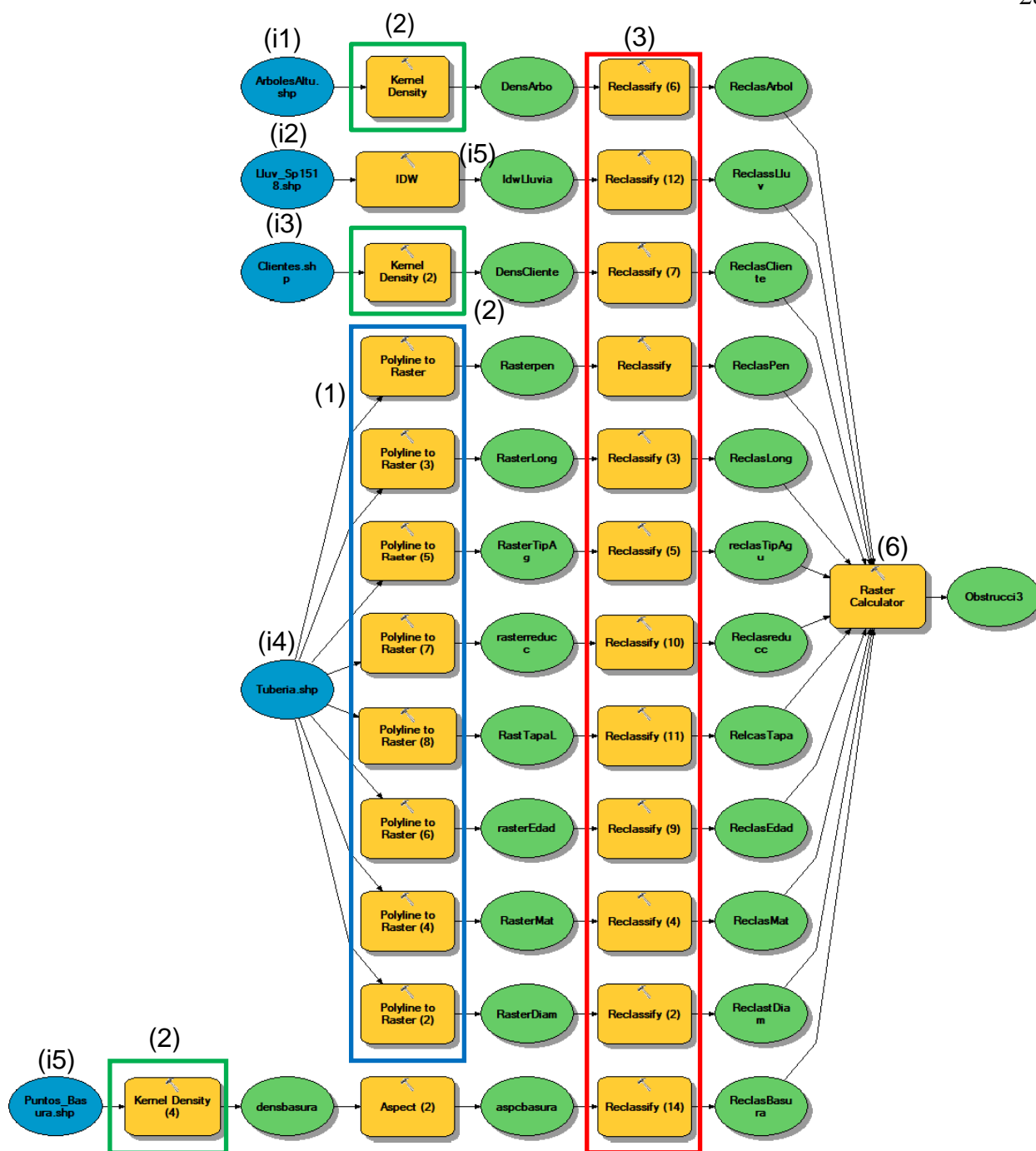


Figura 8 Propuesta metodológica para determinar el riesgo de obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado

- (i1) a (i5). Información base para el desarrollo del modelo, (i1) localización de los puntos que representan los árboles urbanos, (i2) puntos que representan las estaciones meteorológicas con los datos del evento de lluvia acumulada, (i3) localización de los

puntos que representan los usuarios del sistema de alcantarillado, (i4) Shape de polilíneas que representan la red de alcantarillado y finalmente (i5) localización de los puntos críticos de residuos.

- **(1) Rasterización de los datos obtenidos**, Por medio de la herramienta “De polilínea a ráster” se convierte las entidades de polilínea a dataset ráster, con la intención de poder realizar una reclasificación con criterios presentados de la tabla 7 a la 18.
- **(2) Hallar la densidad de los puntos de acumulación de basura, árboles urbanos y clientes de la red de alcantarillado**, para este proceso se utilizó la herramienta Densidad Kernel y están señaladas en el recuadro de color verde, esta función calcula la densidad de las entidades de punto de alrededor de cada celda ráster de salida. El algoritmo utilizado en la herramienta de ArcGIS está basado en la ecuación de cuarto grado que se describió en (Silverman 1986, p. 76, ecuación 4.5) y su descripción está disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm>.
- **(3) Reclasificación de las variables**: este análisis se utiliza para clasificar nuevamente los ráster obtenidos en los pasos anteriores y señalados en el recuadro rojo de la figura 3, y están basados en los rangos establecidos en las tablas 7 a la 18.
- **(4) Orientación de los puntos de acumulación de basura**: con la intención de obtener las direcciones en las cuales pueda ser arrastrada la basura durante un evento de lluvia, es necesario realizar la reclasificación presentada en la tabla 17 con base a la dirección de la pendiente de la zona de estudio, para este ejercicio se utilizó la herramienta Aspect de ArcGIS, la cual genera un capa Raster subdividida desde 0° hasta 360°, donde 0 inicia en el norte y en sentido a las manecillas del reloj finaliza en 360°, es decir nuevamente en el norte, Las áreas planas que no tienen dirección de pendiente descendente tienen un valor de -1, esta descripción está disponible en

<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-aspect-works.htm>

- **(5) Interpolación de los datos de precipitación acumulada:** para determinar el ráster que representa mejor el comportamiento de la precipitación durante un evento de lluvia, se realizó mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW).
- **(6) Determinación del riesgo de obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado:** Por medio del álgebra de mapas se realizó la combinación de los criterios con el promedio de las valoraciones realizadas por los expertos.

6. RESULTADOS Y DISCUSION.

Para poder identificar los sitios con mayor probabilidad de falla por obstrucciones en las redes de alcantarillado, fue necesario considerar los criterios de 5 expertos, que, debido a su experiencia en la ejecución de proyectos nuevos, mantenimiento y operación de las redes de alcantarillado, fue posible realizar las encuestas en las cuales se identificaron y se evaluaron las principales variables que pueden generar directa o indirectamente la falla en el sistema debido a obstrucciones, en la tabla 18 se presentan resultados obtenidos de las encuestas:

Tabla 15. Resultados de la encuesta realizada a expertos.

ID	Variable	Porcentaje*	Porcentaje Acumulado	Agrupación por cuartiles
1	Longitud de la tubería	3%	3%	Q1
2	Material tubería	3%	6%	
3	Densidad de clientes	3%	9%	
4	Edad de la tubería	4%	13%	
5	Levantamiento de tapas	6%	19%	
6	Reducción de diámetro	8%	27%	Q2
7	Tipo de red (Residual, combinada, lluvias)	8%	35%	
8	Pendiente tubería	9%	44%	
9	Precipitación acumulada	11%	55%	Q3
10	Diámetro tubería	11%	66%	
11	Puntos críticos de residuos (Emvarias)	14%	80%	Q4
12	Lugares con alta densidad de árboles	20%	100%	

*Representa el promedio del resultado de las diferentes encuestas realizada a expertos.

Para realizar el análisis detallado de la tabla 15, las variables se agruparon en 4 cuartiles (Q1, Q2, Q3 y Q4) que determinan las variables en los porcentajes acumulados al 25%, 50% 75% y 100% respectivamente. Las variables agrupadas en Q1 hacen referencia a las propiedades internas de la red y que afectan directamente la vida útil del elemento, mientras las variable que pertenece a Q2

y Q3, hacen referencia a características propias del diseño del sistema de alcantarillado y por ende a la capacidad de este durante un evento de precipitación de gran magnitud, finalmente las variables de Q4 corresponden a las de mayor peso promedio calificadas por los expertos, y son las que tienen un proceso de acumulación y arrastre de basuras y/o coberturas vegetales; de lo anterior se puede concluir que estos resultados son acorde a lo encontrado (Ugarelli, Kristensen, Røstum, Sægrov, & Di Federico, 2009), (Ugarelli, Venkatesh, Brattebø, Di Federico, & Sægrov, 2010), (Bailey et al., 2015), (Baah et al., 2015) entre otros, y a los reportes de las reparaciones de las obstrucciones en el área de interés y que fueron generadas en los últimos 5 años por Empresas Públicas de Medellín.

En la figura 9 se puede observar el resultado del procedimiento realizado con base a la metodología propuesta en la figura 2, la cual presenta las redes con mayor probabilidad de falla de obstrucción.

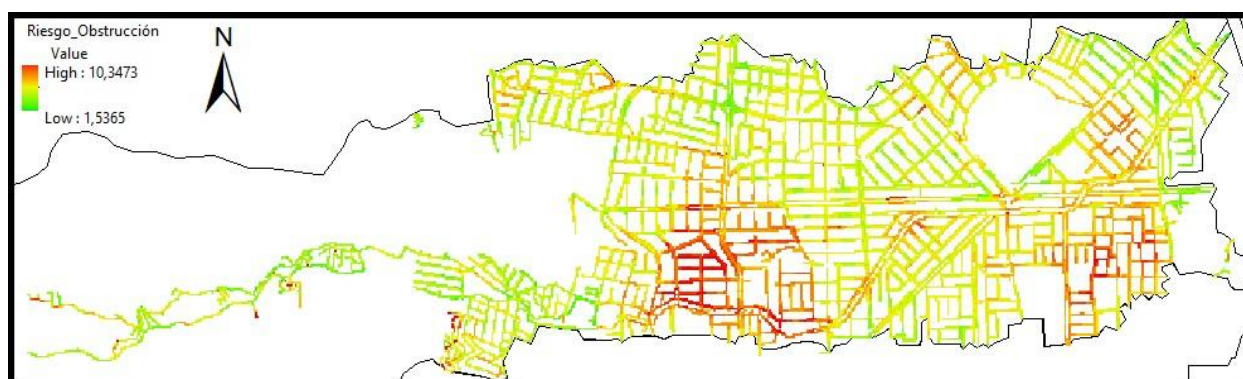


Figura 9. Resultado del desarrollo del modelo.

El resultado de la propuesta metodológica se encuentra en un rango entre 1.54 y 10.35, siendo el color rojo el valor más alto y que según el modelo es donde el riesgo por obstrucciones se puede materializar, mientras el color verde se muestran los lugares donde el riesgo por obstrucción es mínimo.

Con el fin de realizar un estudio más detallado, se localizan 5 zonas en las cuales se visualizan que la probabilidad de falla por obstrucciones es más alta, y se realiza la comparación con las 4 variables de mayor peso dentro del modelo (ver figura 10), que sumadas representan un total del 56% con respecto al peso total de las variables.

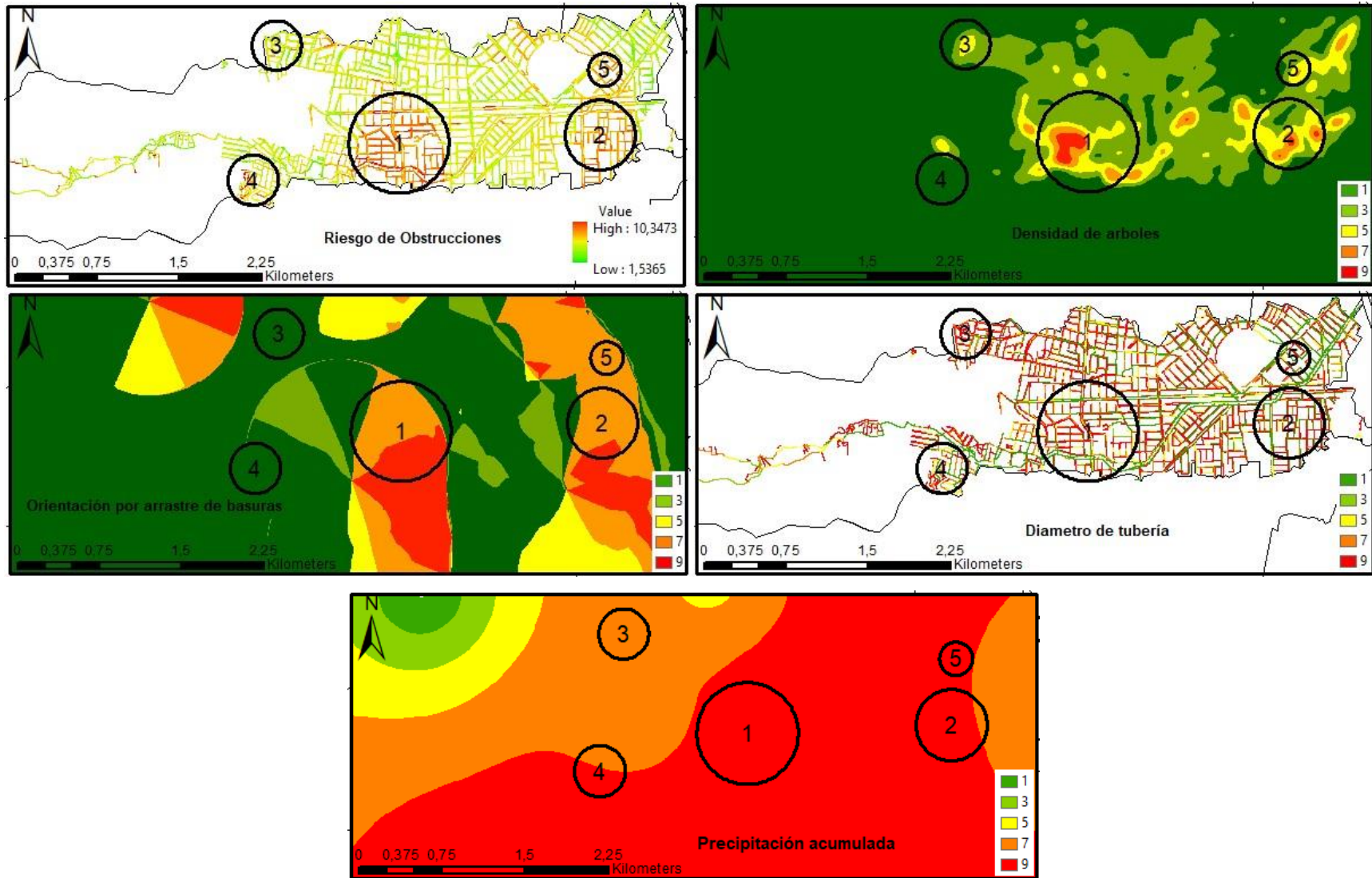


Figura 10. Comparación entre resultado y las cuatro variables con mayor peso en el modelo

De la figura 10 se puede concluir que las zonas 1 y 2, son las que presentan mayor probabilidad de falla de obstrucción y al realizar la comparación con las 4 variables seleccionadas se verifica que en todas se presenta una probabilidad entre medio y alto en la probabilidad de obstrucciones, mientras en las zonas 3, 4, y 5 se verifica que al menos una de las variables tiene un riesgo bajo, lo que afecta directamente el riesgo de obstrucción.

Con la intención de validar el resultado del modelo y verificar la tendencia de la probabilidad de falla en el sistema de alcantarillado, se realiza una comparación entre las cinco zonas previamente seleccionadas y el reporte de las reparaciones realizadas por EPM en los últimos 5 años, Ver figuras de la 11 a la 12.

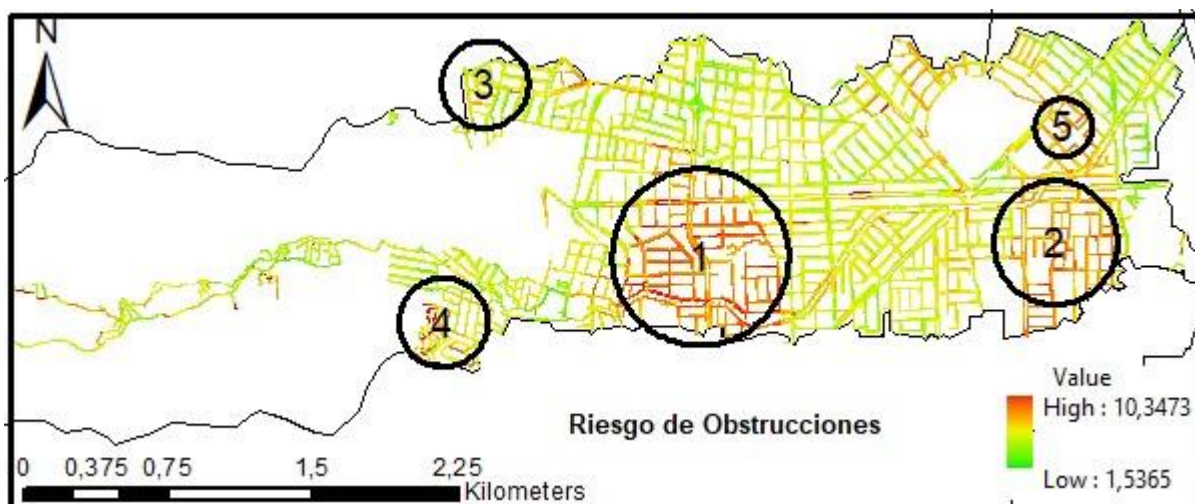


Figura 11 Resultado del modelo y selección 5 zonas con mayor riesgo de obstrucción.

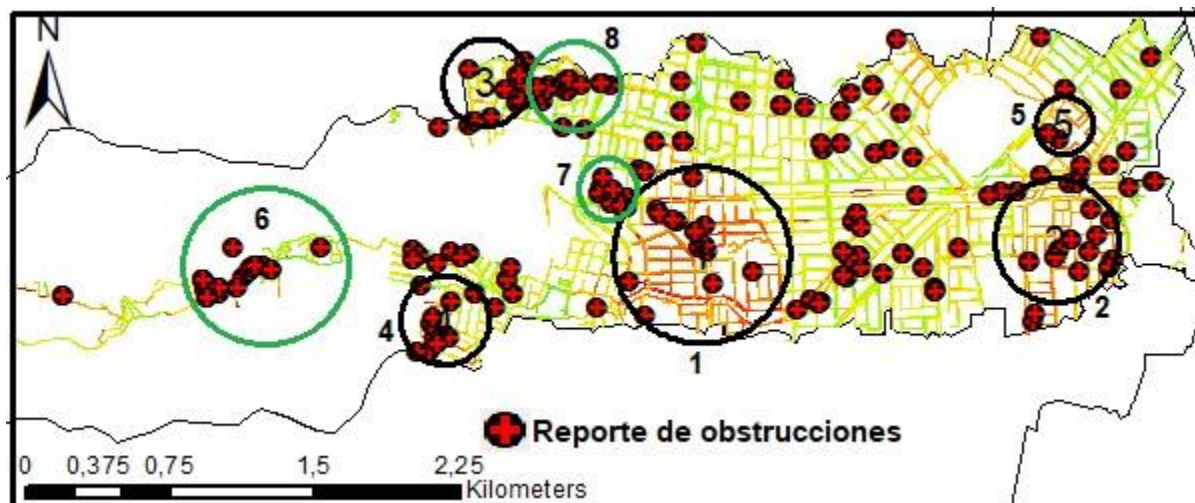


Figura 12. Comparativo con la densidad de obstrucciones

De las figuras 11 y 12 se observan que las cinco zonas seleccionadas del resultado del modelo representan aproximadamente el 40% de las obstrucciones reportadas, sin embargo, de los reportes reales se puede concluir que es necesario incluir las zonas 6, 7 y 8 visibles en la figura 12 de color verde, con la intención de verificar las posibles diferencias con el resultado de la propuesta metodológica.

Una vez revisados todos los datos y comparados con el reporte de las reparaciones de obstrucciones se puede inferir que la falta de las zonas 6, 7 y 8 en el resultado del modelo están directamente relacionados por la falta de datos en una o más variables incluidas en el modelo, el resultado de esta revisión se presenta en la figura 13.

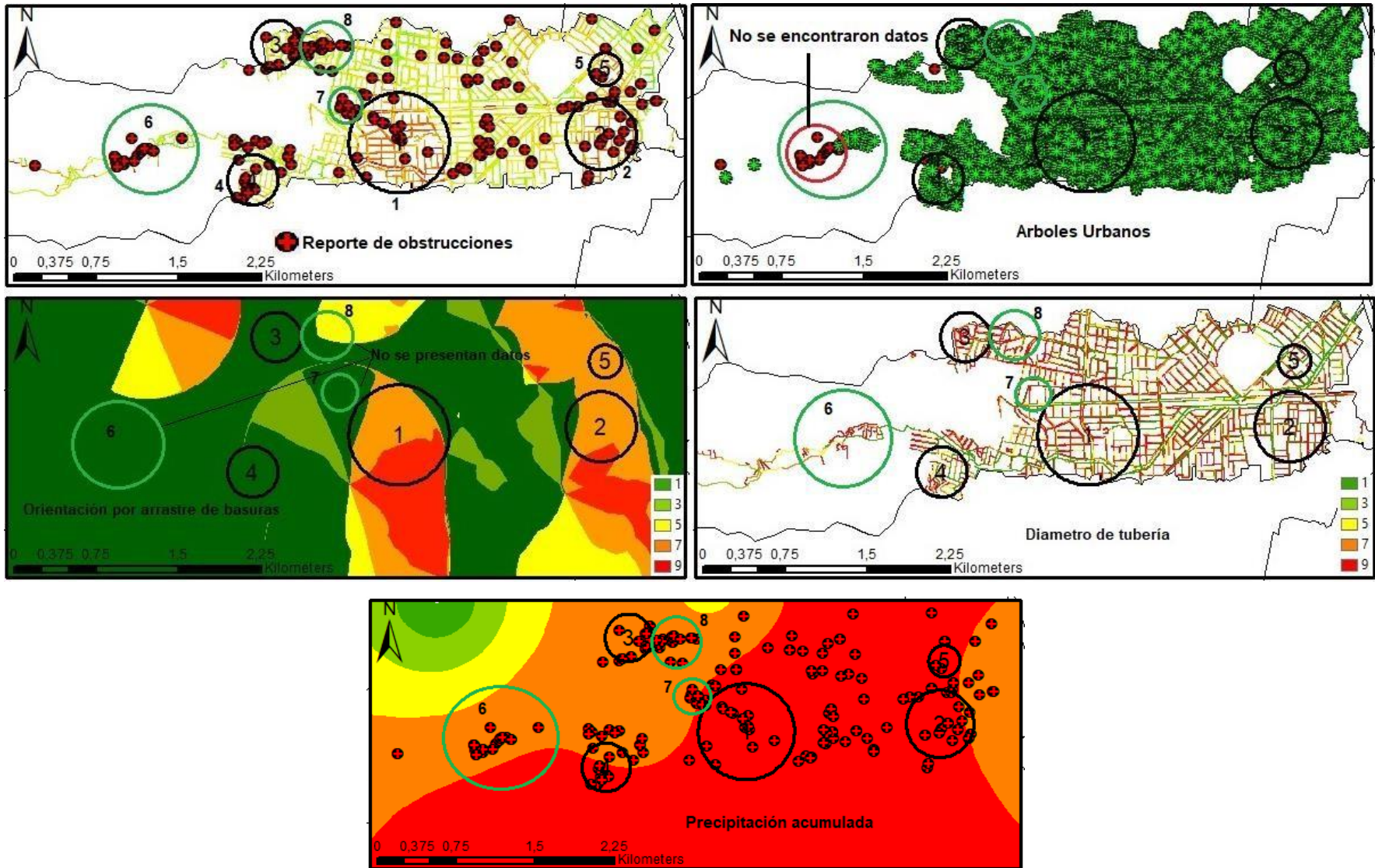


Figura 13. Comparación de las zonas 6,7 y 8 entre los reportes reales y las variables que reportaron algún tipo de novedad

7. CONCLUSIONES

1. La implementación de la propuesta metodológica basado en SIG para determinar la probabilidad de falla por obstrucciones en la infraestructura de alcantarillado causadas por eventos de lluvia, puede ser una alternativa para las empresas prestadoras de servicios públicos para la construcción de programas de mantenimiento preventivo las cuales pueden ser más económicas que las reparaciones correctivas, adicionalmente ayuda mitigar el riesgo de obstrucción en la red, minimizando así el impacto a las comunidades.
2. La definición de las variables y los criterios de clasificación son la base de la propuesta metodología diseñada en este trabajo; por tal razón es de gran importancia realizar el análisis con un amplio número de criterios con el fin de involucrar la mayor parte de las variables que tienen influencia sobre las obstrucciones en la red de alcantarillado.
3. La metodología utilizada para la determinación del riesgo por obstrucciones en la cuenca la Picacha, puede ser utilizada en otras cuencas, dependiendo del detalle de la información que se encuentre disponible.
4. La identificación de los sitios con mayor riesgo de obstrucciones es directamente proporcional a la calidad de los datos obtenidos, por tal razón la falta de consistencia en la información de las variables con mayor peso dentro del modelo puede alterar fácilmente el resultado.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Astigarraga, E. (2003). El Metodo Delphi. *San Sebastián, Spain: Universidad de Deusto*, 1–14.
Retrieved from https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/50762750/Metodo_delphi.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1519971500&Signature=HMTDvch5kIP%2F5LEv%2BGXV6yBLWqU%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DEl_Metodo_Delphi._Universidad_
- Baah, K., Dubey, B., Harvey, R., & McBean, E. (2015). A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management. *Science of the Total Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.040>
- Bailey, J., Keedwell, E., Djordjevic, S., Kapelan, Z., Burton, C., & Harris, E. (2015). Predictive risk modelling of real-world wastewater network incidents. *Procedia Engineering*, 119(1), 1288–1298. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.949>
- Chughtai, F., & Zayed, T. (2008). Infrastructure Condition Prediction Models for Sustainable Sewer Pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2008\)22:5\(333\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:5(333))
- CPA, I. (2018). *Consultoria Para Actualizar El Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Río Aburrá-Nss (2701-01), Localizada En El Departamento De Antioquia Jurisdicción De La Corporación Autónoma Regional Del Centro De Antioquia (Corantioquia)*.
- Inanloo, B., Tansel, B., Shams, K., Jin, X., & Gan, A. (2016). A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks. *Safety Science*. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.018>
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. New York: Chapman and Hall
- Tscheikner-Gratl, F., Egger, P., Rauch, W., & Kleidorfer, M. (2017). Comparison of multi-criteria decision support methods for integrated rehabilitation prioritization. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w9020068>
- Ugarelli, R., Kristensen, S. M., Røstum, J., Sægrov, S., & Di Federico, V. (2009). Statistical

analysis and definition of blockages-prediction formulae for the wastewater network of Oslo by evolutionary computing. *Water Science and Technology*.

<https://doi.org/10.2166/wst.2009.152>

Ugarelli, R., Venkatesh, G., Brattebø, H., Di Federico, V., & Sægrov, S. (2010). Historical analysis of blockages in wastewater pipelines in Oslo and diagnosis of causative pipeline characteristics. *Urban Water Journal*. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2010.526229>