



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**DISTRITOS SANITARIOS DE AGUA RESIDUAL  
INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL  
EN EL COLECTOR LA DOCTORA, MUNICIPIO DE  
SABANETA, ANTIOQUIA, COLOMBIA.**

Autor(es)

Luis David Arango Arteaga

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia



DISTRITOS SANITARIOS DE AGUA RESIDUAL  
INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL EN EL COLECTOR LA  
DOCTORA, MUNICIPIO DE SABANETA, ANTIOQUIA, COLOMBIA.

**Luis David Arango Arteaga**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Asesores (a):

Julio César Saldarriaga Molina

Ingeniero Sanitario

Línea de Investigación:

Tratamiento y gestión de aguas residuales

Grupo de Investigación:

GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2021

## TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	11
INTRODUCCIÓN .....	13
1. ANTECEDENTES.....	15
1.1 Contexto Histórico Mundial .....	15
1.2 Contexto Nacional.....	18
1.3 Contexto Regional.....	20
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
3. OBJETIVOS.....	27
3.1 Objetivo General .....	27
3.2 Específicos.....	27
4. METODOLOGÍA .....	28
5. GENERALIDADES .....	33
5.1 Área de Estudio.....	33
5.2 Extensión .....	34
5.3 Sectorización Urbana.....	34
5.4 Población .....	34
6. CAUDAL DE AGUA RESIDUAL .....	37
6.1 Agua Residual Doméstica ARD .....	40
6.2 Agua Residual no Doméstica ARnD .....	42
6.3 Análisis de Distribución Geoespacial por Caudales Vertidos a la Red.....	44
6.3.1 Análisis de Patrones por Clúster y Valor Atípico Moran I .....	45

6.3.2	Clustering alto/bajo G General de Getis-Ord.....	47
6.3.3	Agua Residual Doméstica .....	47
6.3.4	Agua Residual no Doméstica .....	53
6.4	Mapa de Calor – Presión de Vertimientos por Caudal .....	61
7.	CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA ARnD .....	65
7.1	Auto Declaraciones de Vertimientos .....	65
7.1.1	Base de Datos de Auto Declaraciones ARnD.....	66
7.1.2	Reducción de Variables.....	70
7.2	Análisis Exploratorio Inicial.....	70
7.2.1	Matriz de Correlaciones.....	70
7.2.2	Matriz de Correlación por Caudal .....	72
7.2.3	Matriz de Correlación por Carga Contaminante .....	73
7.2.4	Prueba de Normalidad de los Datos.....	74
7.3	Análisis de Distribución Geoespacial de las Auto Declaraciones de ARnD .....	76
7.3.1	Agregación Espacial de Auto Declaraciones por Caudal.....	76
7.3.2	Agregación Espacial de Auto Declaraciones por Carga Contaminante .....	79
7.3.3	Agregación Espacial por daño Potencial a la Red.....	84
7.3.4	Agregación Espacial por Color .....	88
7.4	Mapa de Calor - Presión por Calidad del ARnD.....	90
8.	DETERMINACIÓN DE DISTRITOS SANITARIOS CUENCA LA DOCTORA.....	93
8.1	Delimitación de Distritos Sanitarios DS de Agua Residual Cuenca La Doctora.....	94

8.1.1	Distrito Sanitario de agua residual doméstica DS ARD .....	96
8.1.2	Distrito Sanitario de agua residual no doméstica (DS ARND) .....	98
8.1.3	Distrito Sanitario de Agua Residual Mixto DS ARND y ARD .....	100
8.1.4	Colectores de Agua Residual Asociados a los Distritos Sanitarios .....	101
9.	ESTUDIOS DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA ARnD .....	105
9.1	Determinación de los Puntos de Muestreo .....	105
9.2	Análisis Multivariado .....	108
9.2.1	Matriz de Correlación por Concentración .....	108
9.2.2	Análisis de Componentes Principales .....	113
9.3	Calidad del Agua Residual en los Distritos Sanitarios.....	115
9.3.1	Análisis por Conductividad .....	115
9.3.2	Análisis por Color .....	116
9.3.3	Análisis por Daño Potencial en la Red .....	117
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	119
10.1	Caudal de Agua Residual en la Cuenca .....	119
10.1.1	Agua Residual Doméstica ARD:.....	119
10.1.2	Agua Residual no Doméstica ARnD.....	119
10.2	Calidad del Agua Residual no Doméstica .....	121
10.3	Distritos Sanitarios de Agua Residual .....	124
10.3.1	Distrito Sanitario de Agua Residual Doméstica DS ARD.....	124
10.3.2	Distrito Sanitario de Agua Residual no Doméstico DS ARnD.....	125
10.3.3	Distrito Sanitario de Agua Residual Mixto DS ARND y ARD .....	125

10.4	Calidad del Agua Residual Colector La Doctora .....	125
11.	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS.....	128
	REFERENCIAS.....	131

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Localización municipio de Sabaneta Antioquia .....	33
Ilustración 2. Ubicación municipio de Sabaneta y su cuenca.....	36
Ilustración 3. Comparación de cuantiles, vertimiento mensual promedio.....	41
Ilustración 4. Histograma normalizado, Log (m <sup>3</sup> /mes) ARD.....	42
Ilustración 5. Comparación de cuartiles por punto de descarga.....	43
Ilustración 6 Histograma normalizado Log(m <sup>3</sup> /mes) ARnD.....	44
Ilustración 7. Distribución espacial de frecuencias ARD. ....	49
Ilustración 8. Diagrama de dispersión polar ARD.....	50
Ilustración 9. Diagrama de dispersión de frecuencias ARD .....	50
Ilustración 10. Informe de correlación espacial ARD.....	51
Ilustración 11. Informe de agrupamiento alto bajo ARD.....	52
Ilustración 12. Ubicación espacial de vertimientos ARnD, zona centro de Sabaneta ...	54
Ilustración 13 .Distribución espacial de frecuencias ARnD .....	55
Ilustración 14. Diagrama de dispersión polar ARnD.....	57
Ilustración 15. Diagrama de dispersión de frecuencias ARnD .....	57
Ilustración 16. Informe de correlación espacial ARnD.....	59
Ilustración 17. Informe de agrupamiento alto bajo ARnD .....	60
Ilustración 18. Áreas de calor o presión de vertimientos de agua residual por caudal ..	63
Ilustración 19. Distribución de sectores productivos de los usuarios industriales .....	68
Ilustración 20. Distribución espacial por actividad productiva .....	69
Ilustración 21. Matriz de correlación por concentración .....	71

Ilustración 22. Matriz de correlación por caudal .....	73
Ilustración 23. Matriz de correlación de carga contaminante .....	74
Ilustración 24. Auto declaraciones de acuerdo al volumen de ARnD .....	77
Ilustración 25. Distribución de frecuencias caudal por auto declaración .....	78
Ilustración 26. Auto declaraciones por carga mensual.....	80
Ilustración 27. Distribución de frecuencias por carga DQO.....	81
Ilustración 28. Distribución de frecuencias por carga de DBO5 .....	82
Ilustración 29. Distribución de frecuencias por carga mensual de SST.....	83
Ilustración 30. Auto declaraciones de acuerdo con el pH.....	84
Ilustración 31 Distribución de frecuencias del pH máximo .....	85
Ilustración 32. Distribución de frecuencias pH mínimo.....	86
Ilustración 33. Auto declaraciones por concentración de grasas y aceites .....	87
Ilustración 34. Distribución de frecuencias para grasas y aceites .....	88
Ilustración 35. Auto declaraciones de acuerdo al color .....	89
Ilustración 36. Distribución de frecuencias por color .....	90
Ilustración 37. Mapa de presión calor de la calidad del ARnD .....	91
Ilustración 38. Mapa de calor presión de los vertimientos de aguas residuales.....	94
Ilustración 39. Distritos de agua residual Cuenca La Doctora.....	95
Ilustración 40. Distrito Sanitario ARD cuenca La Doctora .....	97
Ilustración 41. Distrito Sanitario Mixto .....	99
Ilustración 42. Distrito Sanitario Mixto .....	101
Ilustración 43 Colectores de AR.....	103
Ilustración 44. Ubicación de los puntos de muestreo en el colector La Doctora. ....	106

Ilustración 45. Punto de muestreo colector La Doctora parte baja, DS ARnD .....	107
Ilustración 46. Matriz de correlaciones concentración de contaminantes.....	109
Ilustración 47. Conductividad por punto de muestreo .....	110
Ilustración 48. Presión de contaminantes por punto de muestreo.....	112
Ilustración 49. Vectores por análisis de componentes principales .....	114
Ilustración 50. Análisis de componente principales .....	114
Ilustración 51. Conductividad en el colector La Doctora.....	116
Ilustración 52. Color en el colector La Doctora.....	117
Ilustración 53. pH en el colector La Doctora.....	118

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Reclasificación del plan de facturación en función del tipo de agua residual ..	38
Tabla 2. Resumen estadístico de la población objeto de estudio.....	39
Tabla 3. Clasificación del sector productivo cuenca La Doctora .....	66
Tabla 4. Resumen de auto declaraciones .....	78
Tabla 5. Variable DQO .....	81
Tabla 6. Variable BO5 .....	81
Tabla 7. Variable SST .....	82
Tabla 8 . Parámetros para el análisis de laboratorio .....	108
Tabla 9. Eigen Valores .....	113

## RESUMEN

La creciente densificación urbana en el Valle de Aburrá ha originado una cantidad de fenómenos antrópicos que ocasionan cambios morfológicos y alteraciones en los ecosistemas naturales de las cuencas hidrográficas que lo componen, resultando altamente afectados por actividades humanas; algunas de dichas alteraciones son la consecuencia de entre otros, del transvase de cuencas, los vertimientos directos de agua residual doméstica ARD a fuentes naturales y vertimientos de agua residual no doméstica ARnD con altas cargas contaminantes al sistema de alcantarillado público; causantes de daños graves en las redes de transporte como obstrucciones, sedimentación y problemas operativos en las plantas urbanas de depuración.

En cuanto a este tema, hay poco conocimiento debido al escaso tiempo de entrada en vigor de la normatividad regulatoria de vertimientos de agua residual (Resolución 0631 de 2015), y por el desarrollo del estado del arte en materia de control de vertimientos al alcantarillado público en Colombia, el cual no es muy extenso.

Se pretende con esta investigación, aportar información sobre la dinámica de los vertimientos industriales y domésticos, a las redes de alcantarillado y realizar un monitoreo de la calidad del agua en el interior de éstas redes de transporte público, específicamente en el colector La Doctora, localizado en el municipio de Sabaneta, con el fin de determinar su comportamiento espacial, e identificar las zonas o distritos sanitarios diferenciales, de acuerdo con las características del agua residual presente en las redes aferentes.

*Palabras claves:* Cuenca La Doctora, aguas residuales domésticas ARD, aguas residuales no domésticas ARnD, vertimientos.

## Abstract

The increasing urban densification in the Aburrá Valley has caused a number of anthropic phenomena that cause morphological changes and alterations in the natural ecosystems of the watersheds that compose it, being highly affected by human activities, where some alterations are the consequence of, among others, direct drainage of wastewater to natural sources and discharges of non domestic wastewater ARnD with high pollutant loads to public sewage networks, causing serious damage to transport networks such as obstructions, sedimentation and operational problems in urban purification plants.

With regard to this issue, there is little knowledge due to the short time of entry into force of regulatory regulations for wastewater discharges (Resolution 0631 of 2015), and the development of the state of the art in terms of control of dumping to public sewerage in Colombia, which is not very extensive.

The investigation purpose is to carry out the water quality monitoring inside the public sewage transport networks, specifically in La Doctora collector in Sabaneta municipality in order to determine its spatial behavior, and determine zones or districts according to the residual water characteristic present in the afferent networks.

## INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO, presentó en nombre de la ONU-Agua el *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado*; concordante a los contenidos de *La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (UNESCO, 2017); presentó entre sus consideraciones las consecuencias del vertido de aguas residuales AR no tratadas o con tratamiento inadecuado, su efecto en las municipalidades; el reto que encarna la gestión de las AR para las instituciones; la “brecha en materia de conocimiento, investigación, tecnología y creación de capacidades” (pág. 138); y la necesidad de una marco jurídico coherente y comprometido.

Como lo mencionó el Informe de la UNESCO, existe una amplia brecha en el conocimiento, la tecnología aplicada, la investigación realizada y las oportunidades generadas en materia de gestión del recurso hídrico y en específico de las AR. Por ello, el Autor del presente estudio, se dio a la tarea de indagar respecto a los antecedentes del tema - por cierto, escasos- la legislación colombiana liderada por el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia. Presidencia de la República, 2015) y la Resolución 0631 por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Aprovechando además, su conocimiento sobre la problemática de las AR en el Valle de Aburrá, eligió la cuenca La Doctora del municipio de Sabaneta -por ser receptora

del vertimientos domésticos, comerciales e industriales- para enrutar un estudio desde los conceptos de caudal y calidad de ARD y ARnD, involucrando el análisis de laboratorio de los muestreos; el análisis estadístico, auto declaraciones de vertimiento, matrices de correlación por caudal y por carga contaminante; análisis por conductividad, por color y por daño potencial en la red; determinación de distritos sanitario de la cuenca la Doctora; y por supuesto la formulación de propuestas.

Consolidando la información de los muestreos, a través de software especializado ya existente y con la aplicación informática diseñada para el objeto de estudio; esta propuesta pretende motivar a la institucionalidad académica y a las empresas operadoras, para iniciar un nuevo hito en la gestión de las AR en Antioquia, Colombia y el mundo, en defensa de los pueblos desde la fuente de la vida: el agua.

## 1. ANTECEDENTES

A continuación, se presentan algunas apreciaciones realizadas por diferentes autores en los ámbitos mundial, nacional y regional, respecto a la realidad de las aguas residuales en las redes públicas.

### 1.1 Contexto Histórico Mundial

El crecimiento de los asentamientos humanos, ha contaminado las aguas y creado presión para adoptar las respuestas institucionales locales y las tecnologías de abastecimiento de agua y alcantarillado en red, desde mediados del siglo XIX. A finales del mismo siglo, muchos estados y adoptaron políticas de contaminación del agua, para lo cual las autoridades de salud pública aplicaron las nuevas políticas para proteger el suministro público de agua, de la contaminación de las aguas residuales. (Paavola, 2011)

Sin embargo, cuando la eficacia de la filtración y la cloración del agua potable se demostró a principios del siglo XX, las autoridades de salud pública dejaron de hacer cumplir las prohibiciones de descarga y, en cambio, presionaron a las compañías de agua a adoptar las nuevas medidas tecnológicas para proteger la salud pública. (Paavola, 2011).

La búsqueda de la civilización moderna de desarrollo tecnológico, manteniendo la seguridad alimentaria en medio de la explosión demográfica, dio lugar a niveles de contaminación del agua sin precedentes por fuentes antropogénicas. Los fenómenos naturales, como el cambio climático, también empeoran la ya grave situación. La salud pública está amenazada por enfermedades emergentes y reemergentes relacionadas con el agua. (Tongesayi, 2016).

En India por ejemplo, la rápida industrialización, la urbanización y la expansión de la población, han creado una serie de problemas ambientales, siendo la contaminación del agua la principal. Esto ha llevado al deterioro tanto de la calidad como de la cantidad de agua superficial y subterránea, afectando así la disponibilidad neta de agua para uso consuntivo. (Gupta, Sharma, & Yadav, 2016).

Los Planes de Seguridad del Agua WSP, recomendados por la Organización Mundial de la Salud OMS desde 2004, tratan de identificar proactivamente los riesgos potenciales para el suministro de agua potable e implementar barreras preventivas que mejoren la seguridad. (Alonsof, y otros, 2017).

Para superar la degradación y contaminación de los recursos naturales, la erosión del suelo y cambios en los regímenes hidrológicos derivados de la creciente población, del aumento de la urbanización y de las intensas actividades industriales y agrícolas, se ha desarrollado la metodología de gestión efectiva y holística, denominada Gestión Integrada de Cuenca IRBM. Esta es una herramienta administrativa internacionalmente aceptada. El IRBM es también uno de los requisitos de aplicación de la Directiva Marco de Agua de la Comisión Europea. (Karpuzcu, 2017).

Para las empresas británicas de agua y alcantarillado WaSCs, la capacidad de innovar los procesos de inversión de capital y consecuentemente los resultados de desempeño es fundamental; ya que buscan cambiar deliberadamente la infraestructura para mejorar la sostenibilidad de la prestación de servicios dentro de un marco comparativamente regulado. (Mcintoshb, Tannera, Tillotsone, & Widdowsond, 2016).

La posición estratégica de las fuentes naturales de agua y su relación con el crecimiento demográfico se plantea ampliamente por autores como Sun, Liu, Shang y

Zhang (2016) . De acuerdo con estos investigadores, los recursos hídricos juegan un papel importante en el desarrollo demográfico, social y económico de las poblaciones y asentamientos humanos.

Para Mickelson y Tsvankin, (2017), la definición operativa de la calidad del agua, está motivada por la discusión de métodos efectivos pero sencillos de tratamiento de aguas residuales. La complejidad del punto manual de las mediciones de muestreo y la limitación inherente del análisis de los datos de teledetección, conducen a la introducción de la detección electrónica de la calidad del agua.

A este respecto, se han realizado estudios como el de mediciones de línea de base para la concentración de nutrientes y las propiedades fisicoquímicas del agua costera, para entender la variación espacial de los nutrientes y el patrón físico-químico del agua costera de Port Dickson en la marea alta y baja. (Mangala Praveenaa & Zaharin Arisb, 2012).

Otro estudio, examina las diferentes variaciones temporales de los parámetros de calidad del agua en un estanque de mareas de aguas salobres; desarrollando ecuaciones para vincular las concentraciones de oxígeno disuelto DO en el estanque, con los procesos de gobierno y para analizar sus contribuciones relativas a los niveles de DO. (May, Ting , & Wenhui, 2017).

Los indicadores de calidad del agua pueden utilizarse para caracterizar el estado y cuantificar y calificar el cambio de ecosistemas acuáticos bajo diferentes regímenes de perturbación. Los modelos de calidad del agua basados en procesos pueden predecir las variaciones espaciotemporales de los indicadores de calidad del agua y proporcionar

información útil para los responsables de la formulación de políticas sobre la gestión racional de los recursos hídricos. (Jingjie, Vladan, & Xuan, 2016).

De otra parte, en el sector del agua y del alcantarillado están surgiendo asociaciones público-públicas PUP, como alternativa para mejorar el desempeño de las empresas de agua y alcantarillado. Las buenas experiencias se suman a la evidencia de que los PUP ofrecen una solución viable para la cooperación en el sector de servicios de agua. (Hukka & Vinnari, 2007).

Otra opción, ha sido la aplicación del modelo de asociación público-privada a los proyectos de tratamiento de aguas residuales urbanas; aumentando la capacidad de financiación y mitigando el riesgo de la deuda local, afectando los proyectos de tratamiento de aguas residuales urbanas al definir la relación entre el gobierno y el mercado. (Chen, Cui, Long, Yang, & Zhu, 2016).

## 1.2 Contexto Nacional

El ámbito colombiano no es ajeno a la tendencia global en el manejo del recurso hídrico; gradualmente se han venido implementando mediante leyes y regulaciones ambientales, políticas públicas que buscan proteger la salud humana desde la conservación del agua, mitigando el impacto de las poblaciones sobre los recursos naturales. (Granados & Sánchez, 2014).

Anteriormente, bajo la aplicación del Decreto 1594 de 1984 (Colombia. Presidencia de la República, 1984), el cumplimiento estaba determinado de acuerdo con la remoción de la carga contaminante del sistema de tratamiento del usuario, ocasionando, para algunos casos y para ciertas actividades productivas, que, aunque sus vertimientos cumplieran con el porcentaje de remoción, la concentración contaminante

final vertida es alta y ocasiona problemas en las redes de recolección y sistemas de tratamiento.

Con la expedición del Decreto 3930 de 2010, (Colombia. Presidencia de la República, 2010) cambió radicalmente la óptica para la gestión de vertimientos de agua residual no doméstica por parte de las autoridades ambientales, operadores de servicios públicos domiciliarios y del sector industrial en Colombia.

La Resolución 0075 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011) y el Decreto 2667 (Colombia. Presidencia de la República, 2012) señalan la exigencia de monitorear las cargas contaminantes registradas por los usuarios; datos prioritarios para el reporte a la autoridad ambiental competente, para el cálculo de cargas contaminantes y tasas retributivas.

La entrada en vigencia de la Resolución 0631 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) además de exigir la presentación de los reportes de cargas contaminantes a las autoridades ambientales competentes, abre una oportunidad de diagnosticar e integrar la información de la calidad del agua en las redes de alcantarillado, al conocer y registrar hasta 57 parámetros contaminantes por vertimiento de ARnD en el punto de descarga; los cuales se miden de acuerdo a la actividad productiva del usuario del sistema de alcantarillado público.

La Resolución 0631 de 2015, introduce cambios importantes en la forma de gestionar los vertimientos de ARnD. Dio paso al control de contaminantes por concentración; estableciendo así límites máximos permisibles, de acuerdo a los parámetros químicos presentes en el vertimiento, conforme al sector productivo en el cual se encuentre clasificada la industria usuaria del alcantarillado; este control lo deben

realizar las empresas de servicios públicos domiciliarios, las cuales deben exigir a sus usuarios generadores de ARnD, los respectivos estudios de caracterización de vertimientos líquidos.

### 1.3 Contexto Regional

En el ámbito local, son las empresas operadoras de servicios públicos domiciliarios, las encargadas de realizar el monitoreo y control de los vertimientos de ARnD a los usuarios del sistema de alcantarillado, por medio de la recopilación de estudios de caracterización de vertimientos, con los cuales se registra información importante sobre los parámetros contaminantes de las industrias, en el punto de descarga.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La normatividad ambiental colombiana, en cuanto al control de vertimientos de agua residual se refiere, está enfocada principalmente en el saneamiento de las fuentes hídricas, pero no cuenta con suficiente especificidad para la gestión de los vertimientos a las redes de alcantarillado público. Esto se puede apreciar en el Decreto Única Reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible:

En el artículo 2.2.3.3.4.17., se establece como obligación de los suscriptores y/o usuarios del prestador del servicio público domiciliario de alcantarillado... cumplir la norma de vertimiento vigente.... presentar al prestador del servicio, la caracterización de sus vertimientos... dar aviso a la entidad encargada de la operación de la planta tratamiento de residuos líquidos, cuando con un vertimiento ocasional o accidental puedan perjudicar su operación. (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, pág. 367).

En el artículo 2.2.3.3.4.18., se establece la responsabilidad del prestador del servicio público domiciliario de alcantarillado como usuario del recurso hídrico, ... deberá dar cumplimiento a la norma de vertimiento vigente y contar con el respectivo permiso de vertimiento o con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos –PSMV... Igualmente...será responsable de exigir respecto de los vertimientos que se hagan a la red de alcantarillado, el cumplimiento de la norma de vertimiento al alcantarillado público. Cuando ... determine que el usuario y/o suscriptor no está cumpliendo con la norma de vertimiento al alcantarillado público deberá informar a la autoridad ambiental competente, allegando la información pertinente, para que esta inicie el proceso sancionatorio por incumplimiento de la

norma de vertimiento al alcantarillado público. (Colombia. Presidencia de la República, 2015, pág. 367).

...El prestador del servicio público domiciliario del alcantarillado presentará anualmente a la autoridad ambiental competente, un reporte discriminado, con indicación del cumplimiento de la norma de vertimiento al alcantarillado, de sus suscriptores y/o usuarios en cuyos predios o inmuebles se preste el servicio comercial, industrial, oficial y especial... (Colombia. Presidencia de la República, 2015, pág. 368).

Llama la atención, que el prestador del servicio deba desarrollar las herramientas para la gestión y control de los vertimientos puntuales de agua residual al alcantarillado; pero no posee elementos legales para realizar acciones contundentes ante los usuarios que incumplen la norma de vertimiento al alcantarillado -acción ésta que no es su competencia- la única acción que puede acometer es reportar el incumplimiento ante la autoridad ambiental.

Actualmente en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, hay usuarios generadores de agua residual no doméstica ARnD, los cuales por las condiciones y características de sus vertimientos pueden potencialmente generar obstrucciones en las redes o realizar descargas que inhiben los procesos de tratamiento biológico de las plantas de aguas residuales; lo anterior, se convierte en una situación adversa para la infraestructura de servicios públicos, incrementando los costos de operación y mantenimiento del sistema; además de generar riesgos ambientales en el proceso de transporte de aguas residuales.

Los cambios introducidos en la legislación ambiental con el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) representan una oportunidad importante para los responsables, de implementar programas de gestión y control de vertimientos; los cuales de primera mano registran los cambios en las dinámicas de calidad del agua en las redes de alcantarillado.

De la misma manera, en la estructuración de estrategias para la gestión efectiva de vertimientos de agua residual, se pueden aprovechar los registros históricos de las bases de datos existentes en las empresas de servicios públicos; con el fin de integrar la información y generar a partir de análisis de datos espaciales, herramientas para la toma de decisiones en la planeación y operación del sistema de alcantarillado, como argumenta Empresas Públicas de Medellín EPM:

...gana importancia el tema de la visualización geográfica que demuestra ser primordial al sectorizar zonas de la ciudad para implementar programas de reparación, recorridos de mantenimiento con equipos y vehículos de presión succión, ternas para desobstrucciones e investigaciones con geófonos para el caso de infiltraciones, entre otros. (Empresas Públicas de Medellín, 2012, pág. 256)

...En la reparación, frente a cualquier tipo de daño presente en la red se debe tener la suficiente claridad en el sentido que se hayan explorado los diferentes métodos de reparación y realizado una investigación adecuada sobre las causas que lo han generado, y las consecuencias del mismo...

...Se debe garantizar la actualización permanente de los equipos y el software que son utilizados para el diagnóstico de redes y el personal encargado en los

diferentes procesos cuenta con la debida experiencia, capacitación y actualización continua. (Empresas Públicas de Medellín, 2012, pág. 257).

En este panorama, la presente investigación busca resolver el siguiente planteamiento ¿Cómo se puede establecer el comportamiento de los contaminantes vertidos al alcantarillado público, y a partir de allí, clasificar áreas diferenciadas o distritos sanitarios dentro de una cuenca hidrográfica determinada, que permitan diferenciar el tipo de agua residual transportada por las redes, entre agua residual doméstica y no doméstica?

Mediante la determinación de distritos sanitarios de agua residual, se establece una línea base sobre la dinámica de los vertimientos transportados por la red de alcantarillado en una cuenca específica, que posteriormente son conducidos a las plantas urbanas de tratamiento de agua residual. El estudio se realizó en el municipio de Sabaneta, ubicado en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el cual ha experimentado en los últimos años un crecimiento acelerado en su población y sus actividades industriales:

En el municipio de Colombia con menor extensión territorial (15 kilómetros cuadrados), según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, la población y el crecimiento urbanístico aumentan sin control. Tan solo en nueve años los habitantes de Sabaneta se duplicaron (pasaron de 54.595 en 2009, a 103.217 en 2018) y el número de viviendas se incrementó en 45,7 % (en igual periodo subió de 14.367 a 31.373) ... El fenómeno de densificación urbana cubija al resto del área metropolitana. Según el Dane, la población del Valle de Aburrá se ha multiplicado por siete en los últimos 65 años, llegando a 3,8 millones de

habitantes. Sin embargo, estudios del Departamento Nacional de Planeación pronostican que 1,8 millones más de personas poblarán la región hasta 2050... El fenómeno es más preocupante en Sabaneta por su pequeña extensión territorial...

...Es que Sabaneta presentaba, hasta hace dos décadas, una dinámica social de un pueblo. Hoy es un territorio transformado con una urbanización sobredimensionada que genera desequilibrios en ámbitos prioritarios como los servicios públicos, la movilidad, la vivienda, los recursos naturales y el espacio público. (Álvarez & Ortiz, 2018).

Como consecuencia de lo anterior, se ha generado en los últimos años un incremento significativo de vertimientos de agua residual al sistema de alcantarillado en la cuenca La Doctora del municipio de Sabaneta. Es necesario conocer la calidad y dinámica del agua transportada por los colectores asociados a la cuenca; de acuerdo con lo definido por El Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible en la Resolución 0631 de 2015, en la que se discrimina por tipo de agua residual, así:

Aguas Residuales Domésticas, ARD: Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:

1. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
2. Descargas de los sistemas de aseo personal - duchas y lavamanos- de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

Aguas Residuales no Domésticas, ARnD: Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, ARD. (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, pág. 2).

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento de la calidad del agua residual de los vertimientos de agua residual, mediante la integración y análisis estadístico y geográfico de los datos obtenidos a partir del modelo de investigación y control de vertimientos en EPM, que permitan conocer la variación de los parámetros contaminantes en la red y generen herramientas para la elaboración de estrategias en la gestión y control de vertimientos al alcantarillado público, en el colector la Doctora del Municipio de Sabaneta, Antioquia.

#### 3.2 Específicos

- Determinar, mediante estudios de caracterización y registros de caudal vertido a la red por los usuarios del servicio, la variabilidad del agua residual transportada por las redes de alcantarillado público en el colector la Doctora del Municipio de Sabaneta, Antioquia.
- Identificar zonas o distritos sanitarios con características diferenciales en cuanto al caudal y parámetros fisicoquímicos del agua residual transportada por las redes, en el colector la Doctora del Municipio de Sabaneta, Antioquia.
- Determinar un modelo geo estadístico, que permita identificar el tipo de agua residual presente en la red del colector la Doctora del Municipio de Sabaneta, Antioquia, entre agua residual doméstica y no doméstica.

#### 4. METODOLOGÍA

Para la determinación de los distritos sanitarios en la cuenca La Doctora se propone un diseño metodológico con cinco etapas o fases, descritas a continuación:

1. Generalidades. En esta etapa se desarrollaron las actividades de consulta y recopilación de la información del el Plan de Básico Ordenamiento Territorial PBOT del municipio de Sabaneta (2009), con el fin de establecer la información base sobre el territorio y población del área de estudio.

2. Determinación del caudal de vertimientos de la cuenca La Doctora. A partir de los registros de facturación de los usuarios de alcantarillado activos en la cuenca La Doctora, se obtienen los resultados y se realizan análisis geo estadísticos para determinar la presión ejercida por el agua residual en la cuenca en cuanto a caudal se refiere, de acuerdo a los siguientes métodos:

- Análisis de patrones por clúster y valor atípico Moran I
- Clustering alto/bajo G general de Getis-Ord
- Estimación de densidad Kernel

3. Determinación de la calidad de los vertimientos de agua residual. A partir de las bases de datos que se generan como resultado del modelo para la investigación, el monitoreo y control de aguas residuales en Empresas Públicas de Medellín E.S.P., se obtienen los registros de las auto declaraciones de los usuarios con vocación industrial de la cuenca La Doctora. Estas auto declaraciones consisten en estudios de caracterización de las aguas residuales generadas en los procesos industriales de los usuarios generadores de ARnD, y pueden ofrecer un panorama sobre el estado y los potenciales riesgos en la red de alcantarillado público.

Esta información se analiza en forma agrupada con el fin de realizar un diagnóstico general del estado de los vertimientos aportados por la industria, y no pretende individualizar ni analizar ningún vertimiento en particular; además se protege la identidad de los usuarios generadores de vertimientos a la red.

El procesamiento de las auto declaraciones de los usuarios industriales en la cuenca La Doctora, permite conocer la concentración hasta de 57 parámetros contaminantes de la calidad del agua residual que es vertida a las redes públicas de alcantarillado. Estos parámetros fisicoquímicos son determinados por la Resolución 0631 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) de acuerdo con el tipo de actividad de cada industria, y se solicitan durante cada año con reporte anual a las autoridades ambientales, los cuales son procesados y almacenados en las bases de datos de EPM previa entrega por parte de los usuarios industriales.

A partir de los registros obtenidos se procede a realizar un análisis estadístico de los resultados de acuerdo a los siguientes métodos:

- Matriz de correlación por concentración de ARnD
- Matriz de correlación por caudal
- Matriz de correlación por carga contaminante
- Prueba de normalidad de los datos
- Agregación espacial de auto declaraciones por caudal
- Agregación espacial de auto declaraciones por carga contaminante
- Agregación espacial por daño potencial a la red
- Agregación espacial por color

- Estimación Kernel Mapa de calor - presión por calidad del ARnD

4. Determinación de distritos sanitarios de agua residual: Se procede a realizar la delimitación de las áreas específicas a partir de la clasificación del agua residual definida por la Resolución 0631 de 2015 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), y de acuerdo con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores se clasifican los distritos sanitarios DS en DS de agua residual doméstica, DS mixto y DS de agua residual no doméstica.

5. Determinación de la calidad del agua residual colector La Doctora. Determinación de puntos de muestreo y número de muestras. Las muestras a tomar se seleccionaron de acuerdo con el criterio de estacionalidad -verano, invierno y transición- con cinco muestreos por punto, en total se tomaron 15 muestras distribuidos así:

- Parte alta DS ARnD: cinco muestras.
- Parte media DS Mixto: cinco muestras.
- Parte baja DS ARnD: cinco muestras

Estos muestreos se tomaron bajo los estándares del IDEAM (INVEMAR, 2017) y se realizaron bajo el CONTRATO CT2015 - 001485 R3 de EPM.

La toma de muestras para la caracterización del sector se realizó conforme a lo establecido en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas del IDEAM y el Procedimiento General de Muestreo de Agua Residual - Industrial y Doméstica- y Agua Natural implementado en el Sistema de Calidad por Labormar S.A.S. (Laboratorio Microbiológico Ortíz Martínez, 2018).

Las muestras fueron recolectadas, almacenadas y preservadas acorde con lo establecido en el Standar Methods, (2019).

Las alícuotas fueron recolectadas cada 15 minutos, para realizar la composición de las muestras al final de la jornada con base al caudal registrado. Durante el monitoreo las muestras fueron almacenadas en neveras y preservadas con hielo -temperatura  $\leq 6^{\circ}\text{C}$ . A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para la composición de las muestras.

$$V_a = Q_i \times V_c \times \bar{Q} \times n$$

donde  $V_a$ : Volumen de la alícuota (ml)

$Q_i$ : Caudal del instante (l/s)

$V_c$ : Volumen a componer (ml)

$\bar{Q}$ : Caudal promedio (l/s)

$n$ : Número de alícuotas recolectadas (Laboratorio Microbiológico Ortíz Martínez, 2018).

Una vez realizada la composición de la muestra -siguiendo el protocolo anterior- se distribuyeron las muestras de la siguiente forma:

- Recipiente plástico 4 litros, para análisis fisicoquímicos DBO5 - SST) preservado con refrigeración a temperatura menor o igual a  $6^{\circ}\text{C}$ .
- Recipiente de vidrio ámbar 1 litro, para determinación de metales cobre, cromo, níquel plomo y zinc, preservado con ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  hasta  $\text{pH} \leq 2$ .
- Dos recipientes 500 mL cada uno, preservados con ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta  $\text{pH} \leq 2$ , para la determinación de grasas y aceites.
- Recipiente de vidrio ámbar (1 litro) para determinación de DQO y nitrógeno total Kjeldhal NTK, preservado con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hasta un  $\text{pH} \leq 2$ .

- Recipiente de vidrio 500 mL preservado con  $H_2SO_4$  hasta  $pH \leq 2$ , para la determinación de fósforo total PT. (Laboratorio Microbiológico Ortíz Martínez, 2018).

Las muestras fueron mantenidas bajo cadena de custodia y llevadas al laboratorio de calidad de agua EPM para su posterior análisis, dicho laboratorio se encuentra acreditado por el IDEAM bajo la NTC 17025:2005.

Mediante el método de Kernel, se rasterizan los análisis de distribución espacial en imágenes -píxeles-, de acuerdo con su distancia euclidiana y en función de su caudal, carga contaminante o concentración según el caso.

Luego de obtener los resultados individuales de acuerdo con el caudal, cargas contaminantes, daño potencial y color, se realiza la integración de las áreas de densidad de cada componente y se realiza una suma ponderada para determinar las áreas de presión-calor, resultantes del análisis integrado de la información y que se obtiene mediante operaciones de álgebra de mapas. Finalmente, se obtiene el mapa de calor presión de los vertimientos de ARnD en la cuenca la Doctora por auto declaraciones de vertimientos a la red.

## 5. GENERALIDADES

### 5.1 Área de Estudio

El área de estudio del presente proyecto de investigación, se localiza en el Municipio de Sabaneta Antioquia Colombia, Ilustración 1. Este municipio, ubicado al sur oriente del departamento de Antioquia y hace parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Tiene vida jurídica independiente desde el 1° de enero de 1968, anteriormente corregimiento del municipio de Envigado.

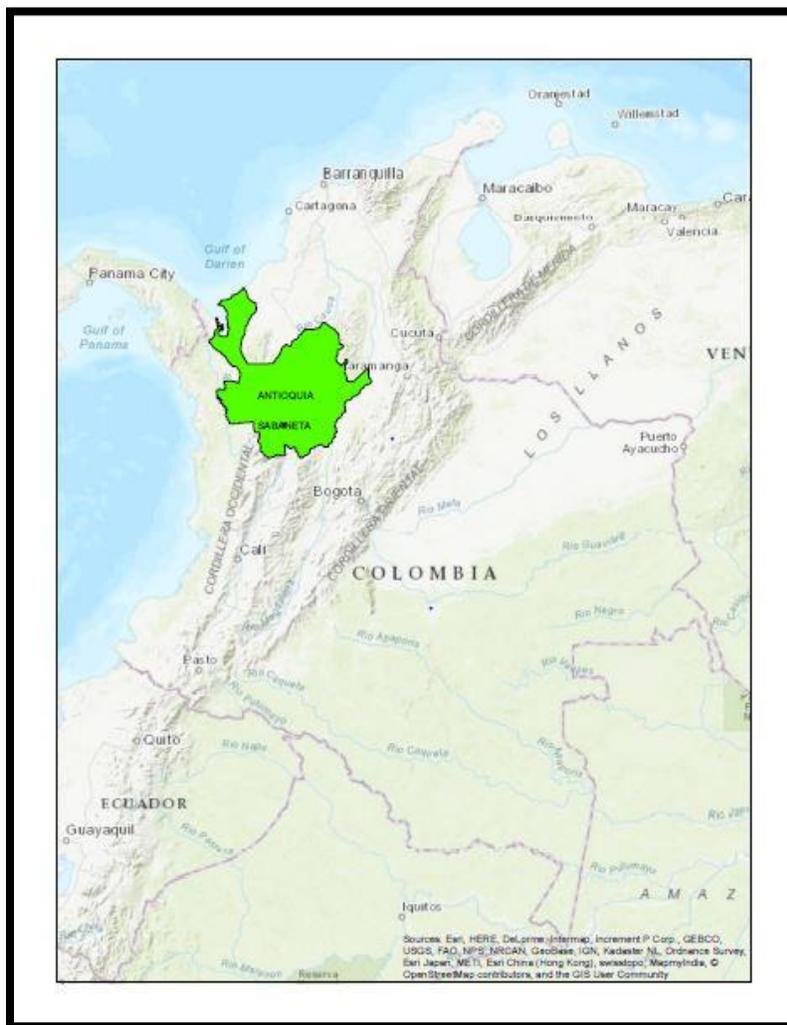


Ilustración 1. Localización municipio de Sabaneta Antioquia

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

A continuación, se presenta información específica del municipio.

## 5.2 Extensión

Sabaneta es el municipio más pequeño de Colombia. Cuenta con una superficie total de 15 km<sup>2</sup>, de los cuales 26.66% -4 Km<sup>2</sup> corresponden a la zona urbana y 73,33% -11 km<sup>2</sup>- a la zona rural.

## 5.3 Sectorización Urbana

El municipio está sectorizado de la siguiente manera:

Barrios: Los barrios, como subdivisión de identidad propia de la ciudadanía y como sentido común de pertenencia de sus habitantes, han sido reconocidos históricamente en el municipio de Sabaneta 31 barrios. (Sabaneta. Alcaldía Municipal, 2009).

Sectorización rural: El suelo rural se encuentra dividido en seis (6) veredas, con acceso por vías en buen estado y con tramos de un solo carril. Estas son: Cañaveralejo, La Doctora, Las Lomitas, María Auxiliadora, Pan de Azúcar y San José (Sabaneta. Alcaldía Municipal, 2009).

## 5.4 Población

Sabaneta es un municipio poblacionalmente urbano y territorialmente rural. El último censo de población lo realizó el Dane en el año 2005. El crecimiento de Sabaneta en los últimos 10 años desborda los cálculos y tendencias con las cuales se pronostica la población para los años siguientes al censo. Hay alrededor de 25.000 viviendas habitadas para el 2015, calculada con los servicios de acueducto tanto en la zona urbana como en la rural, lo cual permite aseverar que Sabaneta tiene aproximadamente 70.000 habitantes. De igual manera en catastro municipal no se tiene una cifra actualizada del

total de los predios, puesto que el ritmo acelerado de las construcciones no coincide con el de las incorporaciones de nuevos predios. Sin embargo, el Dane proyecta una población de 51.860 habitantes para el 2015 (Sabaneta. Concejo Municipal, 2009) y sobre esta cifra, se calculan los indicadores de impacto, resultado y producto, lo que conduce a datos poco confiables cuando se trabaja con dos bases diferentes: la real demanda de servicios de la población asentada en el territorio y la proyectada según un censo que se realizó hace cerca de 15 años.

En la Ilustración 2, se presenta la ubicación de la cuenca que conforma el municipio de sabaneta. En esta se pueden apreciar algunos de sus municipios vecinos.

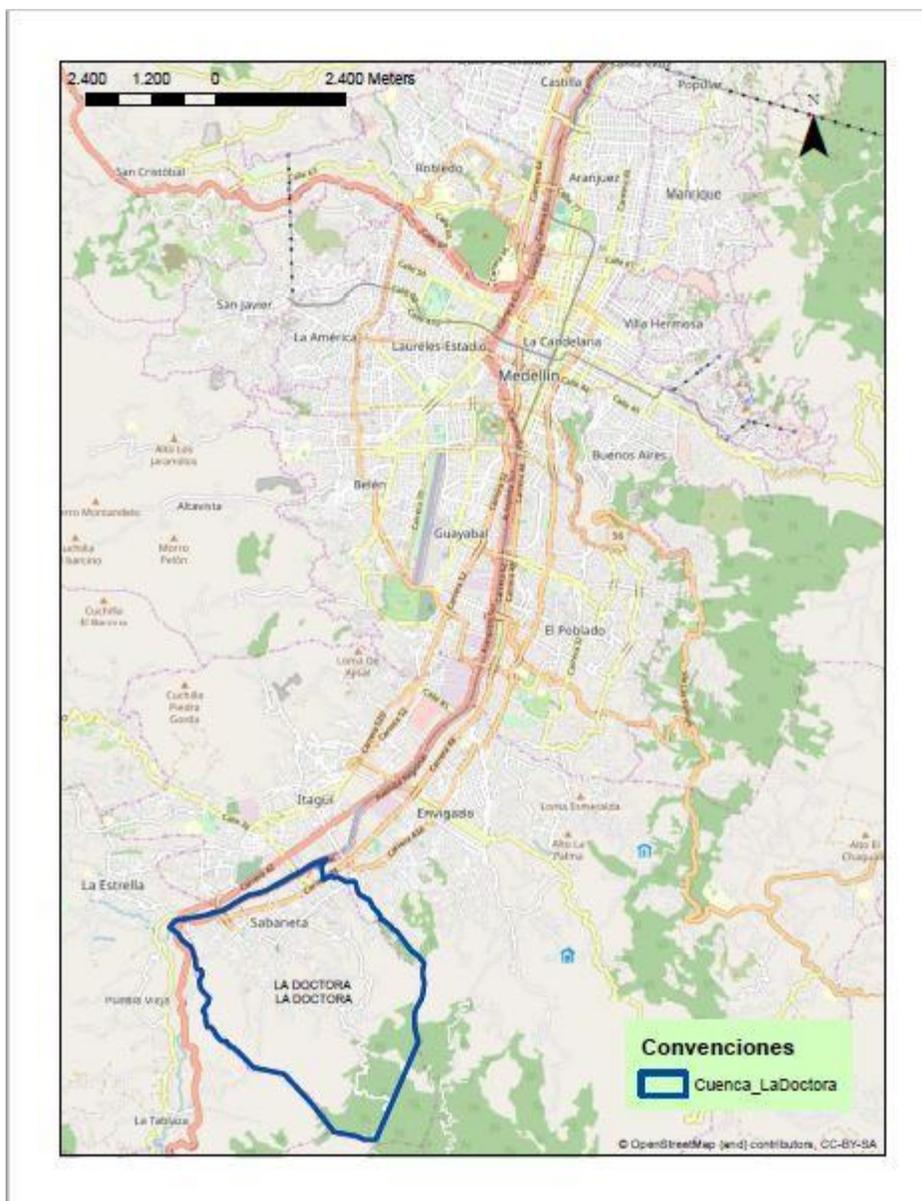


Ilustración 2. Ubicación municipio de Sabaneta y su cuenca

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

## 6. CAUDAL DE AGUA RESIDUAL

En el proyecto se empleó como base de datos de usuarios generadores de agua residual, el volumen promedio mensual entregado a las redes de alcantarillado público, además de su coordenada geográfica y el plan de facturación. Esta información corresponde a datos propios de las Empresas Públicas de Medellín (sistema de registro y facturación EPM octubre 2017). Puede decirse que, de la información anterior, se logró realizar un análisis geo estadístico multivariado de la dinámica espacial de los vertimientos en el municipio de Sabaneta.

En total se registra una población de 32.170 usuarios de alcantarillado activos en el sistema, que vierten un promedio de 491.828,66 m<sup>3</sup> mensuales. Teniendo en cuenta el desarrollo urbanístico y el asentamiento de algunas industrias importantes en la cuenca La Doctora, se observa una presión importante en el uso del recurso hídrico, que es transvasado en gran parte desde el embalse La Fe, localizada en el municipio de el Retiro.

A continuación, se presenta la Tabla 1, en la que se realizó una reclasificación de los puntos de vertimiento según su plan de facturación. Lo anterior, de acuerdo con el tipo de agua residual que es descargado a la red e incluyendo los criterios definidos por El Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible en el (Colombia. Presidencia de la República, 2015)

Tabla 1. Reclasificación del plan de facturación en función del tipo de agua residual

<b>Plan de Facturación</b>	<b>Tipo de agua residual</b>
AGUA PREPAGO CORTADOS	Agua residual doméstica ARD
ÁREAS COMUNES	
DIRECTAS LEGALIZADAS RESIDEN	
HOGAR COMUNITARIO DECRETO 3590	
INQUILINATO	
LEY 675 DEL 2001	
RESIDENCIAL	
RESIDENCIAL CON AGUA PROPIA	
DIRECTAS LEGALIZADAS NO RESID	Agua residual no doméstica ARnD
NO RESIDENCIAL	
RESIDUAL CON MEDIDOR CON CONSU	
VERTIMIENTOS NO RESIDENCIALES	

Fuente: Elaboración propia según sistema de facturación EPM, Open.

A continuación, se presenta el resumen estadístico de la población en función del volumen mensual de vertimientos, a las redes de alcantarillado público.

Tabla 2. Resumen estadístico de la población objeto de estudio

Resumen general de volumen de vertimientos en Sabaneta	
Número de puntos de vertimiento a la red ARD	29.256
Vertimiento total promedio ARD (m <sup>3</sup> /mes)	356.450,51
Número de puntos de vertimiento a la red ARnD	2.914
Vertimiento total promedio ARnD (m <sup>3</sup> /mes)	135.378,15
Resumen estadístico ARD	
Vertimiento promedio mínimo	0,3 m <sup>3</sup> /mes
1st Cuartil (25%)	6,46 m <sup>3</sup> /mes
Mediana (50%)	10,07 m <sup>3</sup> /mes
Media	12,18 m <sup>3</sup> /mes
3rd Cuartil (75%)	14,38 m <sup>3</sup> /mes
Desviación estándar	49,64
Vertimiento promedio máximo (m <sup>3</sup> /mes)	7.700,48 m <sup>3</sup> /mes
Resumen estadístico ARnD	
Vertimiento promedio mínimo	0,67 m <sup>3</sup> /mes
1st Cuartil (25%)	2,46 m <sup>3</sup> /mes
Mediana (50%)	9,92 m <sup>3</sup> /mes
Media	46,46 m <sup>3</sup> /mes
3rd Cuartil (75%)	19,23 m <sup>3</sup> /mes
Desviación estándar	2,81
Vertimiento promedio máximo (m <sup>3</sup> /mes)	8.568,23 m <sup>3</sup> /mes

Fuente: elaboración propia según RStudio,

Se observa que en el municipio de Sabaneta el 91% de los vertimientos son generados por usuarios del sector residencial ARD y producen el 72% de las descargas al alcantarillado. Por lo tanto, se puede inferir que en general la cuenca La Doctora presenta una tendencia de vertimientos asociada principalmente, al tipo agua residual doméstica ARD.

Sin embargo, los usuarios generadores de ARnD, a pesar de ser el 9% de la población total, vierten en la cuenca un 28% del caudal promedio mensual. A continuación, se presenta un análisis más profundo del comportamiento estadístico y espacial del volumen de vertimientos, descargados al alcantarillado público en el área de estudio.

#### 6.1 Agua Residual Doméstica ARD

Según la Tabla 2, el 75% de los usuarios presentan tendencia esperada para el vertimiento generado en una instalación residencial (tercer cuartil). Lo cual indica que aproximadamente 21.947 usuarios del servicio de alcantarillado no sobrepasan los 14,38 m<sup>3</sup> del volumen de vertimiento mensuales promedio, tal como se puede apreciar en la Ilustración 3 de comparación de cuantiles, para el agua residual doméstica ARD.

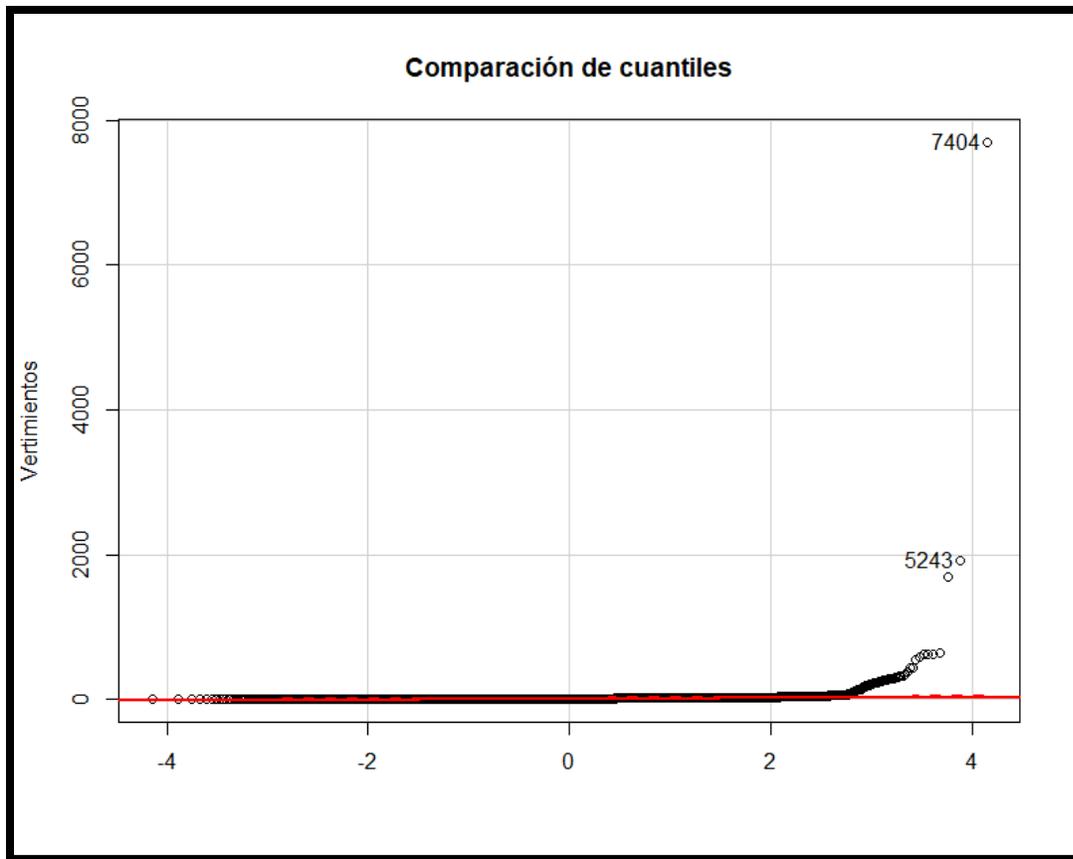


Ilustración 3. Comparación de cuantiles, vertimiento mensual promedio

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

De acuerdo con los datos obtenidos, se observa una distribución de frecuencia con asimetría positiva, una desviación estándar de 80,65 y una media aproximada de 12. Por lo tanto, de acuerdo con estos resultados, se realiza una transformación de variables, empleando una transformación de potencia con el fin de realizar una normalización que conduzca a una distribución simétrica, y más cercana a la distribución normal, pudiendo generar una mejor visualización para la interpretación de los datos. Como resultado, en la Ilustración 4 e Ilustración 6, se muestra de un lado, el bajo volumen de la mayoría de los vertimientos presentes en el municipio de Sabaneta menores a 15 m<sup>3</sup>/mes, y de otro

lado que, en la cuenca se asientan usuarios residenciales con volúmenes altos de generación de vertimientos, los cuales se agrupan en el 25% de la población general.

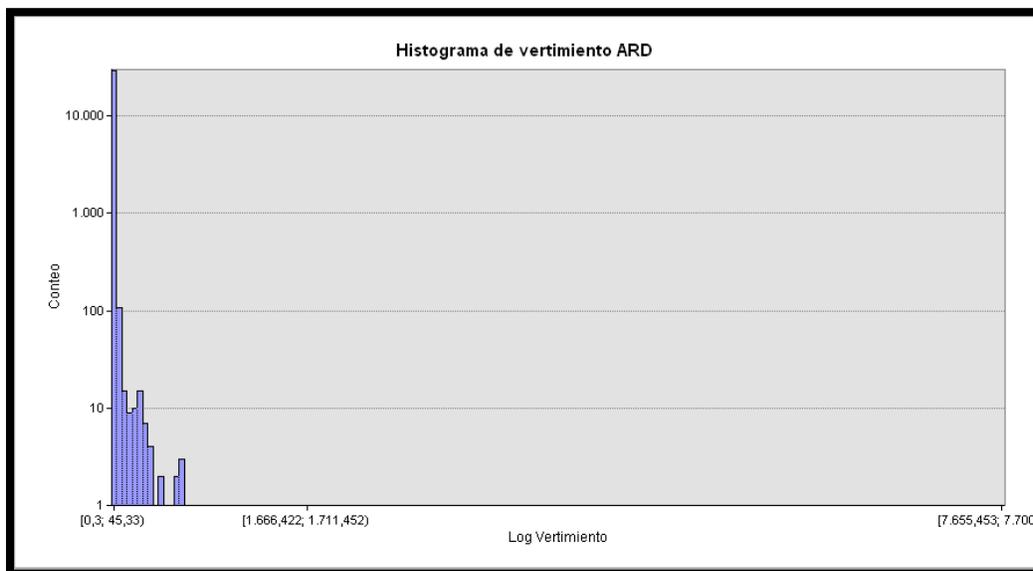


Ilustración 4. Histograma normalizado, Log (m<sup>3</sup>/mes) ARD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

## 6.2 Agua Residual no Doméstica ARnD

El resumen numérico presentado en la Ilustración 2, denota una tendencia baja de producción de vertimientos de ARnD por punto de descarga en el municipio de Sabaneta. De otro lado, se puede observar que el 75% de la población presenta vertimientos promedio mensuales inferiores a los 19 m<sup>3</sup>, con una media de 46 m<sup>3</sup>/mes, valor de caudal cercano al generado en un establecimiento residencial generador de ARD.

De acuerdo con lo anterior se puede inferir que la vocación del 75% de establecimientos generadores de ARnD en el municipio de Sabaneta pueden ser de actividades comerciales tales como: restaurantes, salones de belleza, almacenes,

farmacias, entre otros, los cuales por actividades específica generan en muchos casos aguas residuales domésticas, aunque de acuerdo con su clasificación en el sistema de facturación, se enmarcan como generadores de ARnD.

El volumen de vertimientos generado por este tipo de usuarios de alcantarillado no denota una actividad productiva que los pueda hacer objeto de seguimiento y control. En la Ilustración 5, se muestra el bajo volumen de la mayoría de los vertimientos en el municipio de Sabaneta.

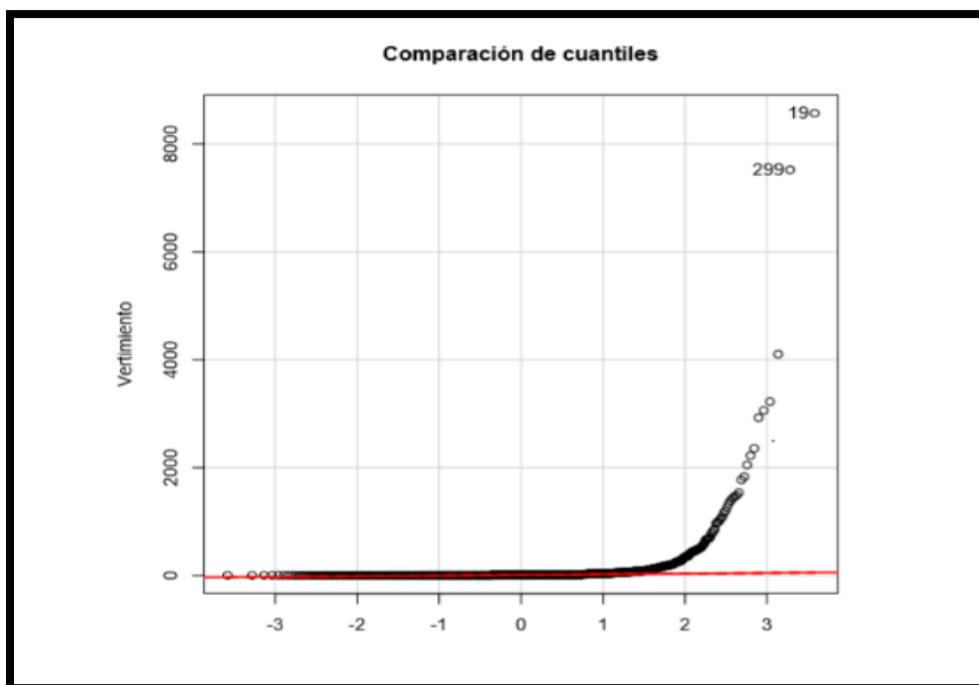


Ilustración 5. Comparación de cuantiles por punto de descarga

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

De acuerdo con los datos obtenidos se observa una distribución de frecuencia con asimetría positiva y una desviación estándar de 281,04. También, una media que se aproxima a 46,46, por lo tanto, según estos resultados, se realiza una transformación de potencia con el fin de realizar una normalización que conduzca a una distribución

simétrica más cercana a la normalidad, que pueda generar una mejor visualización para la interpretación de los datos.

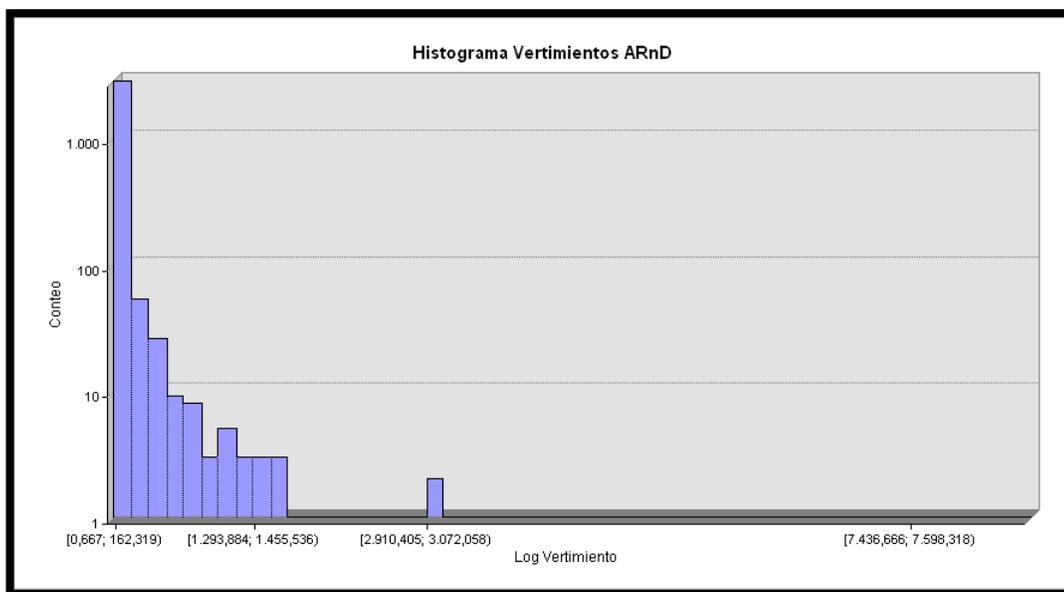


Ilustración 6 Histograma normalizado Log(m3/mes) ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Luego de la transformación logarítmica se observa un sesgo positivo en el histograma presentado, Ilustración 6, esto se debe a la enorme diferencia en el espectro del volumen de vertimiento generado entre un establecimiento comercial y una gran industria.

### 6.3 Análisis de Distribución Geoespacial por Caudales Vertidos a la Red

A partir de la normalización por transformaciones de potencia realizadas a los datos de vertimientos en el apartado anterior, se realiza un procesamiento de datos el cual integra métodos geo estadísticos multivariados para determinar el comportamiento espacial de las descargas de agua residual al alcantarillado en el área de estudio.

Para este análisis de distribución espacial con el cual se examina la dispersión o concentración de los factores geográficamente distribuidos en el municipio de Sabaneta, se utilizan tres métodos de agrupamiento espacial de variables, el primero es el análisis de patrones por clúster y valor atípico, Correlación espacial Moran I, el segundo es por el método de Cluster alto bajo, Getis-Ord\_Gi, y finalmente se utiliza el método de densidad de Kernel para identificar las áreas de presión o calor en la cuenca por vertimientos de agua residual. Luego con base en los resultados, se definen las zonas diferenciales en la cuenca a partir de las correlaciones encontradas entre los vertimientos en el área geográfica de estudio.

#### 6.3.1 Análisis de Patrones por Clúster y Valor Atípico Moran I

Este método dado un conjunto de entidades ponderadas identifica puntos calientes, puntos fríos y valores atípicos espaciales estadísticamente significativos, mediante la estadística de Anselin local de Moran. (ESRI, 2019).

Esta herramienta crea una nueva Clase de entidad de salida con los siguientes atributos para cada entidad de la Clase de entidad de entrada: índice I de Moran local, puntuación z, pseudo valor P y tipo de clúster/valor atípico COType.

Las puntuaciones z y los valores p son medidas de significancia estadística que indican si se rechazará la hipótesis nula, entidad por entidad. En efecto, indican si la aparente similitud -un clustering espacial de valores altos o bajos- o la falta de similitud (un valor atípico espacial) es más marcada de lo que se espera en una distribución aleatoria. Las puntuaciones z y los valores p de la Clase de entidad de salida no reflejan ninguna corrección Índice de descubrimientos falsos FDR.

Una puntuación  $z$  positiva alta para una entidad indica que las entidades circundantes tienen valores similares -ya sea valores altos o bajos-. El campo COType en la Clase de entidad de salida será Alto/alto para un clúster de valores altos estadísticamente significativo y Bajo/bajo para un clúster de valores bajos estadísticamente significativo.

Una puntuación  $z$  negativa baja (por ejemplo, inferior a  $-3,96$ ) para una entidad indica un valor atípico de datos espacial estadísticamente significativo. El campo COType en la Clase de entidad de salida indicará si la entidad tiene un valor alto y está rodeada por entidades con valores bajos Alto/bajo o si la entidad tiene un valor bajo y está rodeada por entidades con valores altos Bajo/alto.

El campo COType indicará siempre clústeres y valores atípicos estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 95 por ciento. Solamente las entidades estadísticamente significativas tienen valores para el campo COType. Cuando se marca el parámetro opcional Aplicar corrección False Discovery Rate FDR, la importancia estadística se basa en un nivel de confianza corregido del 95 por ciento.

Las permutaciones se utilizan para determinar la probabilidad de encontrar la distribución espacial real de los valores que está analizando. Para cada permutación, los valores de vecindad alrededor de cada entidad se reorganizan aleatoriamente y se calcula el valor  $I$  de Moran local. El resultado es una distribución de referencia de los valores que luego se comparan con el valor  $I$  de Moran real observado para determinar la probabilidad de que el valor observado pueda encontrarse en la distribución aleatoria. El valor predeterminado es de 499 permutaciones; no obstante, la distribución de la

muestra aleatoria se ha mejorado con más permutaciones, lo que mejora la precisión del pseudo valor P.

### 6.3.2 Clustering alto/bajo G General de Getis-Ord

Este análisis mide el grado de agrupamiento para valores altos o bajos mediante la estadística G general de Getis-Ord, se pretende averiguar, si el agrupamiento de datos se da para valores bajos o de lo contrario para valores altos de vertimiento. (ESRI, 2019):

La herramienta Clustering devuelve cuatro valores: G general observada, G general esperada, puntuación z y valor P.

Los resultados de la puntuación z y el valor p son medidas de significancia estadística que indican si se debe rechazar o no la hipótesis nula. Para esta herramienta, la hipótesis nula establece que los valores asociados con entidades están distribuidos en forma aleatoria.

La puntuación z está basada en el cálculo de la hipótesis nula de aleatorización. Mientras más alta (o más baja) sea la puntuación z, mayor será la intensidad del clustering. Una puntuación z cercana a cero indica que no hay un clustering evidente dentro del área de estudio. Una puntuación z positiva indica que hay un clustering de valores altos. Una puntuación z negativa indica que hay un clustering de valores bajos.

Para el análisis, se toma como base la transformación de potencia por logaritmo natural, obtenida anteriormente para observar la dispersión normalizada de la ubicación espacial de los vertimientos.

### 6.3.3 Agua Residual Doméstica

Como se puede observar en la Ilustración 7, los vertimientos de ARD se concentran en la zona norte de la cuenca La Doctora, en su parte baja, cerca al río

Medellín; adicionalmente estos puntos de descarga se ubican en una zona clasificada como de uso de suelo urbano y semiurbano según el PBOT, Acuerdo 22 (Sabaneta. Alcaldía Municipal, 2009).

Se presenta en el Ilustración 7 la distribución de frecuencias espaciales según el método de cuartiles para el análisis estadístico de los datos (ESRI, 2019), donde se hace evidente la distribución homogénea del ARD en la cuenca. En esta gráfica el 75% de la población está representada por los puntos azules, verdes y amarillos, con un vertimiento promedio inferior a 14,38 m<sup>3</sup>/mes aportan el 50% de los vertimientos de ARD en la cuenca con 179.343 m<sup>3</sup> mensuales. Estos vertimientos se encuentran homogéneamente distribuidos por toda la zona urbanizada en el municipio de Sabaneta.

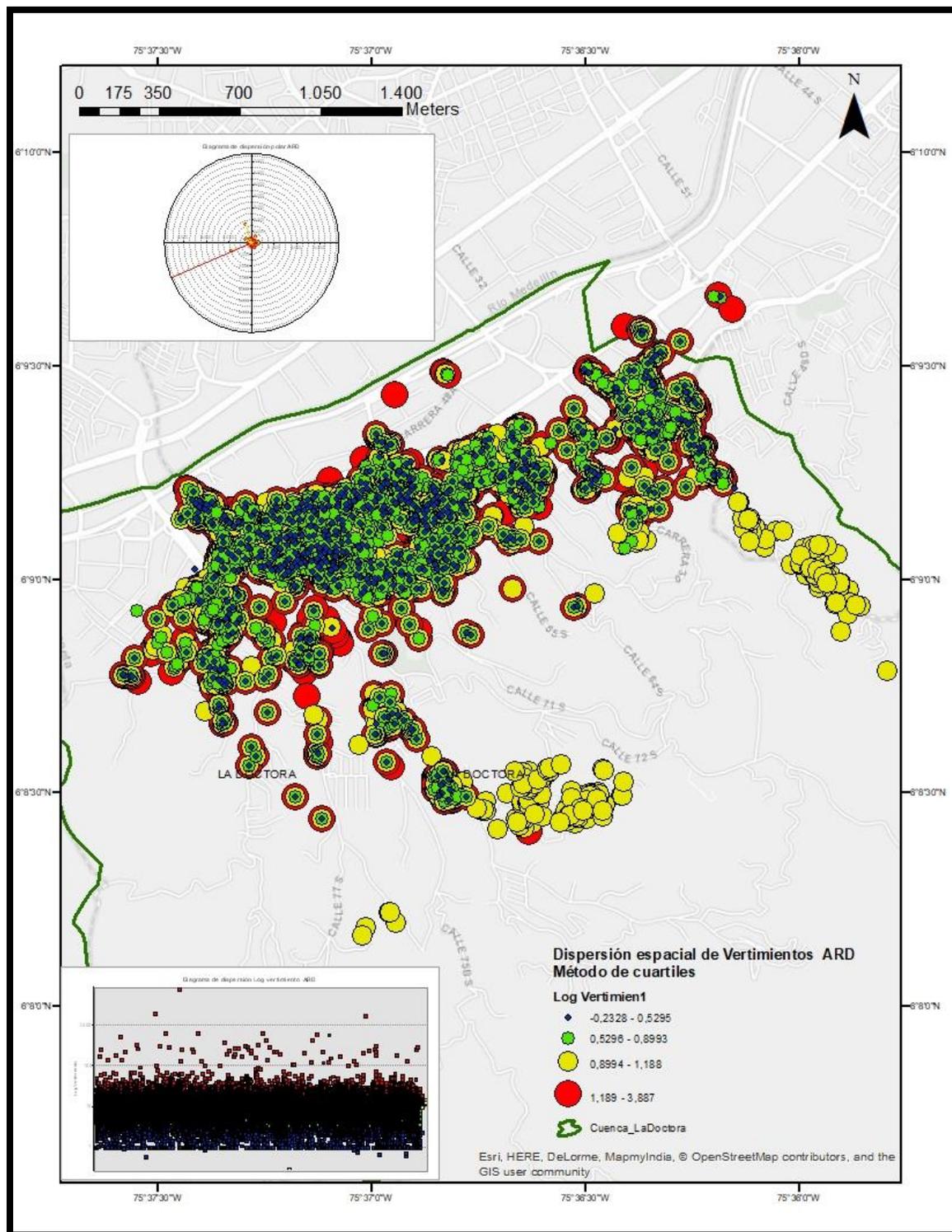


Ilustración 7. Distribución espacial de frecuencias ARD.

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

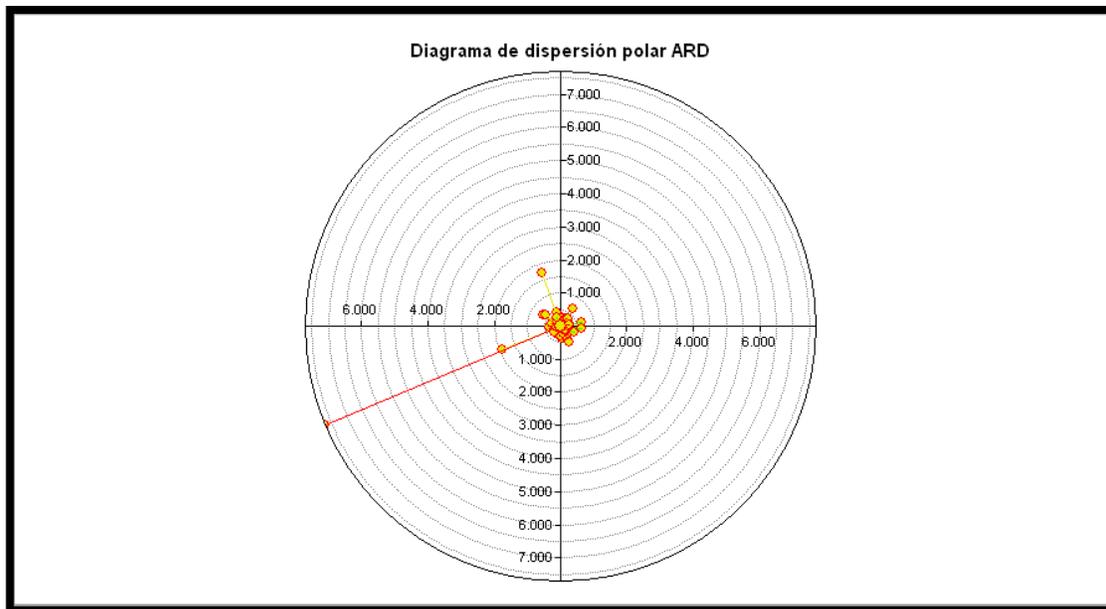


Ilustración 8. Diagrama de dispersión polar ARD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

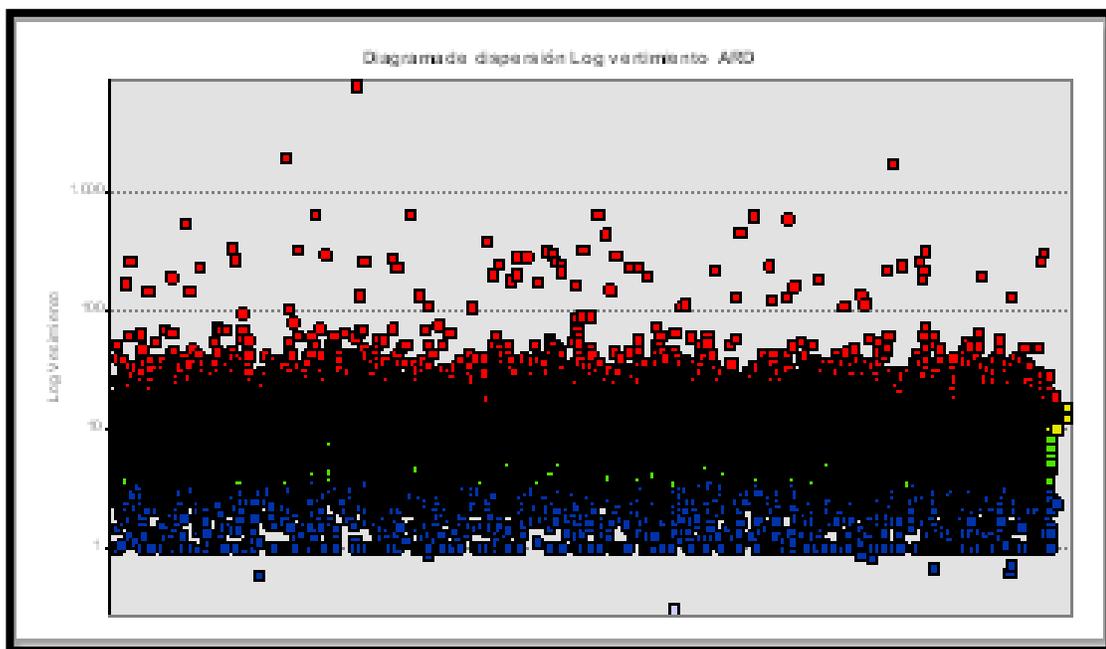


Ilustración 9. Diagrama de dispersión de frecuencias ARD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Se corrobora el comportamiento uniforme de los vertimientos de bajo caudal en la zona urbana, además llama la atención sobre la desviación importante que registran algunos vertimientos con caudal alto, representados por los puntos rojos en el cuarto cuartil (25%), los cuales aportan el 50% del caudal de Agua residual doméstica en la cuenca.

A continuación, Ilustración 10, se muestran los datos del informe de correlación espacial, aplicado a los caudales vertidos a la red de alcantarillado del ARD en la zona de estudio.

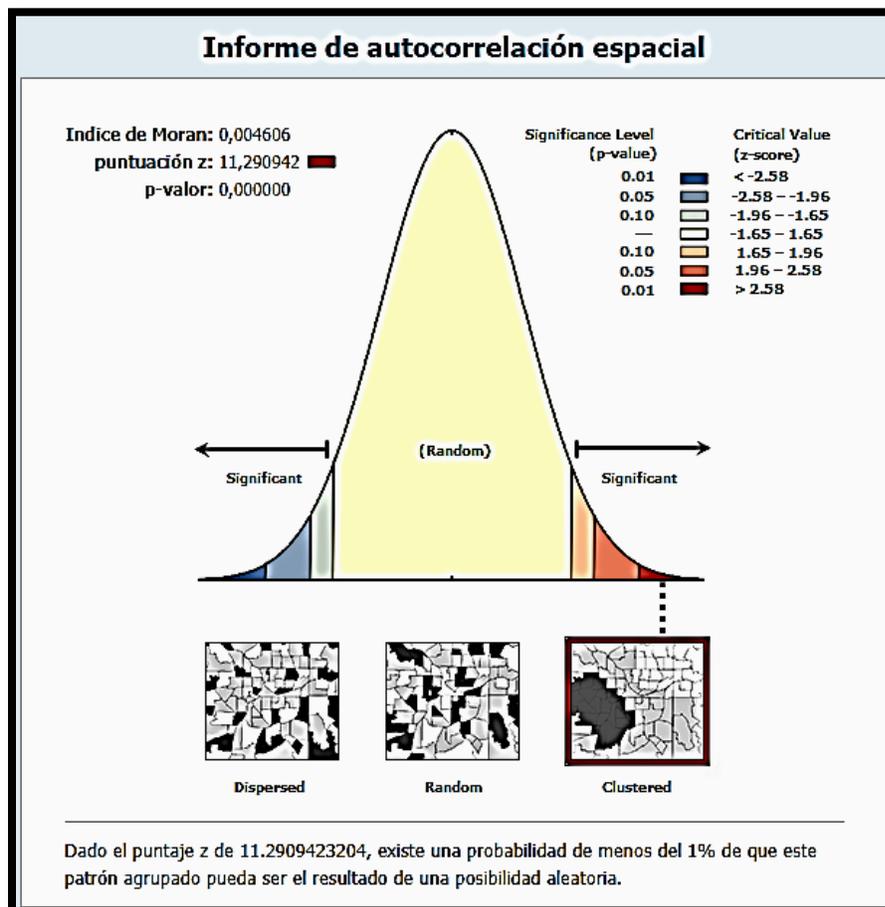


Ilustración 10. Informe de correlación espacial ARD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En Ilustración 10, se puede apreciar que el valor p es igual a 0, el valor de puntuación z está alejado de 0 (11,290942) y el índice de Morán es positivo (0,004606). Por lo tanto, se obtiene suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y concluir que el patrón de distribución de los valores de vertimiento está agregado espacialmente de acuerdo con su volumen.

De otra parte, en la Ilustración 11 se observa una tendencia de agrupamiento de los datos bajo, pero el valor p se encuentra en un rango aleatorio y se puede decir que el agrupamiento mostrado es así mismo aleatorio.

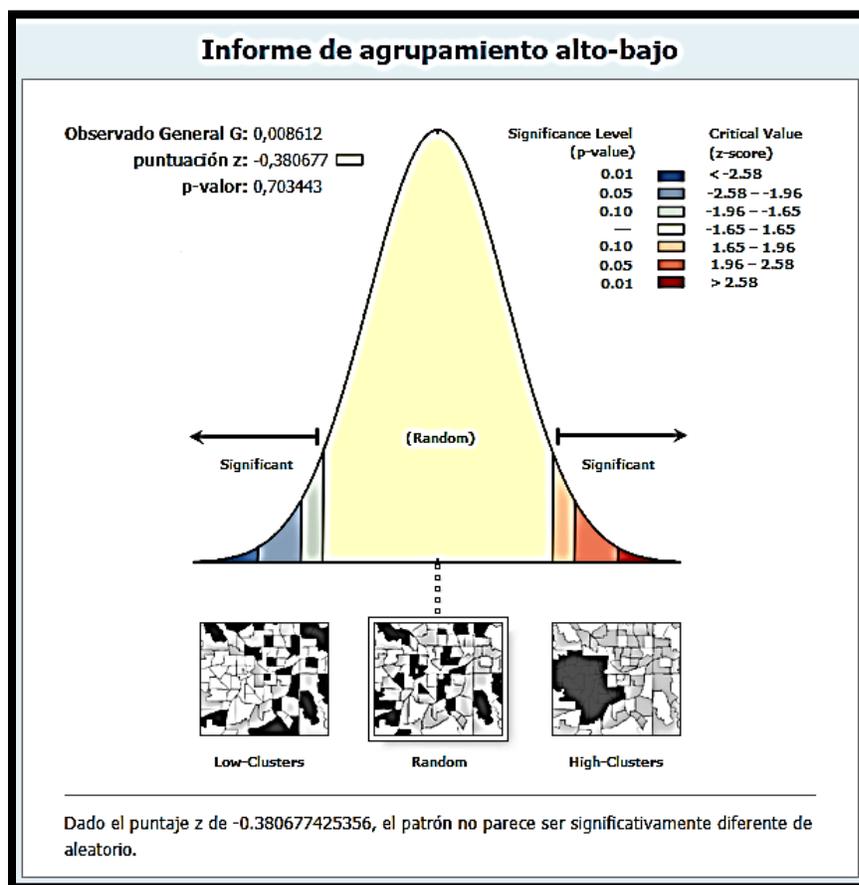


Ilustración 11. Informe de agrupamiento alto bajo ARD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

#### 6.3.4 Agua Residual no Doméstica

Teniendo en cuenta el resumen estadístico presentado para el agua residual no doméstica en el capítulo 7 y la Tabla 2, el 50% de población presenta vertimientos menores a 9,92 m<sup>3</sup>/mes y aportan tan sólo el 5% del ARnD generado en la cuenca (6.582,32 m<sup>3</sup> mensuales). Se puede inferir que la vocación del 50% de los establecimientos generadores de ARnD en el municipio de Sabaneta, generan en muchos casos aguas residuales domésticas teniendo en cuenta sólo el volumen del caudal de descarga, a continuación la Ilustración 12 muestra esta situación.



Ilustración 12. Ubicación espacial de vertimientos ARnD, zona centro de Sabaneta

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta una distribución de frecuencias espaciales elaborada a partir del método de cuartiles para el agua no residual no doméstica. Se observan claramente dos tendencias de asentamiento

espacial, la primera con el 50% de la población representada por los puntos rojos y amarillos, los cuales se concentran en la zona central de la parte baja de la cuenca, sector consolidado como residencial y que es el circundante al parque principal y centro del municipio de Sabaneta, de vocación comercial y/o de servicios.

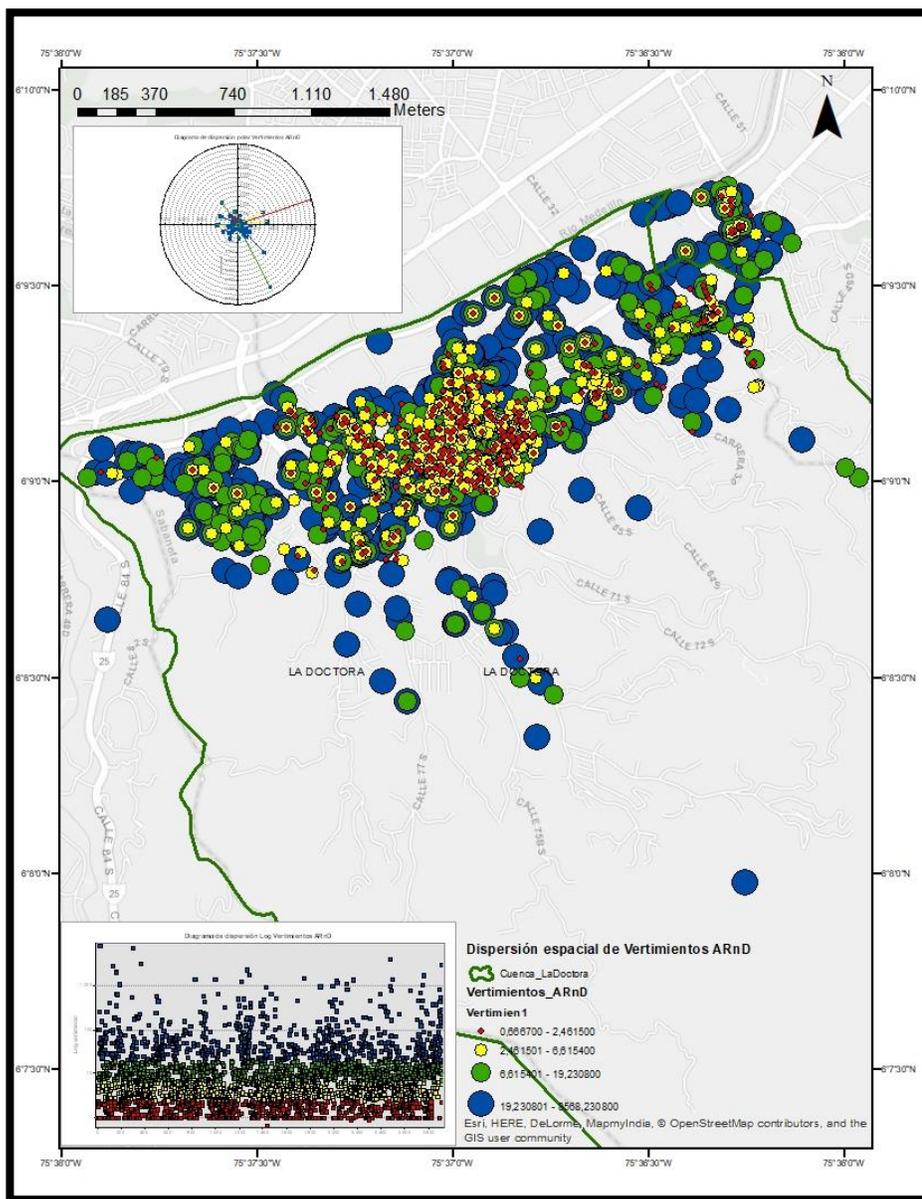


Ilustración 13 .Distribución espacial de frecuencias ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En la gráfica anterior, se identifican como puntos azules y verdes los vertimientos del 50% de la población con caudales más altos, que equivalen a 1.165 descargas, y que generan 128.795,83 m<sup>3</sup>/mes, lo que corresponde con el 95% del volumen de ARnD generado en la cuenca La Doctora.

Se observa también, como esta población significativa, se agrupa en áreas geográficas muy definidas, en la parte media y baja de la cuenca. En la primera por fenómenos de expansión urbana se encuentran ubicadas industrias de la construcción asociadas al desarrollo de vivienda en el sector, además en la zonas nororiental y noroccidental del mapa, en donde se encuentran parques y bodegas especializadas para actividades industriales. Esta tendencia permite establecer la hipótesis en la cual se pueden identificar áreas o distritos diferenciales de agua residual al interior de las cuencas hídricas, a partir de la clasificación de los vertimientos puntuales al alcantarillado público.

Adicionalmente, se observa que el 25% de la población de ARnD con los más altos caudales de vertimiento (puntos azules), es la que presenta las variaciones más importantes, con una muestra equivalente a 728 puntos de vertimiento que explican el 91% del agua residual no doméstica vertida en el municipio de Sabaneta.

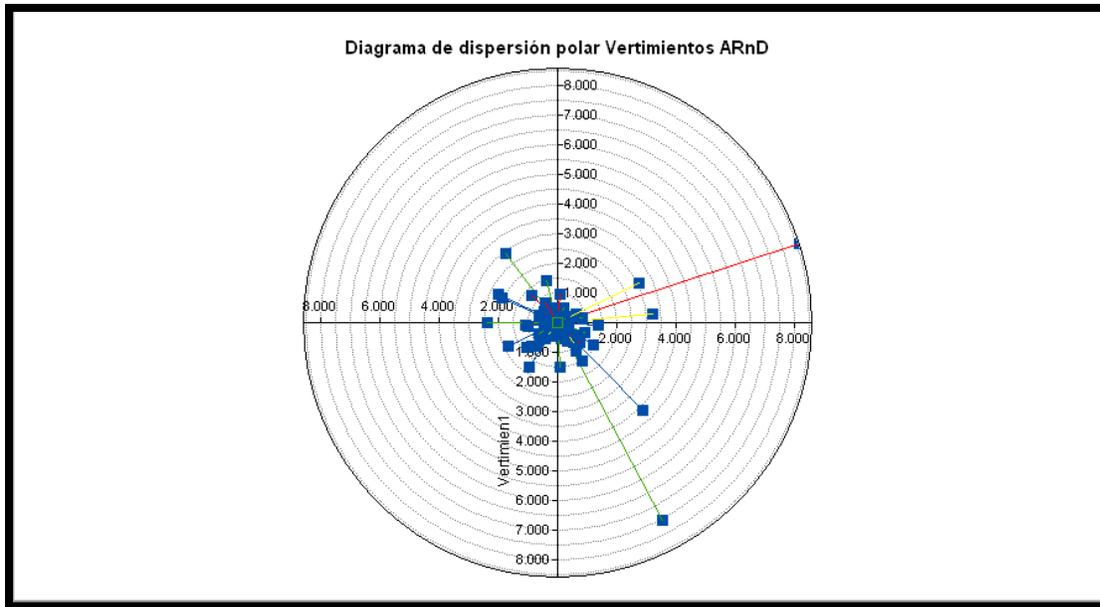


Ilustración 14. Diagrama de dispersión polar ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

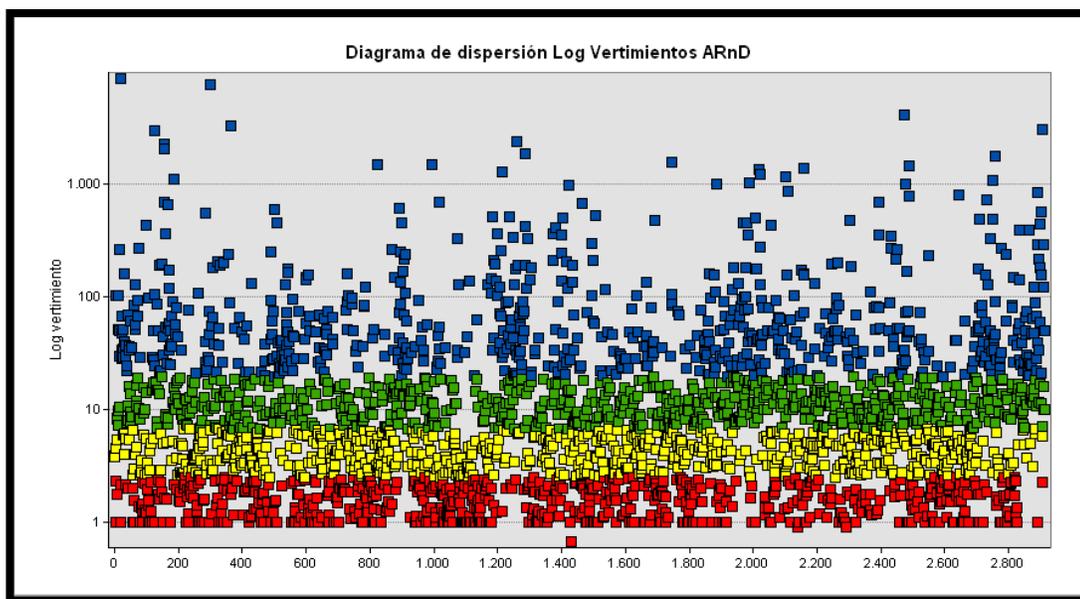


Ilustración 15. Diagrama de dispersión de frecuencias ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

A partir de este resultado se toma el cuartil 75 -tercer cuartil- representado por los puntos azules, como línea base para determinar la presencia de ARnD en una zona determinada de la cuenca, y con los resultados obtenidos, se grafican las zonas de calor o presión para la delimitación de las áreas asociadas al ARnD. Adicionalmente, se recomienda priorizar estos puntos de vertimiento para monitoreo y control en función del caudal, debido al aporte que hacen -91% del total del ARnD-, que es vertida mensualmente a las redes de alcantarillado en la cuenca La Doctora.

Con estos análisis preliminares de distribuciones espaciales, se realizan a continuación, las pruebas estadísticas para determinar el tipo de agregación o dispersión que presentan los datos, y así proceder a validar las hipótesis propuestas en el presente estudio.

Con base en la Ilustración 16, se observan los siguientes resultados: el valor  $p$  es igual a 0, el valor de puntuación  $z$  está alejado de 0 y el índice de Morán es positivo. Por lo tanto, se obtiene suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, y se obtiene que el patrón de distribución de los valores de vertimiento está agregado geográficamente de acuerdo con su volumen.

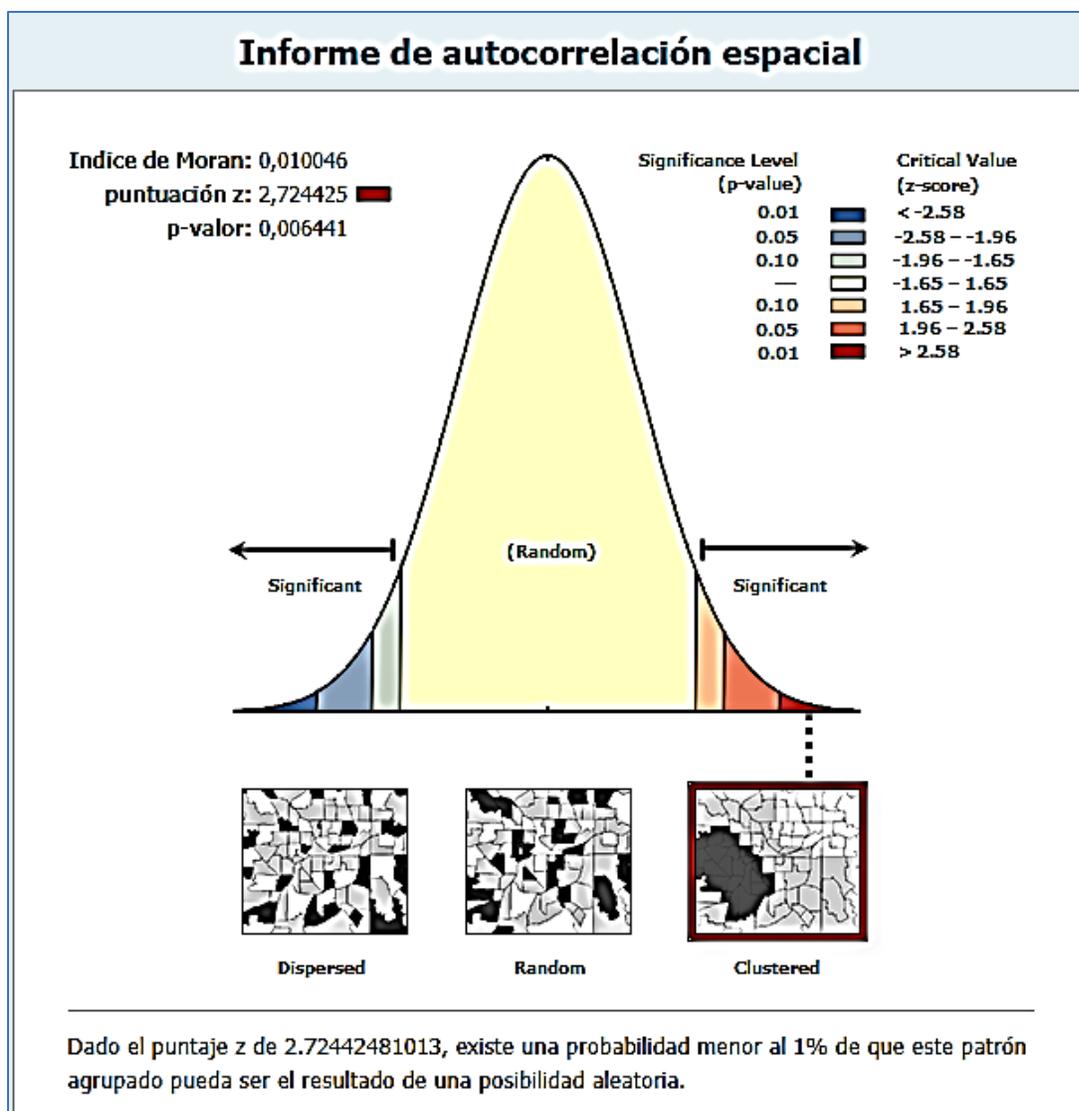


Ilustración 16. Informe de correlación espacial ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede inferir que, el agua residual no doméstica, presenta un comportamiento agregado espacialmente de acuerdo con el caudal promedio mensual entregado a las redes de alcantarillado público.

Esta información permite determinar que se puede realizar una zonificación en la cuenca en función del volumen de vertimiento. Pues se comprueba que los datos tienen un patrón de agrupamiento, que permiten identificar zonas diferenciales en el área de

estudio, donde se presentan agrupamientos significativos en función del caudal entregado a las redes de transporte. Por lo tanto, se establece la hipótesis que supone que en el área de estudio se generan zonas diferenciales de presión de acuerdo con el volumen de vertimiento agrupado.

Al aplicar la metodología, se evidencia una tendencia de agrupamiento de los datos bajo, pero el valor p se encuentra en un rango aleatorio y se puede decir que el agrupamiento mostrado es igualmente aleatorio, como se observa en la Ilustración 17.

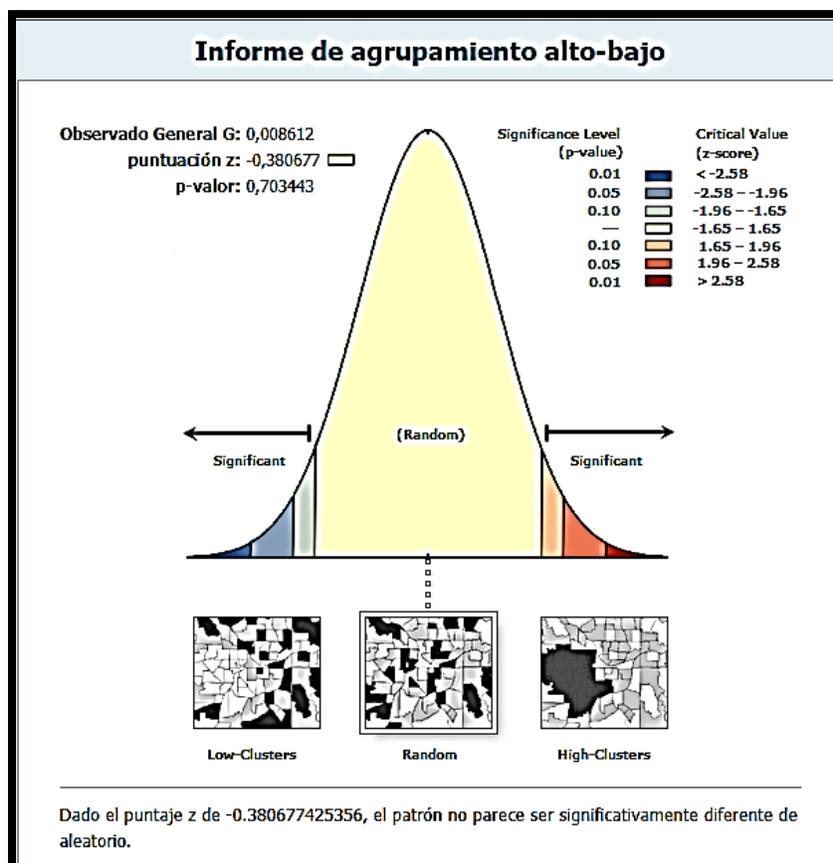


Ilustración 17. Informe de agrupamiento alto bajo ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Luego de los análisis cluster obtenidos a partir del caudal de vertimientos entregados a las redes, se encuentra que tanto el Agua residual doméstica, como la no

doméstica en la cuenca La Doctora, presentan un patrón de agregación espacial y que los datos presentan aleatoriedad en cuanto a su caudal.

Por lo tanto, se comprueba que se encuentran áreas al interior de la cuenca donde se concentran volúmenes altos de vertimientos de agua residual diferencial ARD y ARnD, con los resultados se puede identificar el patrón de agregación espacial de vertimientos, el cual orientará al establecimiento de las áreas diferenciadas al interior de la cuenca denominados Distritos Sanitarios.

#### 6.4 Mapa de Calor – Presión de Vertimientos por Caudal

A continuación, se realiza el procedimiento para la determinación de las áreas de calor o presión en la cuenca derivadas de la agregación aleatoria de los vertimientos, mediante modelo de densidad Kernel.

Los posibles usos incluyen encontrar la densidad de las casas, informes de crímenes o líneas de carreteras o de servicios públicos que influyen en una ciudad o en el hábitat natural. El campo de población se puede utilizar para ponderar algunas entidades más que otras, según su significado, o para permitir que un punto represente varias observaciones. Por ejemplo, una dirección puede representar un condominio con seis unidades, o algunos crímenes se pueden ponderar más que otros al determinar los niveles de crímenes en general. Para las entidades de línea, una autopista dividida probablemente tenga más impacto que una carretera de tierra estrecha y una línea de alta tensión tenga más impacto que un poste eléctrico estándar. (ESRI, 2019).

Este método estadístico de estimación de densidad se utiliza para determinar el patrón de agregación que los vertimientos de agua residual presentan en la cuenca.

Para el agua residual doméstica, de acuerdo con la homogeneidad de los datos presentada en la Ilustración 17, se calculan las áreas de densidad o calor con la totalidad del espectro de los factores registrados.

En cuanto el agua residual no doméstica, se calcula el área de densidad o calor a partir del 25% de la población que presente los vertimientos más altos, debido a que esta muestra de población explica el 91% del ARnD generada en el municipio de Sabaneta.

Como resultado se obtiene la Ilustración 18, donde se transponen los puntos de calor del agua residual en la cuenca la Doctora y se determinan las áreas de influencia donde se ejerce mayor presión de vertimientos por tipo, en la cuenca.

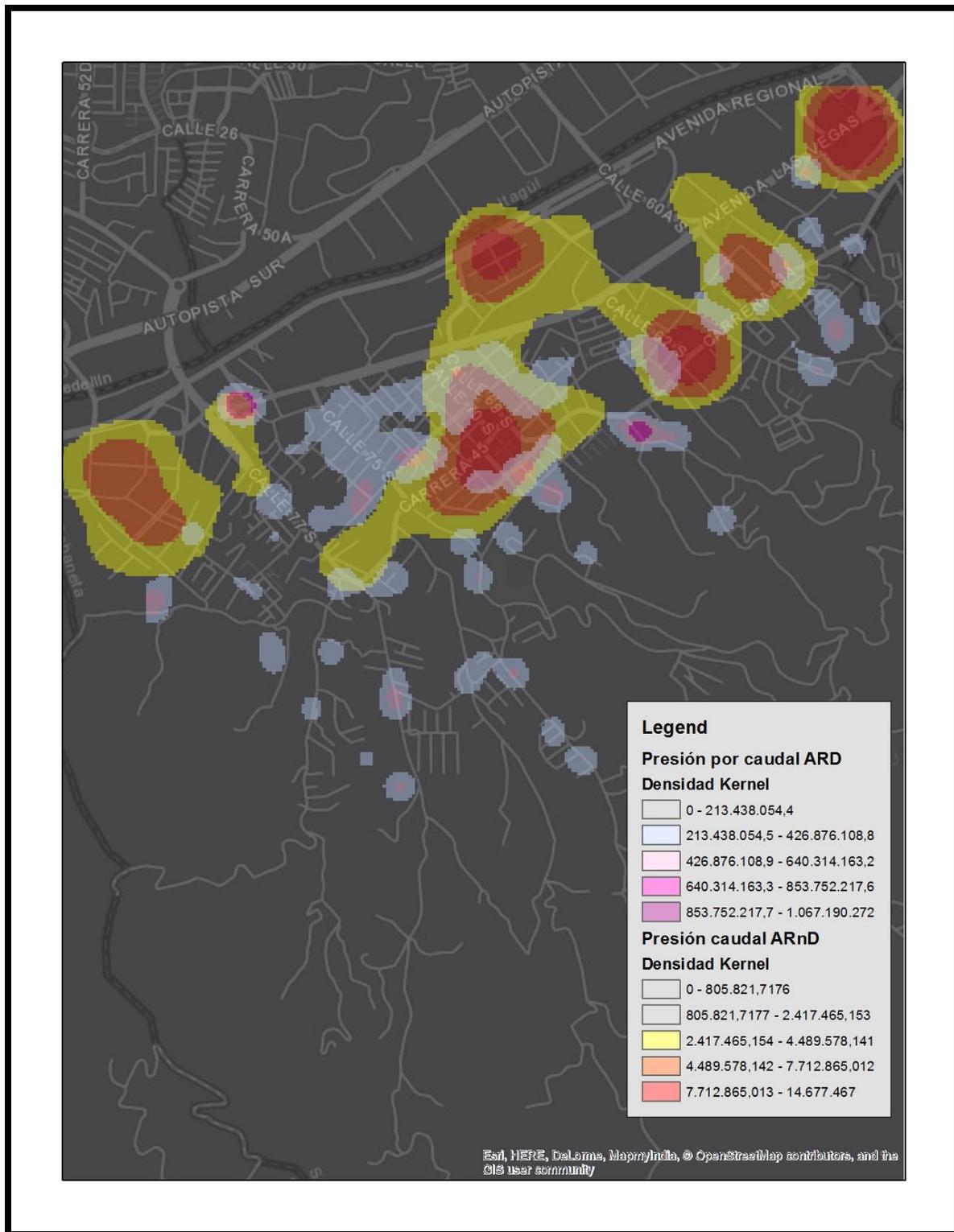


Ilustración 18. Áreas de calor o presión de vertimientos de agua residual por caudal

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En cuanto al ARD -colores magenta y violeta-, se presentan áreas de presión importantes en donde se desarrollan grandes proyectos de vivienda que se están consolidando en Sabaneta, y que están densificando la ocupación del suelo.

Para el ARnD -colores amarillo, naranja y rojo- se observa una concentración muy importante en la parte baja y centro de la cuenca, en donde se encuentran los parques y bodegas especializadas para actividades industriales en el municipio. Adicionalmente, se observa en la parte central del mapa, un fenómeno interesante de concentración alta de vertimientos en el área de desarrollo del sector de la construcción, esta zona tiende a convertirse en residencial a medida que los proyectos de vivienda finalicen, e inicie el proceso de vinculación de los usuarios residenciales que los habitarán.

## 7. CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA ARnD

### 7.1 Auto Declaraciones de Vertimientos

Según Jacome Trujillo (2016), para dar cumplimiento a la normativa vigente en cuanto a vertimientos, las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. como prestador de servicios públicos en el Valle de Aburrá, ha hecho grandes esfuerzos por contribuir al saneamiento del Río Medellín, con la construcción de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, tanto la de San Fernando como la de Aguas Claras en Bello, por lo que se convierte en un punto clave la identificación de los usuarios que generan aguas residuales, tanto domésticas como no domésticas. Igualmente, verificar que los usuarios estén conectados al sistema de alcantarillado para que sus vertimientos no sean arrojados directamente a cuerpos de agua sino que sean recolectados y transportados hacia dichas plantas y le devuelvan la calidad deseada al Río.

El equipo de Investigación y Control EIC perteneciente a la Unidad Operación y Mantenimiento Gestión Aguas Residuales UOMGAR es el encargado de identificar los usuarios generadores de ARD y ARnD y hacer gestión sobre ellos. Este equipo ha desarrollado un proyecto enmarcado en la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK elaborada por el Project Management Institute PMI), cuyo producto fue un Modelo para la investigación, monitoreo y control de las aguas residuales: un esquema de trabajo que permite realizar una gestión de las Aguas residuales domésticas ARD y no domésticas ARnD, mediante herramientas informáticas que respalden e integren la información, para el análisis y planificación de la operación y mantenimiento del alcantarillado, con el fin de buscar una eficiencia operativa que

satisfaga al cliente, enmarcados en el cumplimiento normativo y en la protección de la infraestructura de alcantarillado público.

#### 7.1.1 Base de Datos de Auto Declaraciones ARnD

Como resultado se obtiene la base de datos de los vertimientos industriales, y que está clasificada según la resolución 0631 de 2015, donde se definen las actividades productivas de las industrias de acuerdo con un artículo específico, estas industrias se tomarán como los factores a evaluar y se clasifican según los siguientes sectores productivos:

Tabla 3. Clasificación del sector productivo cuenca La Doctora

Artículo	Sector Productivo
9	Agroindustria y ganadería
11	Hidrocarburos
12	Alimentos y bebidas
13	Fabricación y manufactura de bienes
14	Servicios y otras actividades
15	Actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes

Fuente: Resolución 0631 de 2015

En total se procesan 47 usuarios tipo industrial dentro de la cuenca la Doctora, de los cuales se tienen registros de las auto declaraciones presentadas en cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. Teniendo en cuenta los resultados del capítulo 3 de este estudio, donde se asegura que 728 usuarios del servicio de alcantarillado explican el 91% de los vertimientos, se puede decir que estos 47 usuarios son una muestra que representa el 6% de la población con potencial para ser objeto de control en cuanto a caudal vertido a la red se refiere.

Se presenta una cantidad importante de industrias con gran aporte de caudal, y concentraciones contaminantes vertidas a las redes de alcantarillado en el sector comprendido por actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes, con un total de 551.179 m<sup>3</sup>/mes declarados, el 54% del total de aporte del caudal registrado por auto declaraciones en la cuenca.

El segundo sector donde se observa gran aporte de caudal contaminantes al alcantarillado en la cuenca La Doctora es el 12 con un 29% del total del registro, 8.677 m<sup>3</sup>/mes, actividad productiva correspondiente a elaboración de productos, Ilustración 19.

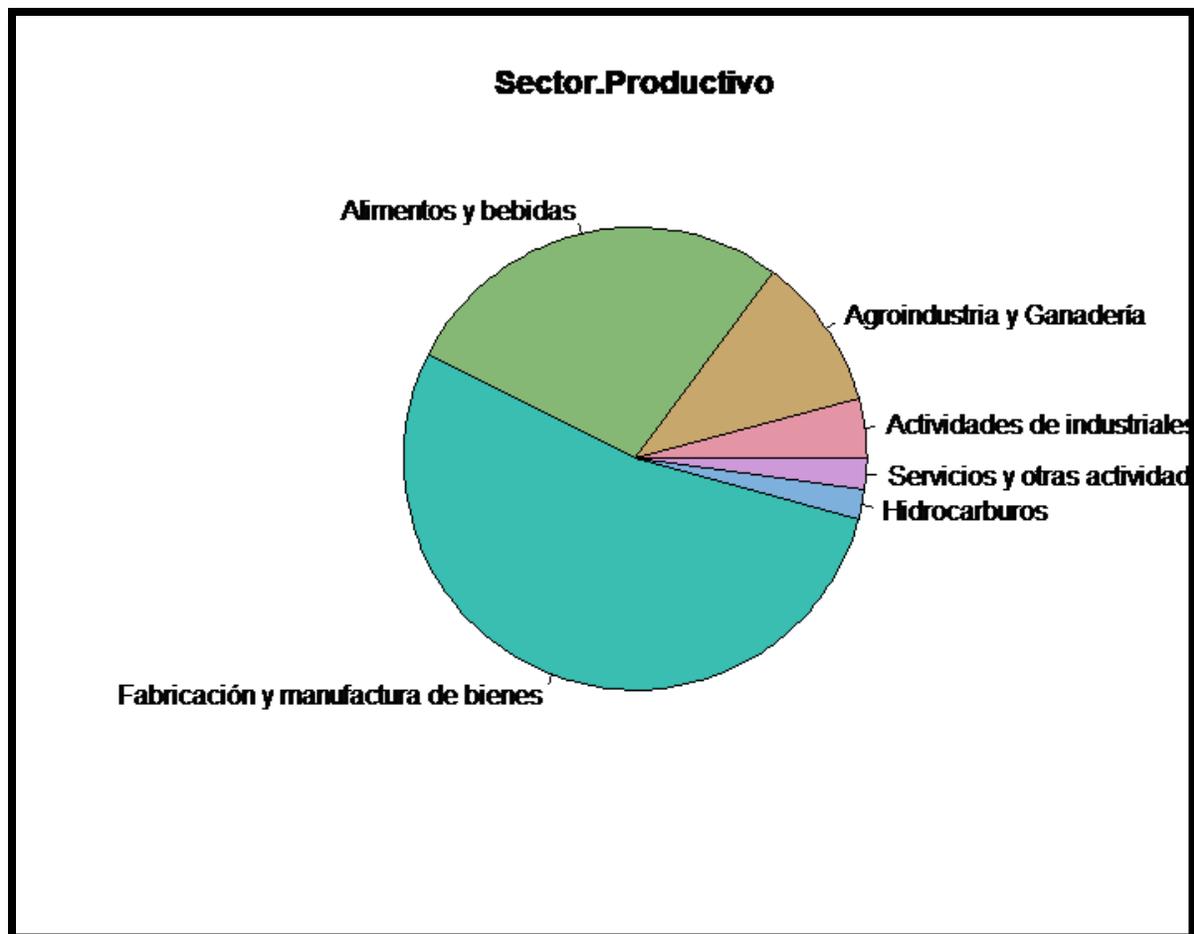


Ilustración 19. Distribución de sectores productivos de los usuarios industriales

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

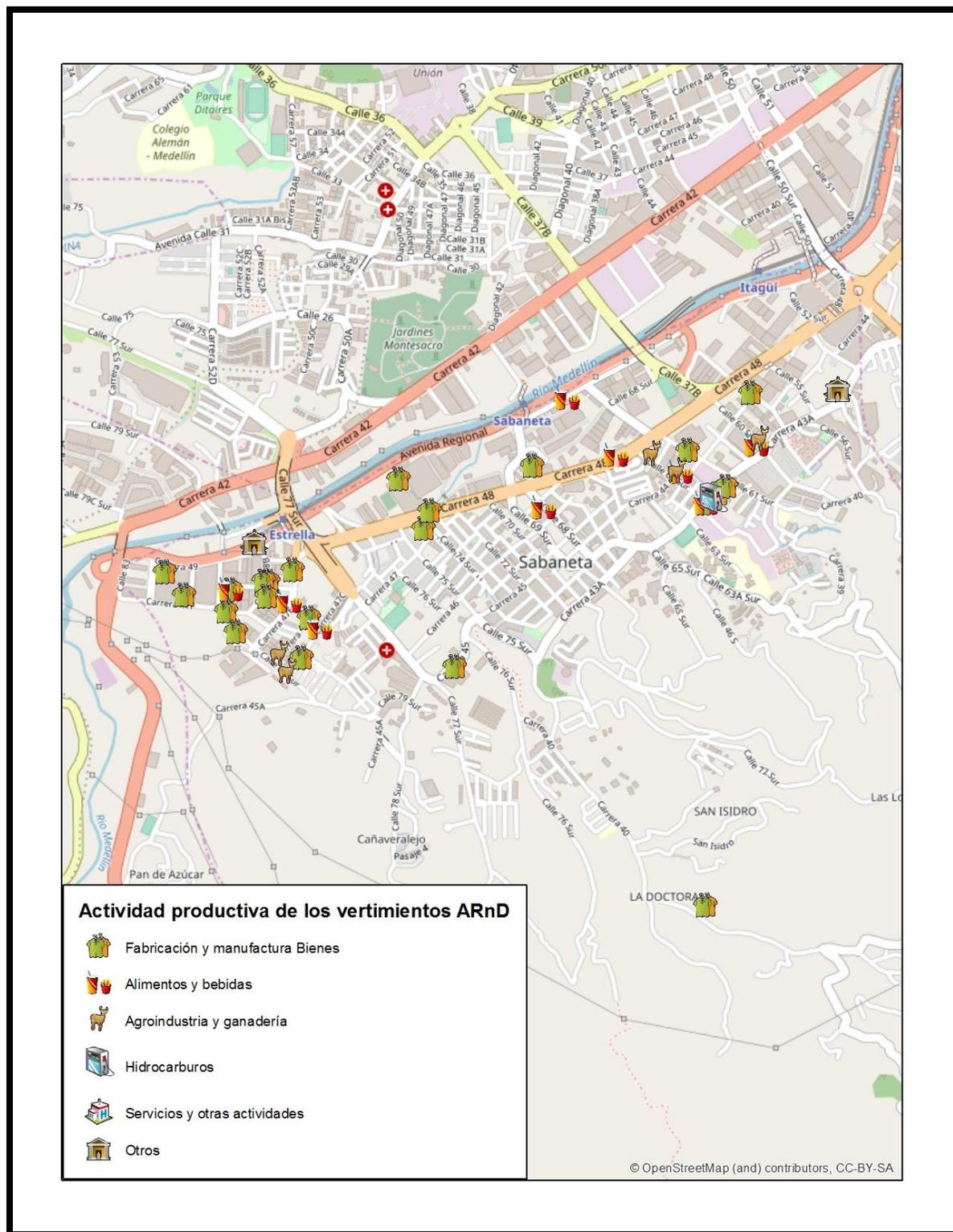


Ilustración 20. Distribución espacial por actividad productiva

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

De acuerdo con el análisis anterior, puede inferirse que debido al resultado de las auto declaraciones registradas en la cuenca La Doctora, para los vertimientos de agua residual no doméstica, se indica una vocación industrial en los sectores productivos dedicados a la fabricación y manufactura de bienes y elaboración de productos alimenticios y bebidas, con el 83% de aporte de vertimientos de ARnD, presentados en auto declaraciones de usuarios tipo industrial.

Teniendo en cuenta el estudio presentado en el capítulo 2 por registros de vertimientos según el sistema de facturación EPM en el cual para el ARnD se cuenta con 135.378,15 m<sup>3</sup>/mes, se obtiene que tan sólo para estos dos sectores el volumen de vertimientos declarados está en un 414% por encima de los valores totales registrados en la cuenca para ARnD en micro medición.

### 7.1.2 Reducción de Variables

Se realizó un análisis y depuración de la base de datos con el fin de eliminar las variables que no aportan al objeto de la investigación. En total resulta una matriz con 19 observaciones y 12 variables, la cual se analizó con el software estadístico R Studio y su evaluación se muestra a continuación.

## 7.2 Análisis Exploratorio Inicial

### 7.2.1 Matriz de Correlaciones

Se agruparon los datos de acuerdo a cuatro aspectos o dimensiones, según la característica de interés sanitario presente en el vertimiento, las cuales se describen a continuación en la Matriz de Correlación por Concentración de ARnD

Con esta matriz se agrupan, tal como se muestra en la gráfica XX, los parámetros contaminantes, de acuerdo con su concentración en función del tipo de actividad productiva (Colombia. Presidencia de la República, 2015)

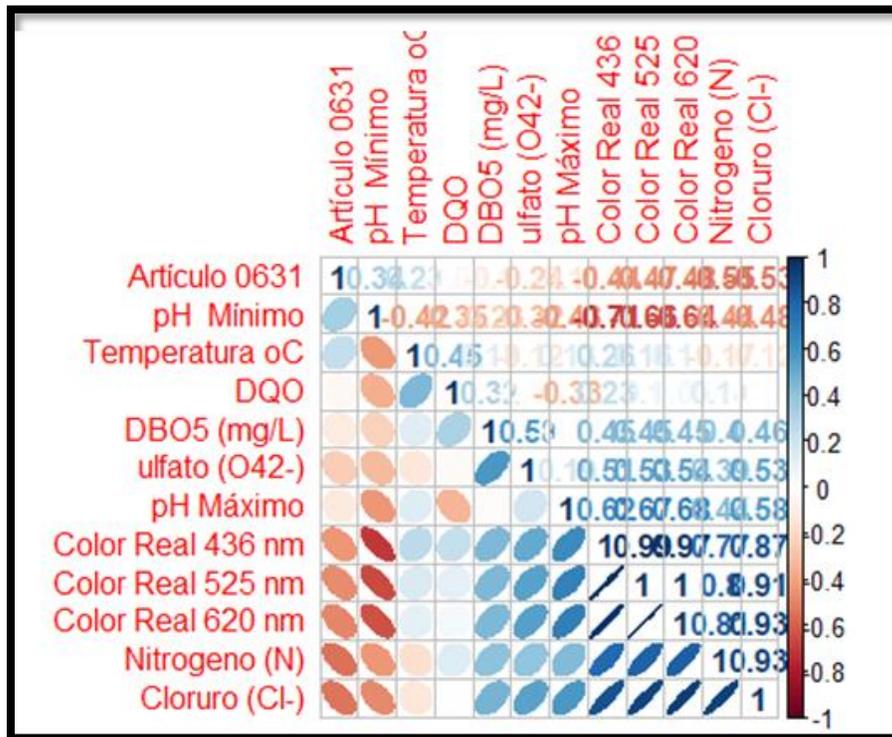


Ilustración 21. Matriz de correlación por concentración

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que el tipo de actividad productiva no presenta correlaciones directas con ningún contaminante de las auto declaraciones obtenidas, la más alta que alcanza es el pH con apenas 0,32.

Adicionalmente se observa una correlación muy alta entre los parámetros de cloruros y nitrógeno con el color y pH máximo e inversamente proporcional con el pH mínimo.

Este comportamiento de los vertimientos de acuerdo con los parámetros correlacionados, obedecen a la gran presencia en la cuenca de industrias dedicadas a procesos de tinte, estampación, teñida y lavado de textiles, las cuales tienen vertimientos con valores de pH superiores a las nueve unidades además del proceso de lavado de la prenda textil que incorporan iones y detergentes a las aguas residuales.

Este resultado es relevante para este estudio, puesto que el color al ser un contaminante de alto impacto en las fuentes hídricas debe ser monitoreado constantemente en la red para evitar afectaciones ambientales, labor que se dificulta debido a que es una variable que no se cuantifica en tiempo real y para su valoración, es necesario el envío de muestra al laboratorio, para su posterior análisis de laboratorio.

Debido a la alta correlación encontrada entre los cloruros y el color para la cuenca La Doctora, podría implementarse un sistema de localización de sondas con electrodos de cloruros en algunos puntos estratégicos de la red de alcantarillado y monitorear indirectamente el aumento de los niveles de color, tema en particular que requeriría un estudio más especializado.

#### 7.2.2 Matriz de Correlación por Caudal

Con esta matriz se agrupan el volumen de vertimiento mensual declarado por las industrias, en función del tipo de actividad productiva (Artículo 0631)

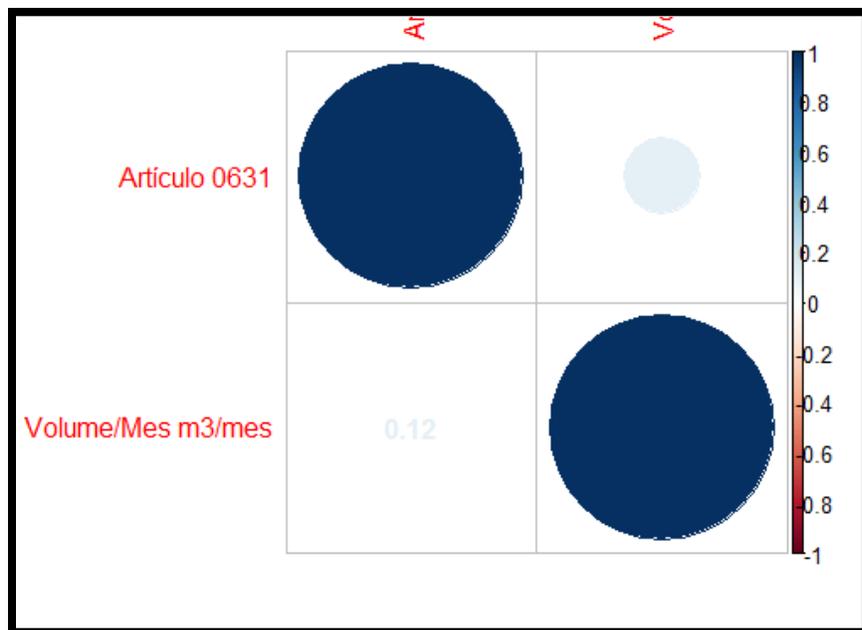


Ilustración 22. Matriz de correlación por caudal

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

Como se puede observar en la gráfica XX, no se encuentra ninguna correlación directa 0,12 entre el tipo de industria presente en la cuenca, y su caudal vertido.

### 7.2.3 Matriz de Correlación por Carga Contaminante

A continuación, se exploran los niveles contaminantes de los vertimientos en términos de carga contaminante, expresadas en tonelada/mes producida y que integra los resultados de caudal y concentración en sus auto declaraciones.

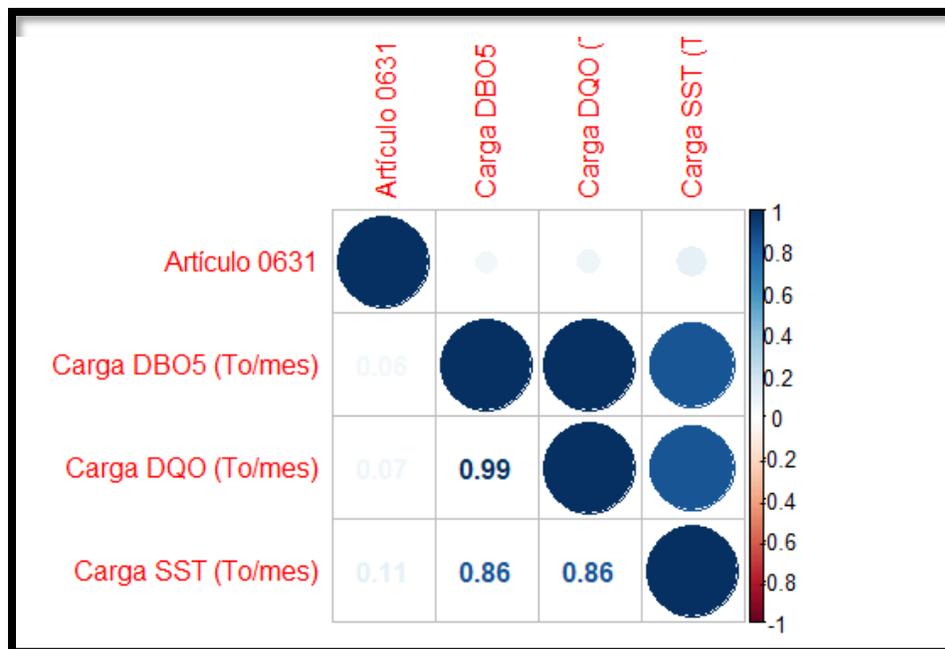


Ilustración 23. Matriz de correlación de carga contaminante

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

Se observa en concordancia con los resultados anteriores como no hay correlación directa entre el tipo de industria -Resolución 0631 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)- y los niveles de carga contaminantes presentes en los vertimientos expresados en términos de DQO, DBO5 y SST.

De lo anterior, se infiere que en la cuenca La Doctora, los niveles contaminantes expresados en términos de carga Ton/mes, no se pueden determinar de acuerdo con clasificación dada por la Resolución 0631 de 2015.

#### 7.2.4 Prueba de Normalidad de los Datos

Este supuesto se requiere para la aplicación de los métodos multivariados, en este caso el test de normalidad Shapiro-Wilk:

El uso de pruebas no paramétricas resulta recomendable cuando los datos a analizar no cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Sin embargo, la suposición de la normalidad de los datos o el empleo de pruebas de bondad de ajuste que no son adecuadas para el tamaño muestral empleado son aspectos habituales. Este hecho implica, en muchas ocasiones, el uso de pruebas estadísticas no ajustadas al tipo de distribución real y, consecuentemente, el establecimiento de conclusiones erróneas... la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) es una de las más consolidadas y con mayor potencia estadística entre las existentes actualmente (Arcones & Wang, 2006). Su fundamento estadístico está basado en una gráfica de probabilidad en la que se considera la regresión de las observaciones sobre los valores esperados de la distribución hipotetizada, en donde su estadístico  $W$  representa el cociente de dos estimaciones de la varianza de una distribución normal.

Esta prueba ha demostrado de manera general, resultados adecuados en comparación a las pruebas clásicas (Arcones & Wang, 2006), pero especialmente cuando se trabaja con distribuciones de colas cortas (Thadewald & Buning, 2007) y con un tamaño muestral inferior a 30, ya que muestra una alta variabilidad cuando se modifican tanto la simetría como el tamaño muestral de la distribución, especialmente entre 20 y 50 participantes (Yazici & Yolacan, 2007). (Pedrosa Correo, Juarros-Basterretxea Correo, & Robles-Fernández Correo, 2015, pág. 18)

La aplicación de este test se realiza con el fin de comprobar si se pueden aplicar métodos estadísticos paramétricos al estudio realizado.

Luego de revisar la correlación de los datos de vertimientos, se procede a realizar la prueba de normalidad multivariada según el test de Shapiro-Wilk normality test data: Z obteniendo  $W = 0.26224$ ,  $p\text{-value} = 1.226e-08$ .

Según los datos calculados el valor p está por debajo de 0,05 y se concluye que estos no presentan normalidad, por lo tanto, no se pueden realizar métodos estadísticos paramétricos y se deben comparar pareados los datos, para tal efecto a continuación se realizarán análisis de comparación espaciales mediante densidad Kernel, logrando determinar las áreas de presión por contaminantes en la cuenca La Doctora.

### 7.3 Análisis de Distribución Geoespacial de las Auto Declaraciones de ARnD

A continuación, se realiza el procedimiento para la determinación de las áreas de calor o presión en la cuenca, derivadas de las auto declaraciones de los usuarios industriales.

Este método estadístico de estimación de densidad se utiliza para determinar el patrón de agregación que los vertimientos de agua residual no doméstica presentan en la cuenca. Para efectos del análisis se determinan tres tipos de agregación espacial (Caudales, Cargas contaminantes y Daño potencial a la red).

#### 7.3.1 Agregación Espacial de Auto Declaraciones por Caudal

En esta agregación espacial, ver Ilustración 24 y Ilustración 25, se tiene en cuenta el volumen mensual del vertimiento declarado por la industria y se realiza mediante el método de cuartiles.

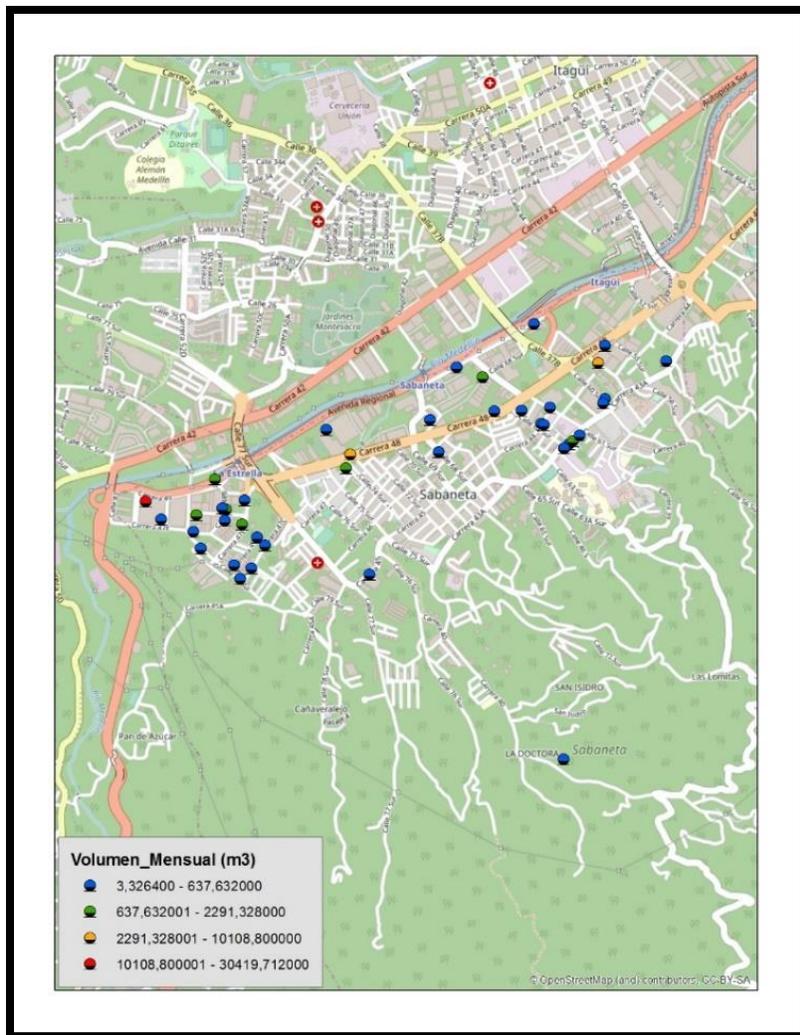


Ilustración 24. Auto declaraciones de acuerdo al volumen de ARnD

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

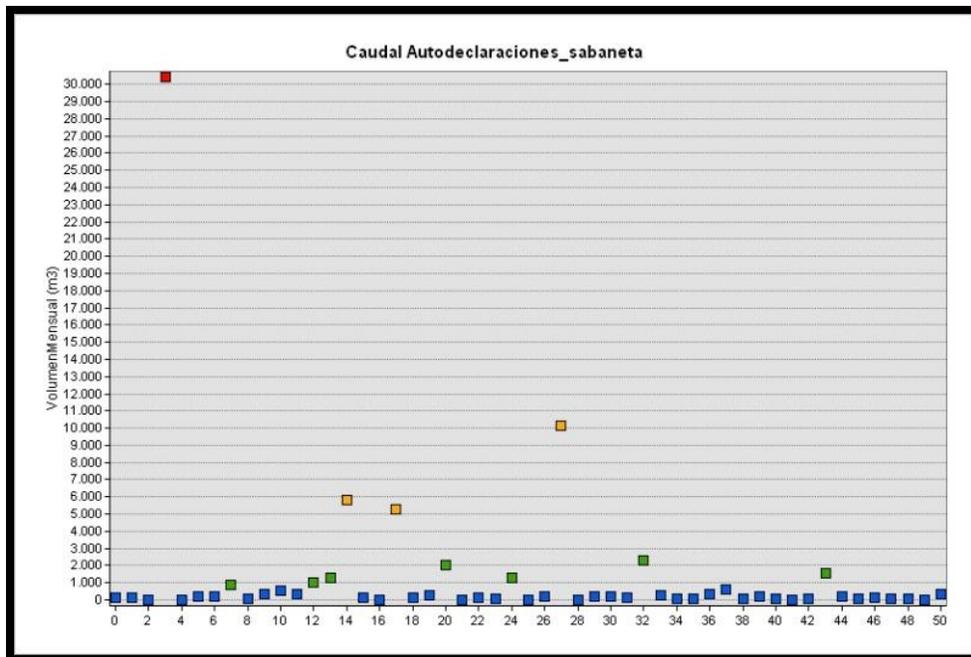


Ilustración 25. Distribución de frecuencias caudal por auto declaración

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

El resumen estadístico que resulta de la aplicación del método, arroja los siguientes resultados:

Tabla 4. Resumen de auto declaraciones

Número de auto declaraciones	51
Caudal mínimo	3,3264 (m <sup>3</sup> /mes)
Caudal máximo	30.419,712 (m <sup>3</sup> /mes)
Suma	68.228,112614 (m <sup>3</sup> /mes)
Media	1.337,80613 (m <sup>3</sup> /mes)
Desviación estándar	4.464,653407 (m <sup>3</sup> /mes)

Fuente: elaboración propia

Adicionalmente se obtiene que tan sólo cuatro auto declaraciones explican el 75% de los vertimientos de ARnD en la cuenca La Doctora, en otras palabras, el 7% de la población de industrias con auto declaraciones vierten 51.620,544 m<sup>3</sup>/mes, del caudal total registrado por micro medición y corresponde a 135.378,15.

### 7.3.2 Agregación Espacial de Auto Declaraciones por Carga Contaminante

Para este análisis se agrupan las cargas contaminantes de los vertimientos declarados por los usuarios, estas cargas se determinan de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos obtenidos en los estudios de caracterización, que incluyen:

- Sólidos suspendidos totales SST
- Demanda Química de Oxígeno DQO
- Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5

La cantidad de carga contaminante expresada en toneladas/mes vertidas al alcantarillado, ayuda a establecer un panorama muy acertado sobre la presión ejercida por el agrupamiento espacial de los vertimientos en cuanto carga contaminante se refiere y que repercute directamente en la operación de la planta de aguas residuales San Fernando, encargada de la depuración de las aguas residuales generadas en la cuenca La Doctora. Ahora, debido al rango tan amplio de carga contaminante encontrado en la muestra, se procedió a normalizar los datos por medio de Logaritmo natural y lograr así, una interpretación mayor de los resultados.

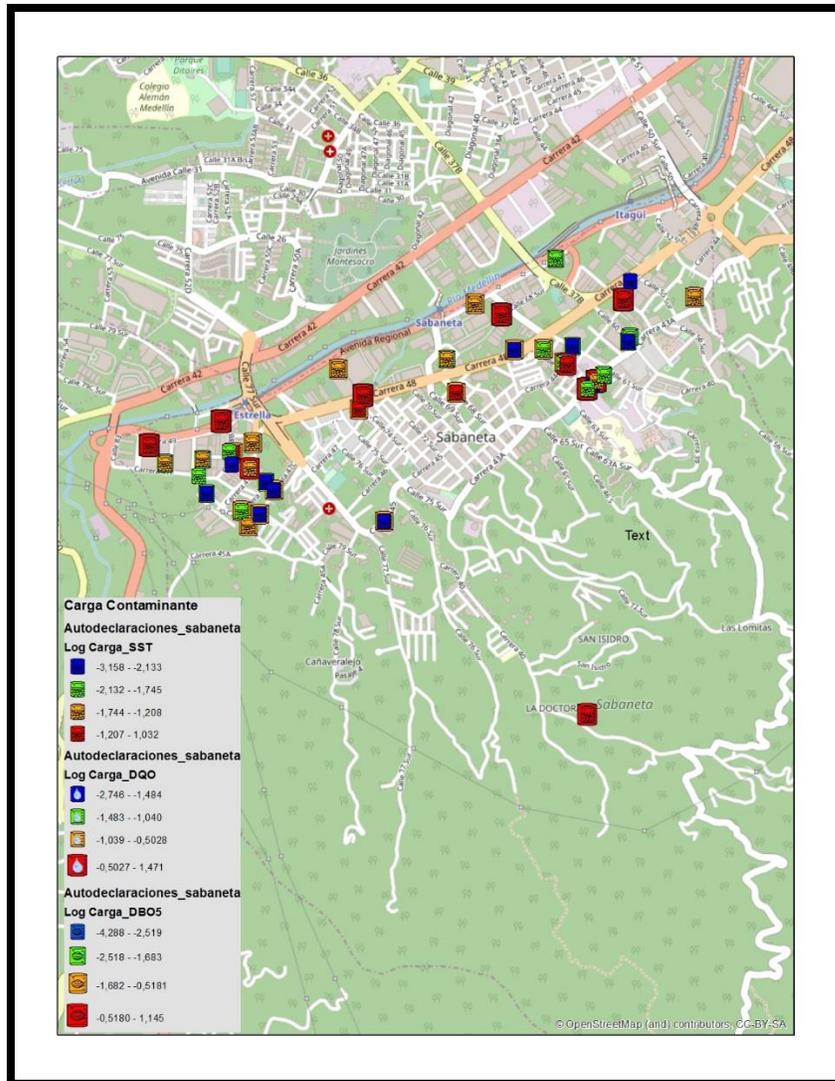


Ilustración 26. Auto declaraciones por carga mensual

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Como se ha indicado anteriormente, se presenta a continuación la Ilustración 27 y en la Ilustración 28, en las que se ilustran las distribuciones de frecuencia por carga mensual, para las variables de estudio DQO,  $DBO_5$  y SST, respectivamente. Igualmente, se muestran los resultados estadísticos obtenidos de dicho ejercicio.

Tabla 5. Variable DQO

Número de auto declaraciones	51
Carga mínima:	0,001793 (Ton/mes)
Carga máxima:	29,570511 (Ton/mes)
Suma	83,249447 (Ton/mes)
Media:	1,632342 (Ton/mes)
Desviación estándar:	5,643229

Fuente: elaboración propia

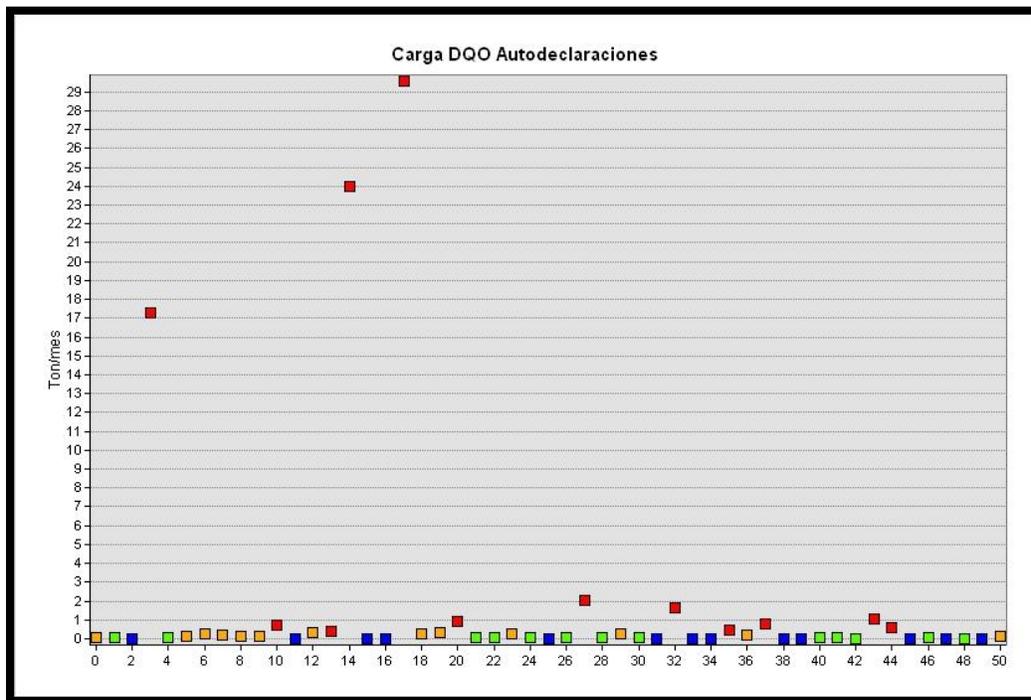


Ilustración 27. Distribución de frecuencias por carga DQO

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Tabla 6. Variable BO5

Número de auto declaraciones	51
Carga mínima	0,000052 (Ton/mes)
Carga máxima	13,949349 (Ton/mes)
Suma	26,736614 (Ton/mes)
Media:	0,524247 (Ton/mes)
Desviación estándar:	2,11437

Fuente: elaboración propia

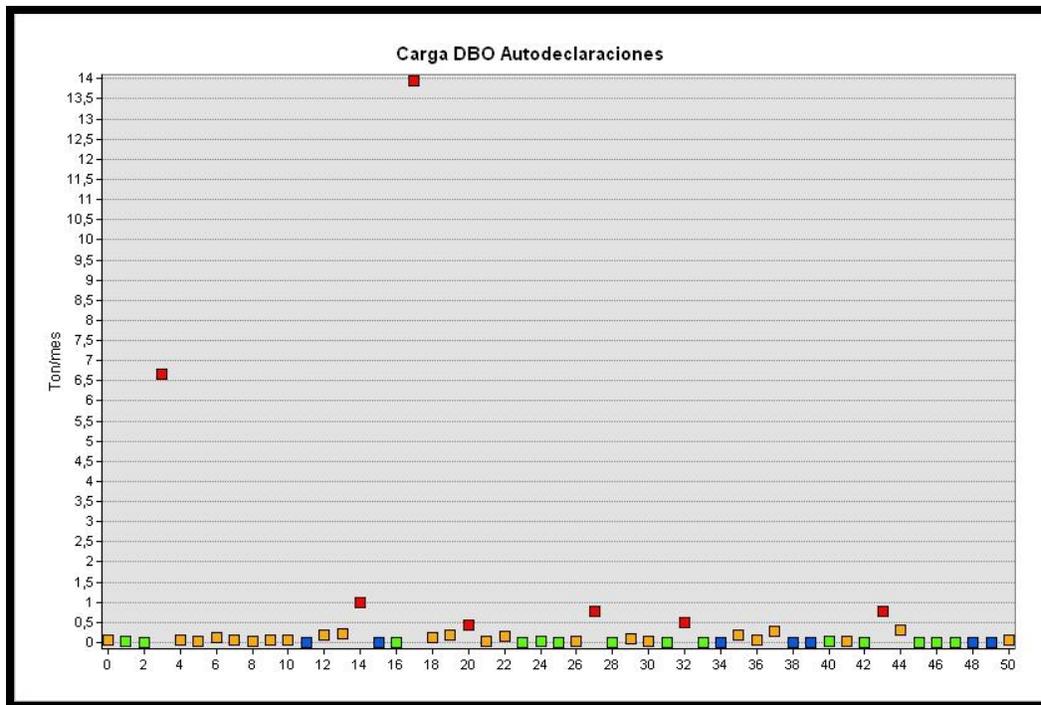


Ilustración 28. Distribución de frecuencias por carga de DBO5

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Tabla 7. Variable SST

Número de auto declaraciones	51
Carga mínima	0,000695 (Ton/mes)
Carga máxima	10,758666 (Ton/mes)
Suma	28,526698 (Ton/mes)
Media:	0,559347 (Ton/mes)
Desviación estándar:	1,785782

Fuente: elaboración propia

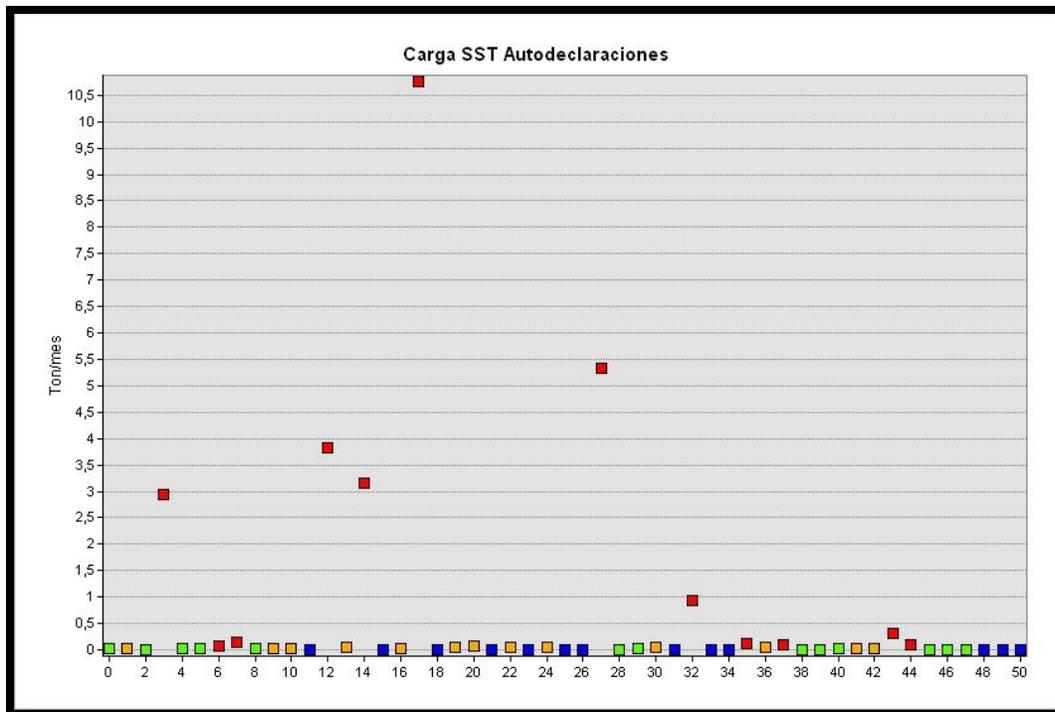


Ilustración 29. Distribución de frecuencias por carga mensual de SST

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Se observa una tendencia similar a la presentada en el análisis de los caudales, en la cual con tan sólo el 25% de la muestra se está demostrando la mayoría de la carga contaminante de la cuenca (puntos rojos) en las variables DBO, DQO y SST; mientras que el 75% de la población muestreada vierte cargas contaminantes considerablemente bajas, en relación con las industrias que tienen alto consumo de agua en sus procesos productivos.

Con estos resultados y con lo encontrado en los capítulos 6 y 7 de este estudio, la carga contaminante está definida de acuerdo con el caudal o el tamaño de la industria y no con el tipo de actividad productiva descrita en el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015).

### 7.3.3 Agregación Espacial por daño Potencial a la Red

Para esta agregación se agruparon las variables fisicoquímicas pH y grasas y aceites, las cuales pueden potencialmente generar obstrucciones y daños estructurales a la red cuando se vierten en niveles dañinos o de deterioro al ambiente. Ver Ilustración 30.

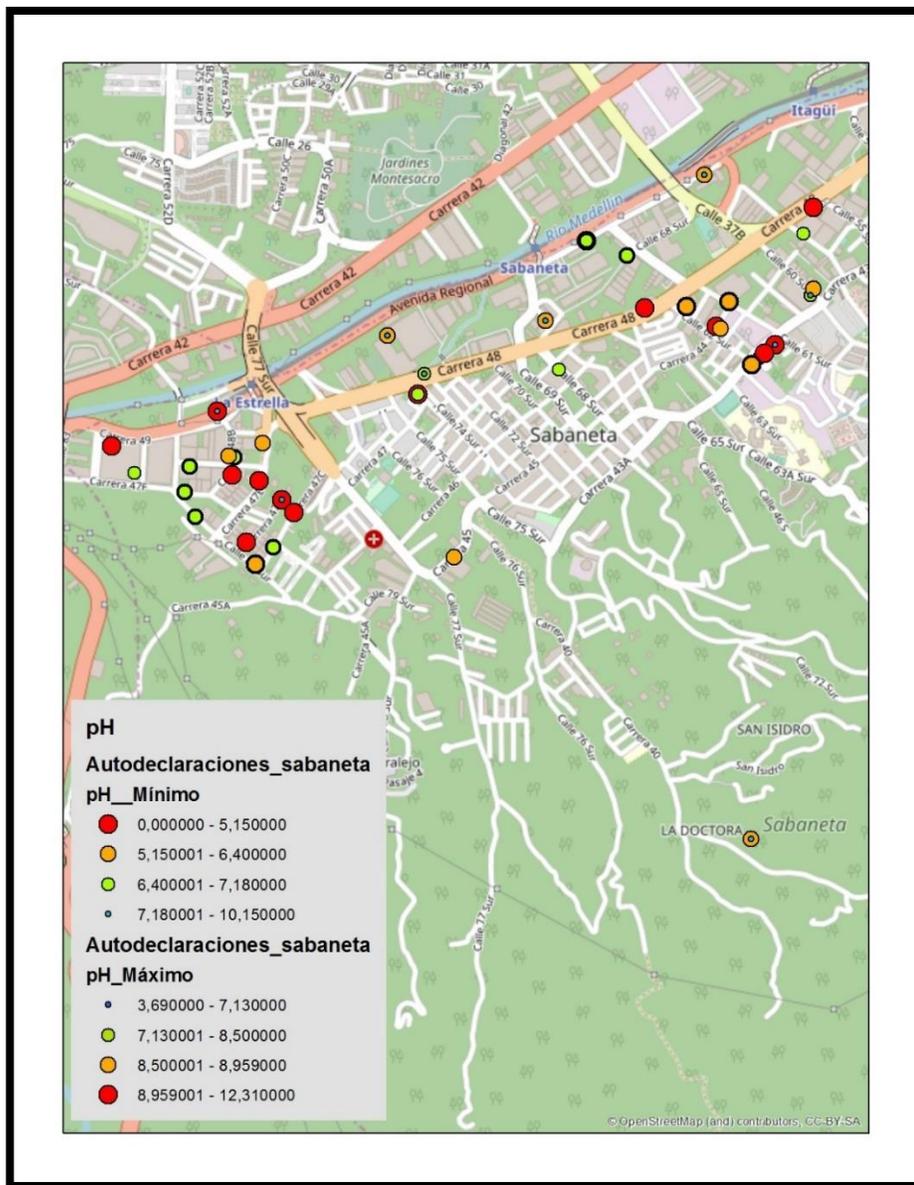


Ilustración 30. Auto declaraciones de acuerdo con el pH

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En Ilustración 31 e Ilustración 32, se presentan las distribuciones de frecuencia, correspondientes a la variable pH (valores máximos y mínimos respectivamente) que incluyen los máximos auto declarantes de la cuenta en estudio.

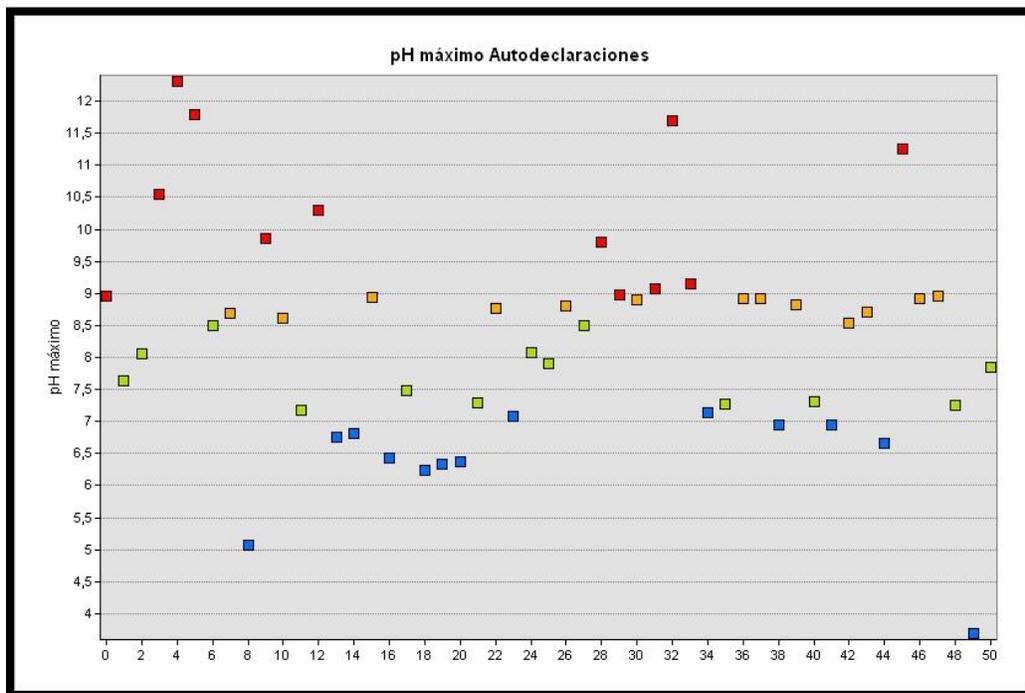


Ilustración 31 Distribución de frecuencias del pH máximo

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

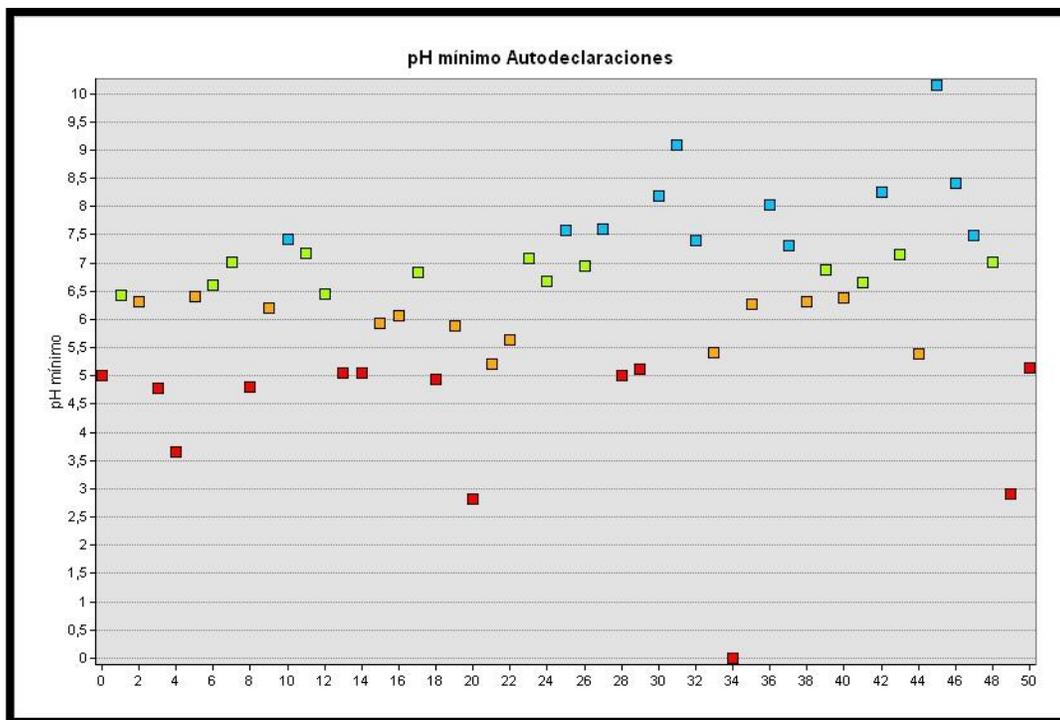


Ilustración 32. Distribución de frecuencias pH mínimo

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Ilustración 32, puede observarse que se presentan fluctuaciones de pH en zonas muy definidas, predominando pH con niveles altos en el cuartil 75 de la población muestreada lo cual corresponde a 10 industrias que presentan pH mayores a 9 unidades.

En cuanto al pH mínimo, el riesgo por daño potencial en la red se puede configurar con tan sólo cuatro vertimientos que declaran pH mínimo por debajo de 4 y que corresponden al cuartil 75 de las auto declaraciones de ARnD.

De otro lado, en relación con la variable Grasas y Aceites, se muestra en la Ilustración 33, las industrias que son auto declaradoras en la zona de estudio. Igualmente, en la Ilustración 34, se muestra la distribución de frecuencia de la variable.

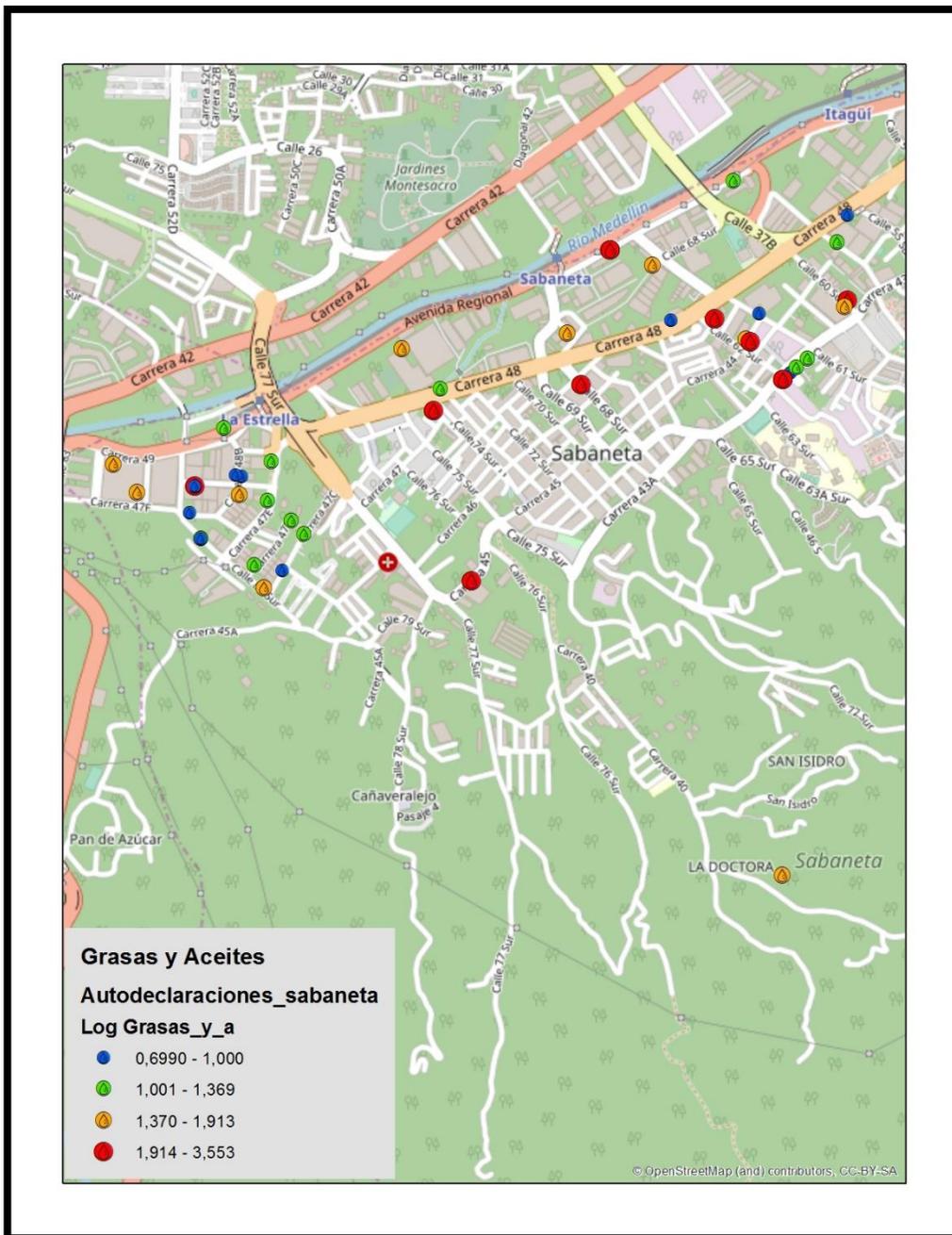


Ilustración 33. Auto declaraciones por concentración de grasas y aceites

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

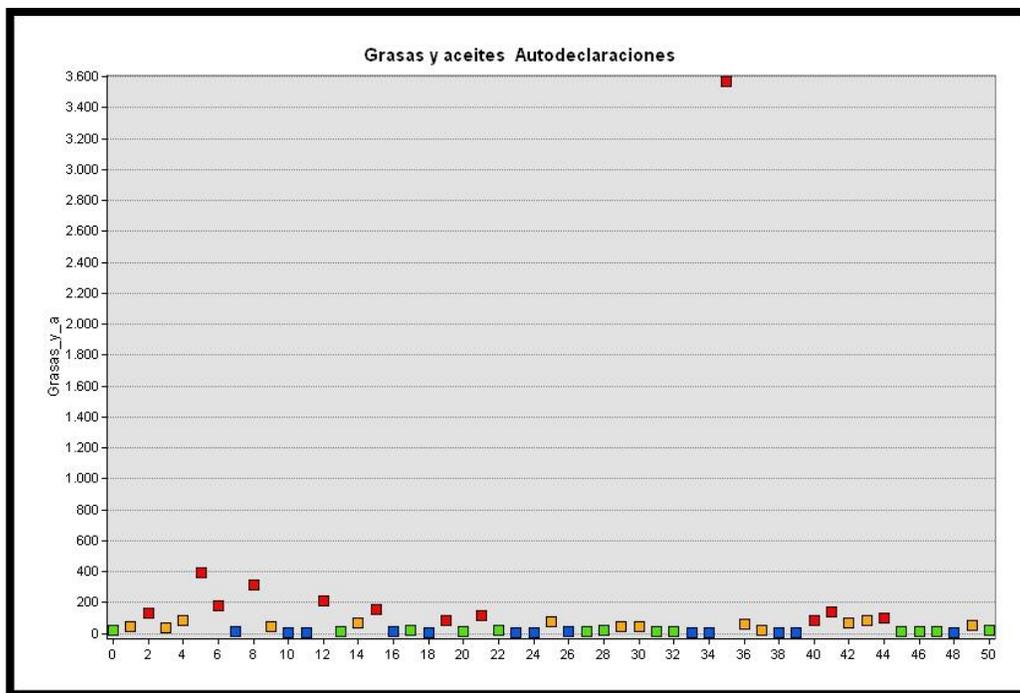


Ilustración 34. Distribución de frecuencias para grasas y aceites

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

La distribución espacial y de frecuencias para las auto declaraciones, presenta tres elementos interesantes a tener en cuenta, como primer aspecto la ubicación geográfica de puntos de vertimiento altos en grasas y aceites en una zona específica de la cuenca, como segundo elemento se evidencia la presencia de un punto de vertimiento con una alta concentración en comparación a la media de la muestra; y como tercer aspecto, se resalta la homogeneidad en el comportamiento de la totalidad de las auto declaraciones, mostrando nuevamente los incrementos más importantes en el tercer cuartil representado por los puntos rojos en las ilustraciones.

#### 7.3.4 Agregación Espacial por Color

Uno de los parámetros más impactantes al medio ambiente son los vertimientos de color, la ubicación espacial de los vertimientos en función de este parámetro es muy

útil para las investigaciones por contaminación a fuentes hídricas. En la Ilustración 35, se muestra la localización de los auto declarantes que hacen parte de la zona de estudio. Igualmente, se muestra en la Ilustración 36, la distribución de frecuencias de la variable en estudio.

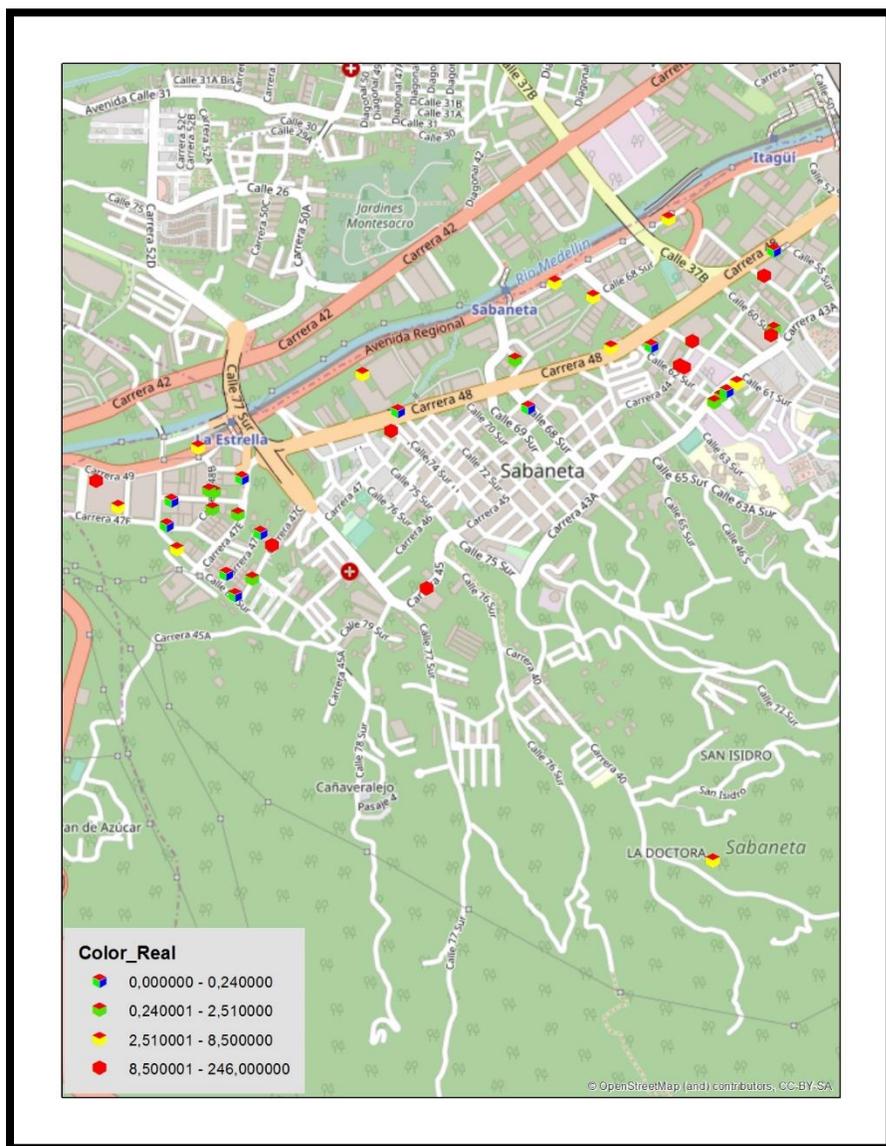


Ilustración 35. Auto declaraciones de acuerdo al color

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

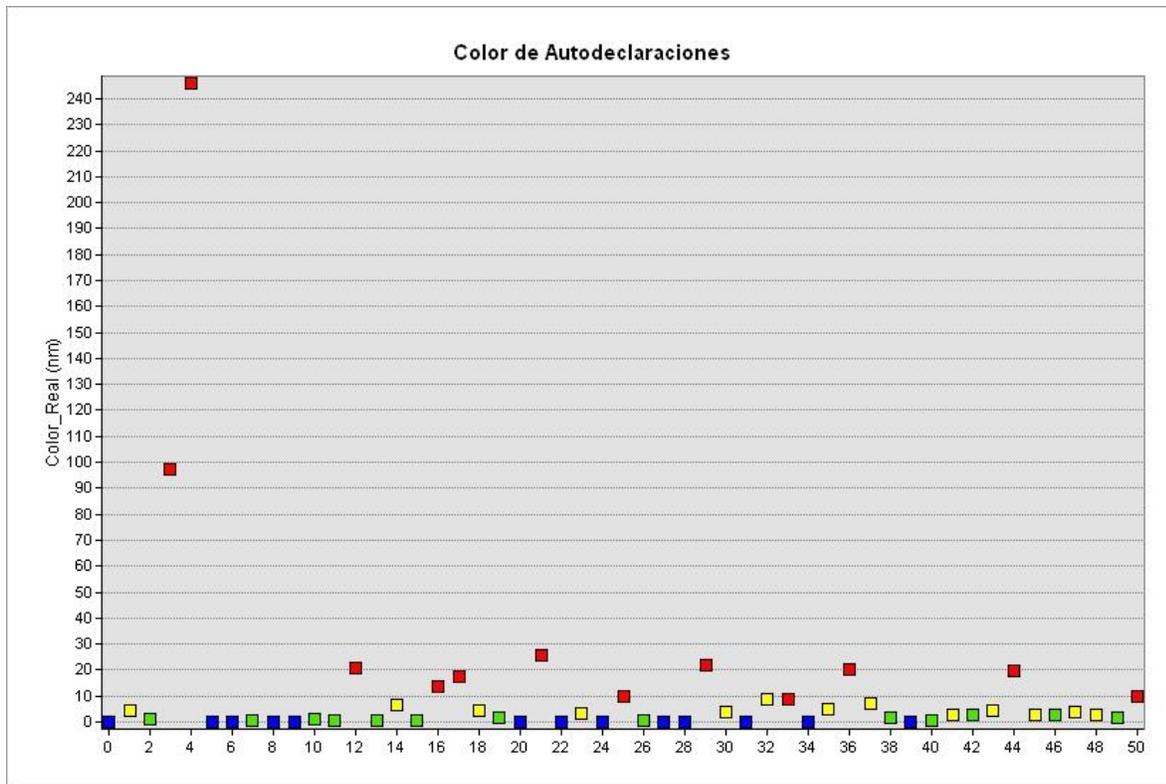


Ilustración 36. Distribución de frecuencias por color

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

La distribución espacial y de frecuencias para el color, evidenciados elementos a tener en cuenta, primero que las altas concentraciones de color en la cuenca se presentan en las dos zonas industriales definidas del municipio de Sabaneta, y como segundo aspecto hay dos industrias vierten altas concentraciones de color y presentan diferencias muy importantes con respecto a la media de industrias en la cuenca.

#### 7.4 Mapa de Calor - Presión por Calidad del ARnD

A continuación, se realiza el procedimiento para la determinación de las áreas de calor o presión en la cuenca derivadas de la agregación de los vertimientos en cuanto a calidad del agua residual. El mapa de calor presión de los vertimientos de ARnD en la



En color amarillo se denotan áreas que se encuentran aledañas a los sectores industriales delimitados con color rojo donde, aunque se ejerce menor presión por contaminantes, se encuentran en áreas industriales en las cuales se pueden intensificar los programas de monitoreo y control de vertimientos ya que son zonas en las que pueden potencialmente estar ubicados vertimientos de ARnD que no se tengan registrados por auto declaraciones.

En síntesis, de acuerdo con el registro de la calidad de los vertimientos que se reportan para la Cuenca La Doctora, se pueden delimitar áreas diferenciales de acuerdo con la calidad del ARnD vertida a las redes de alcantarillado.

## 8. DETERMINACIÓN DE DISTRITOS SANITARIOS CUENCA LA DOCTORA

De acuerdo con los resultados obtenidos en los capítulos 6 y 7 de este estudio, donde con base en los análisis estadísticos se comprueba la hipótesis en la cual se plantea que el agua residual ejerce presión en áreas geográficas muy definidas y diferenciadas de acuerdo con el tipo de vertimiento entregado a las redes de transporte, en términos de calidad y cantidad de agua residual, procedemos a realizar la delimitación de áreas que de ahora en adelante se denominarán Distritos Sanitarios de Agua Residual

Para la delimitación de los Distritos Sanitarios en la cuenca La Doctora, se transponen los mapas de calor presión obtenidos en los capítulos 6 y 7 , al que se denomina mapa de calor presión de agua residual en la cuenca La Doctora. Ver Ilustración 38.

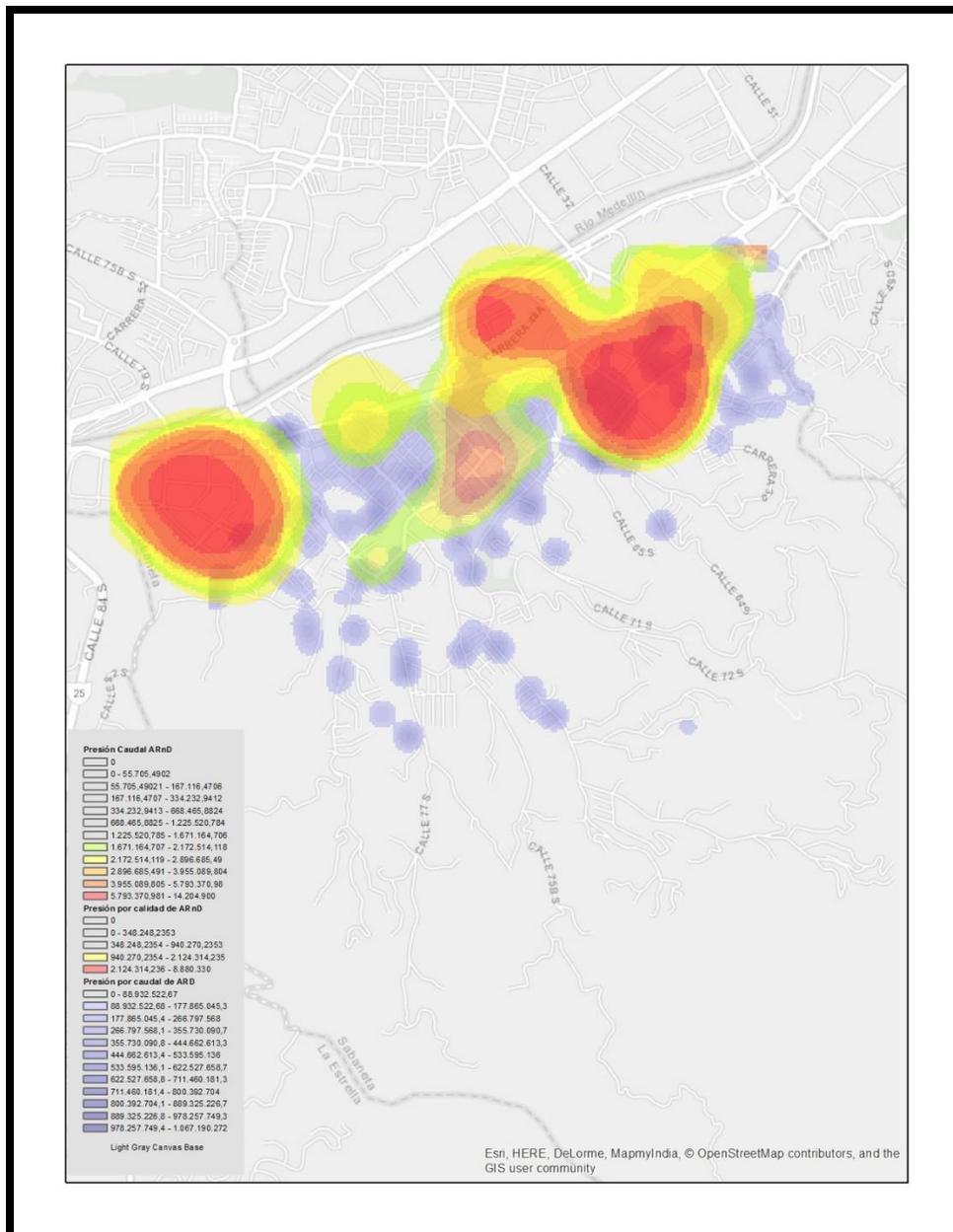


Ilustración 38. Mapa de calor presión de los vertimientos de aguas residuales

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

### 8.1 Delimitación de Distritos Sanitarios DS de Agua Residual Cuenca La Doctora

Se procede a realizar la delimitación de las áreas específicas a partir de la clasificación del agua residual definida por la Resolución 0631 de 2015 (Colombia).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) y de acuerdo con los resultados obtenidos en los capítulos anteriores se clasifican los distritos sanitarios DS en DS ARD y DS ARnD, como se muestra en la Ilustración 39.

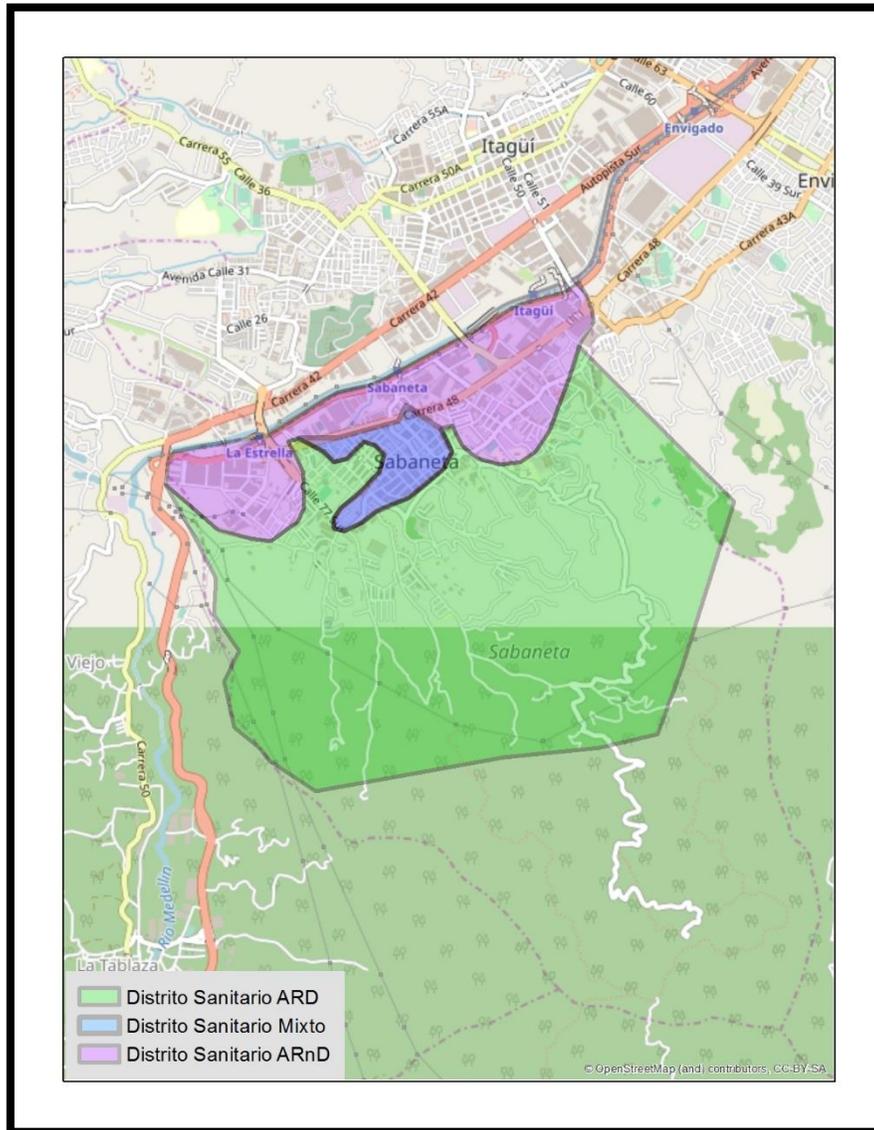


Ilustración 39. Distritos de agua residual Cuenca La Doctora

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

### 8.1.1 Distrito Sanitario de agua residual doméstica DS ARD

Se delimita en las áreas donde de acuerdo con el mapa de calor presión de agua residual se muestra la dinámica y el comportamiento espacial del agua residual doméstica de la cuenca.

Como se demostró en capítulos anteriores el ARD presenta un comportamiento homogéneo en la parte alta de la cuenca -zona sur de la Ilustración 12- donde se observan fenómenos de expansión urbana en zonas que han cambiado de uso del suelo y que tradicionalmente se definían como áreas semi rurales; este fenómeno ha implicado el asentamiento de importantes proyectos de construcción de propiedad horizontal que han incrementado la presión por caudal a las redes de alcantarillado instaladas en estas zonas. En la Ilustración 40, se muestra la delimitación que tendría el DS ARD en la cuenca.



Ilustración 40. Distrito Sanitario ARD cuenca La Doctora

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

### 8.1.2 Distrito Sanitario de agua residual no doméstica (DS ARND)

Se delimita en la parte baja de la cuenca (color magenta) y está definido principalmente por tres grandes zonas o parques industriales asentados el municipio de Sabaneta. Ver Ilustración 41.

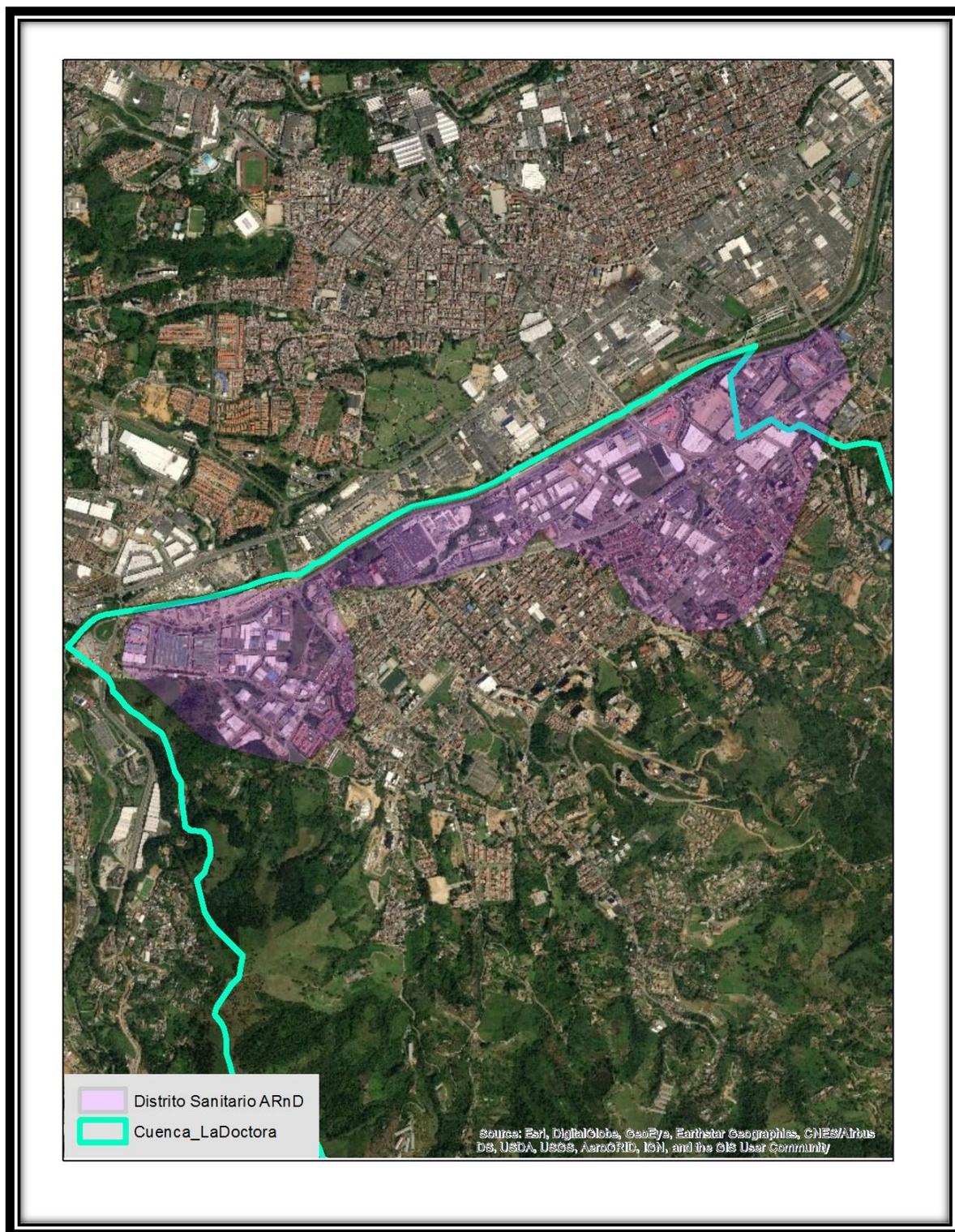


Ilustración 41. Distrito Sanitario Mixto

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Este distrito presenta según los resultados tres zonas de presión significativas en la cuenca, correspondientes a parques industriales con concentración de vertimientos de ARnD.

### 8.1.3 Distrito Sanitario de Agua Residual Mixto DS ARND y ARD

En la zona central de sabaneta se presenta un fenómeno interesante, existe una alta presión de ARnD por caudal, pero no se tienen registros de auto declaraciones de industrias en la zona, y adicionalmente también se presenta una alta presión de ARD, este fenómeno requiere una investigación más a fondo de las industrias en la zona, y verificar si la situación obedece a la densificación urbana en el municipio, por la presencia de industria de la construcción con proyectos de vivienda que pueden estar elevando los caudales del distrito. En consecuencia, la Ilustración 42, visualiza el DS mixto.



Ilustración 42. Distrito Sanitario Mixto

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

#### 8.1.4 Colectores de Agua Residual Asociados a los Distritos Sanitarios

El colector la Doctora es una red principal de alcantarillado que recibe las redes secundarias de gran área del municipio de Sabaneta, recorre de sur a norte la cuenca del mismo nombre para entregar los vertimientos del municipio al interceptor oriental

paralelo al río Medellín, el cual conduce las aguas residuales a la planta de tratamiento San Fernando para su tratamiento y depuración. Los diámetros de tubería, varían entre 150 mm (12"), hasta 1125 mm (45"), a continuación, se aprecia la distribución de frecuencias de los tramos en el colector la Doctora.

En total el colector La Doctora tiene una longitud de 4.189 metros compuestos por 140 tramos de tubería de alcantarillado y recibe los vertimientos de agua residual desde la parte alta de la cuenca en zona denominada semi rural, además de pasar por parte media y baja denominadas zonas urbanas por el PBOT (Sabaneta. Concejo Municipal, 2009). Es importante destacar, que esta información puede variar dado que el PBOT tiene hoy diez años de elaborado.

Este colector recibe los vertimientos de los tres tipos de distritos sanitarios definidos, recorriendo 2.294 metros en el distrito sanitario DS de ARD, 696,68 metros en el distrito mixto y 1.198,64 metros en el DS ARnD.

En la cuenca se presenta otro colector de aguas residuales llamado La Honda, como se puede apreciar a continuación en la Ilustración 43; cada colector está a su vez asociado a las zonas que presentan más altas presiones de vertimientos, por lo tanto, se analizará este distrito de acuerdo con cada colector.

El colector La Honda recorre 787,25 metros en el distrito sanitario de ARnD, aunque cabe anotar que éste o cruza ningún otro distrito de la cuenca y por tanto, no se realizarán estudios de caracterización para determinar su variabilidad. Se recomienda entonces, realizar monitoreos constantes en el colector debido a que puede llegar a explicar incrementos de concentración de contaminantes en las redes de transporte,

dado que se encuentra en la zona de más alta presión por vertimientos industriales ARnD.

Como se puede apreciar en la Ilustración 43, cada colector está a su vez asociado a las zonas que presentan más altas presiones de vertimientos.

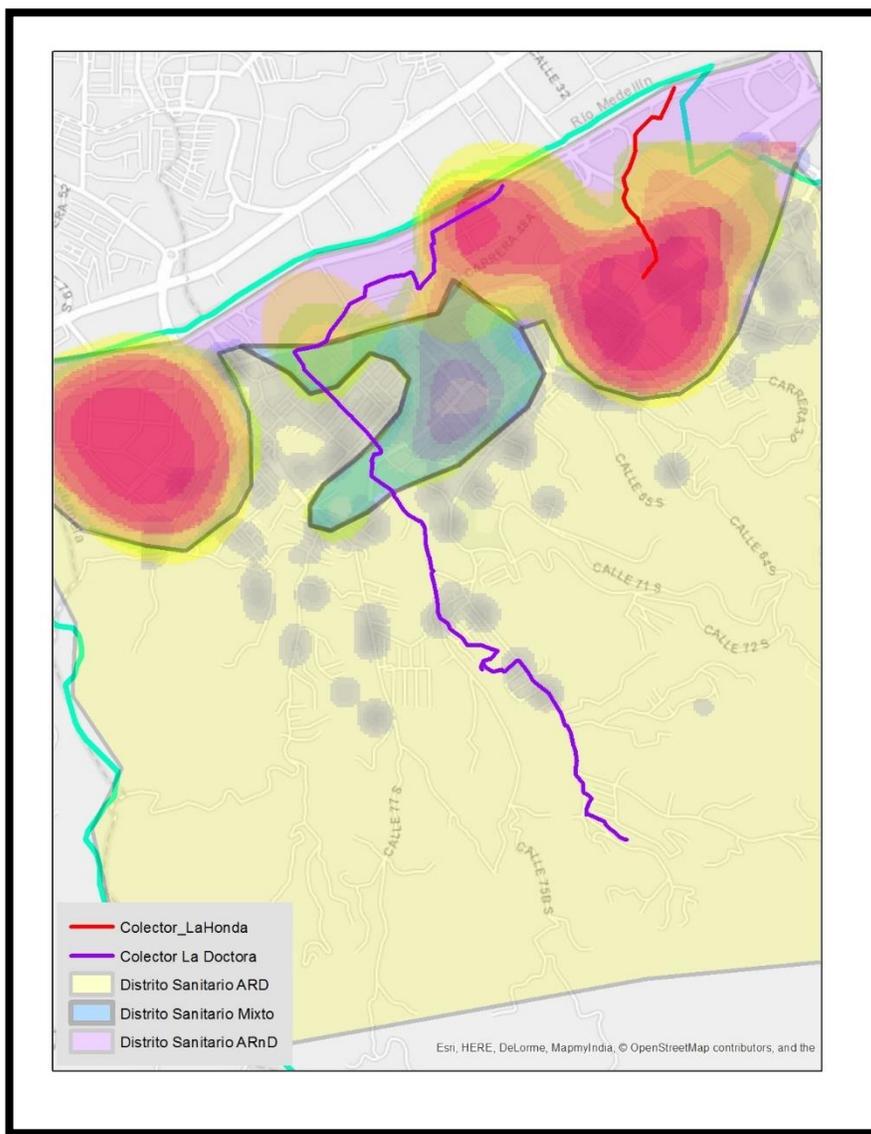


Ilustración 43 Colectores de AR

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

Finalmente, se toma el colector La Doctora el cual recoge los vertimientos de todos los distritos sanitarios de la cuenca, con los propósitos de realizar estudios de caracterización a lo largo de su recorrido y de analizar la dinámica del agua residual de acuerdo con el tipo de distritos sanitarios delimitados.

## 9. ESTUDIOS DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL NO DOMÉSTICA ARND

Para evaluar el comportamiento y dinámica del agua residual transportada por el colector La Doctora en su recorrido por los diferentes distritos sanitarios ya delimitados, y comprobar así, la identificación de áreas diferenciales al interior de la cuenca y a partir de la calidad del agua transportada por sus redes, se procedió con los estudios de caracterización en tres puntos seleccionados con base en los resultados arrojados por los análisis geo espaciales y estadísticos anteriores. Se aclara que no se realiza análisis para el colector La Honda debido a que sólo se encuentra en el distrito sanitario de ARnD y por lo tanto se recomienda su monitoreo constante; dado el transporte de concentraciones importantes de contaminantes al encontrarse en la zona de la cuenca con más alta presión de vertimientos de ARnD.

### 9.1 Determinación de los Puntos de Muestreo

Se determina un punto de muestreo en cada distrito sanitario identificado (en total tres sitios específicos), estos puntos se ubican en la zona alta de la cuenca DS ARD, zona media DS Mixto, y baja DS ARnD. Ver la localización de los puntos, en Ilustración 44.

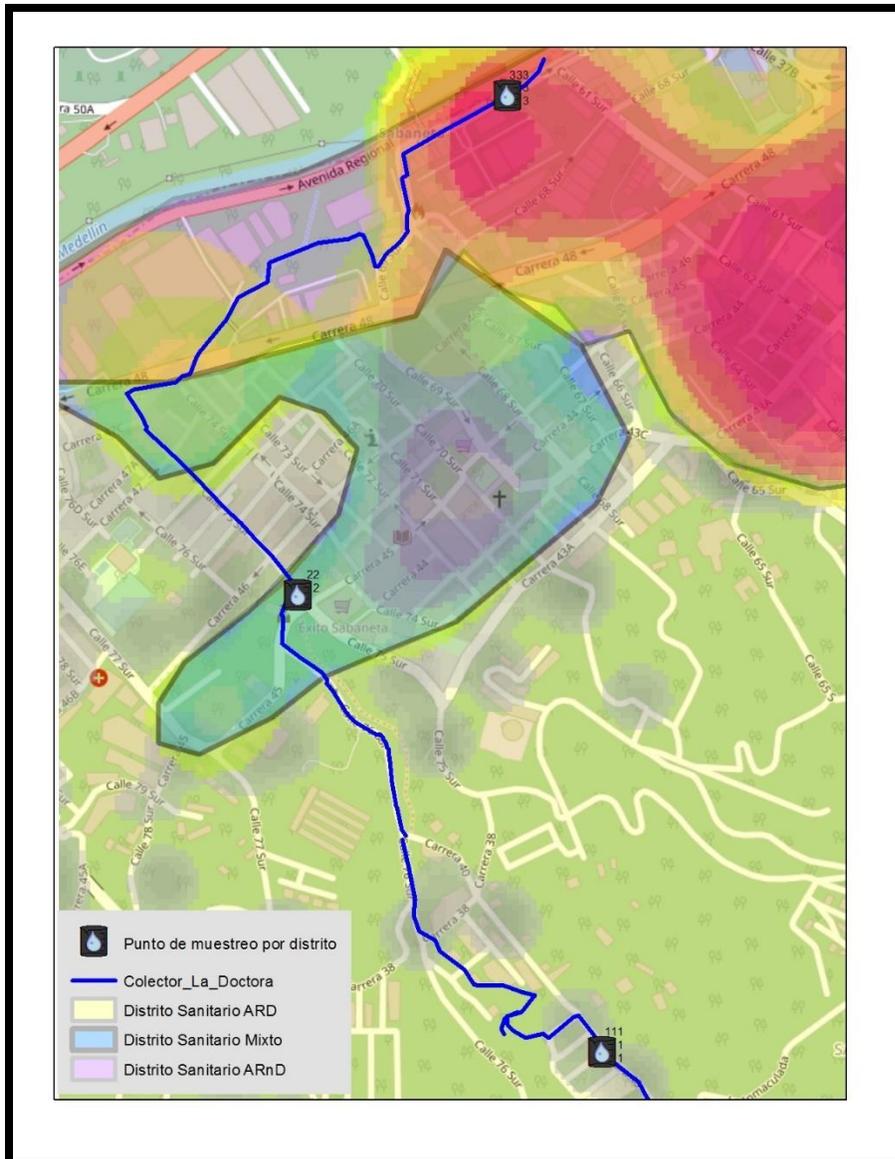


Ilustración 44. Ubicación de los puntos de muestreo en el colector La Doctora.

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En las fotos 1 y 2, se presenta uno de los puntos de monitoreo, correspondiente al Colector La Doctora.



Ilustración 45. Punto de muestreo colector La Doctora parte baja, DS ARnD

Fuente: elaboración propia

Posterior a los muestreos y composición de muestras, se procedió al análisis de laboratorio, determinando los parámetros de la Tabla 8

Tabla 8 . Parámetros para el análisis de laboratorio

Parámetro	Unidad de Media
pH y T°	
Caudal	L/s
Conductividad	μS/cm
Sólidos sedimentables	mg/L
Cloruros	mg/L
Color	UC
Color real	UC
DBO5	mg/L O <sub>2</sub>
DQO	mg/L O <sub>2</sub>
Grasas y aceites	mg/L HEM
Nitrógeno total	mg/L
Sólidos suspendidos	mg/L
Sulfatos	mg/L
Cobre	mg/L
Níquel	mg/L
Zinc	mg/L

Fuente: diseño propio según información de Laboratorio Microbiológico Ortíz Martínez, 2018.

## 9.2 Análisis Multivariado

### 9.2.1 Matriz de Correlación por Concentración

Se establece en la Ilustración 46, la matriz de correlación de contaminantes por punto de muestreo sanitario de ARnD.

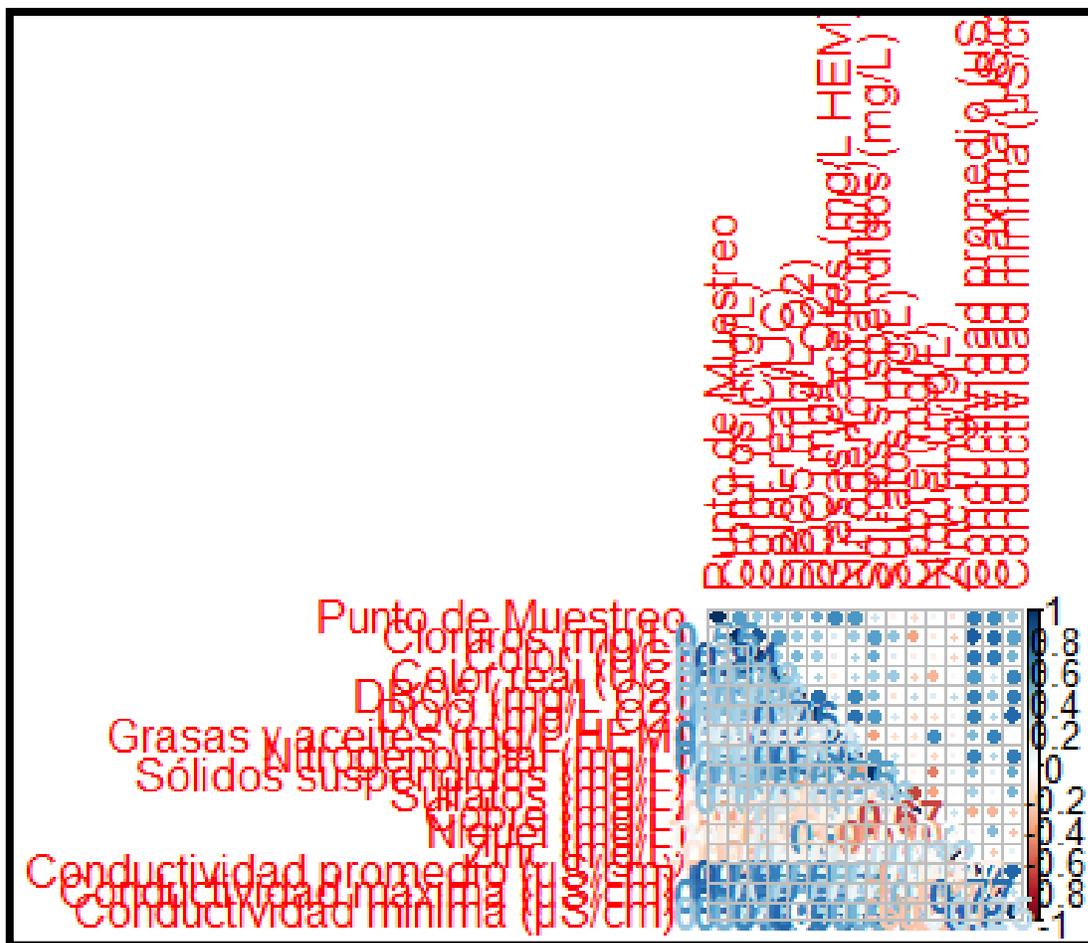


Ilustración 46. Matriz de correlaciones concentración de contaminantes

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

El Test de normalidad Shapiro Wilk data: Conductividad promedio  $\mu\text{S/cm}$ , arrojó  $W = 0.90588$ ,  $p\text{-value} = 0.161$ . Según el test, el valor  $p$  está por debajo de  $0,05$ , lo que permite definir que los datos presentan normalidad y por lo tanto que estos provienen de una muestra uniformemente distribuida.

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que la conductividad presenta correlaciones directas con las variables cloruros, color,  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{DQO}$ , nitrógeno, grasas y aceites, además del punto de muestreo, por lo que se infiere que la medida de conductividad promedio al tener una relación directa con seis (6) parámetros

contaminantes en los estudios de caracterización llevados a cabo, describe la variación de la contaminación en el colector La Doctora.

Se toma entonces la conductividad promedio como medida de la contaminación en el colector la Doctora. A continuación, se presenta la Ilustración 47, en la que se representan las frecuencias de esta variable de acuerdo con el punto de muestreo.

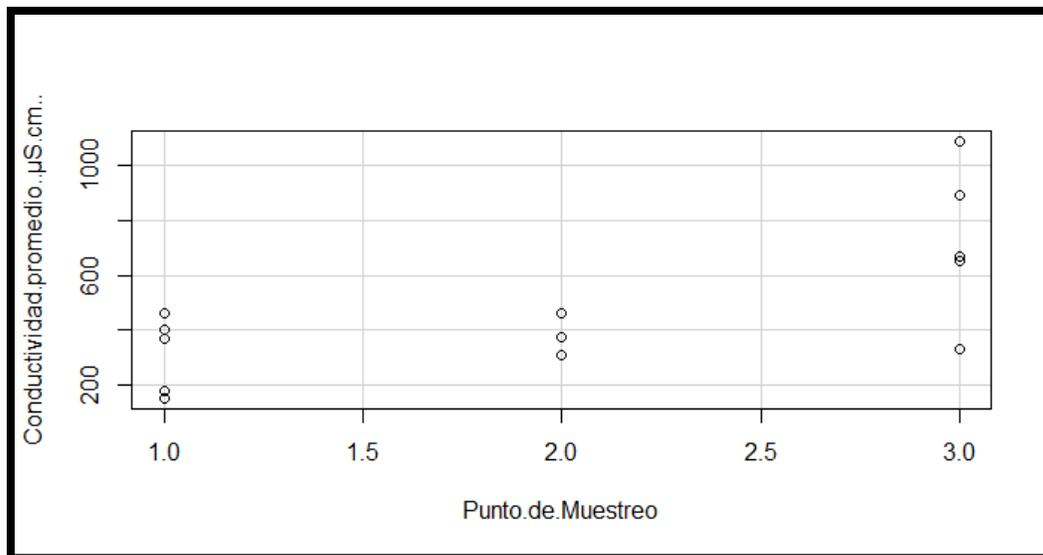


Ilustración 47. Conductividad por punto de muestreo

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

Los puntos de muestreo 1 y 2 presentan una tendencia similar en cuanto a la variabilidad de la contaminación expresada en conductividad promedio, el punto 3 presenta los valores más altos y un rango de resultados más amplio, debido a que se agrupan los resultados en un rango por encima de 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y hasta encima de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Teniendo en cuenta la ubicación de los puntos definidos, podemos decir que el área comprendida entre los puntos 1 y 2 de muestreo, no presenta incrementos en los niveles de contaminación y de acuerdo con el análisis presentado en el capítulo 7, de

este estudio se comprueba que esta área comprende el distrito sanitario de ARD de la Cuenca.

Por el contrario, entre los puntos 2 y 3 de muestreo se observa un incremento importante en la variabilidad de los resultados, y por lo tanto de acuerdo con el capítulo anterior, donde se demuestra que en esta área se ejerce la presión de ARnD en la cuenca y se corrobora la determinación del distrito sanitario de ARnD

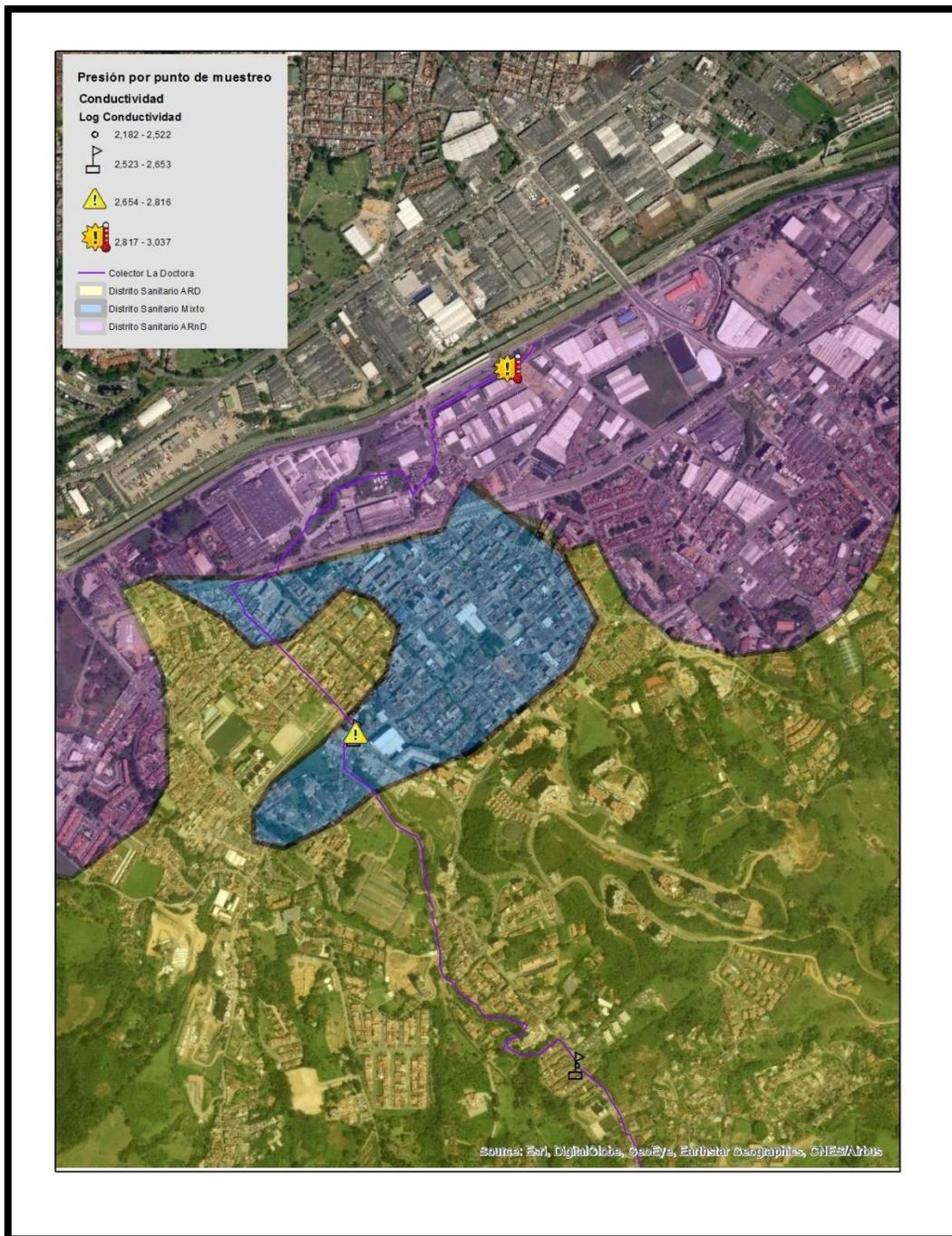


Ilustración 48. Presión de contaminantes por punto de muestreo

Fuente: elaboración propia empleando software ArcGis

En la figura anterior se aprecia el incremento de presión de concentración de contaminación en el colector la doctora desde la parte alta de la cuenca -punto 1- hasta el punto 3 ubicado en la zona norte del mapa cerca al río Medellín, en el cual se presenta la mayor variabilidad y la más alta presión de contaminantes en el colector.

### 9.2.2 Análisis de Componentes Principales

Según el análisis de componentes principales, pueden tomarse dos componentes para explicar el 58% de la calidad del agua en el colector. La Tabla 9, resume los valores calculados y presentados en la

Ilustración 49 e Ilustración 50.

Tabla 9. Eigen Valores

Dimensión	1	2	3	4	5	6
Variance						
% of var	6.502	2.847	2.149	1.354	1.061	0.789
Cumulative % of var	40.636	17.796	13.434	8.464	6.628	4.930
Dimensión	7	8	9	10	11	12
Variance	0.551	0.381	0.151	0.126	0.080	0.008
% of var	3.445	2.382	0.945	0.790	0.499	0.052
Cumulative % of var	95.332	97.714	98.659	99.449	99.948	100.000

Fuente: elaboración propia

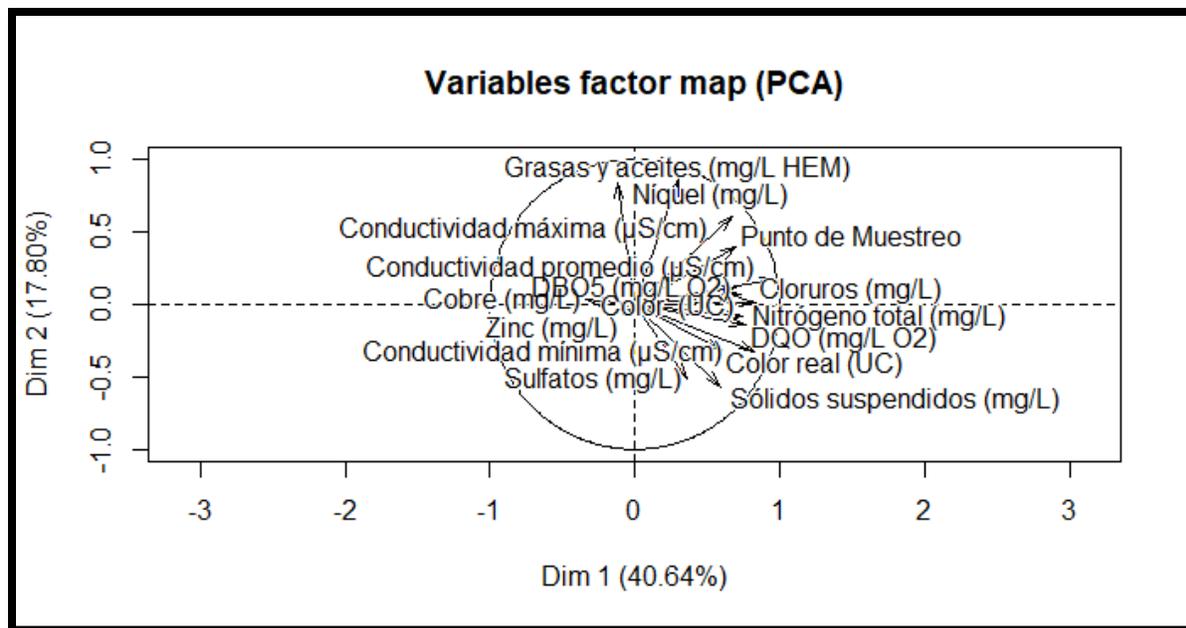


Ilustración 49. Vectores por análisis de componentes principales

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

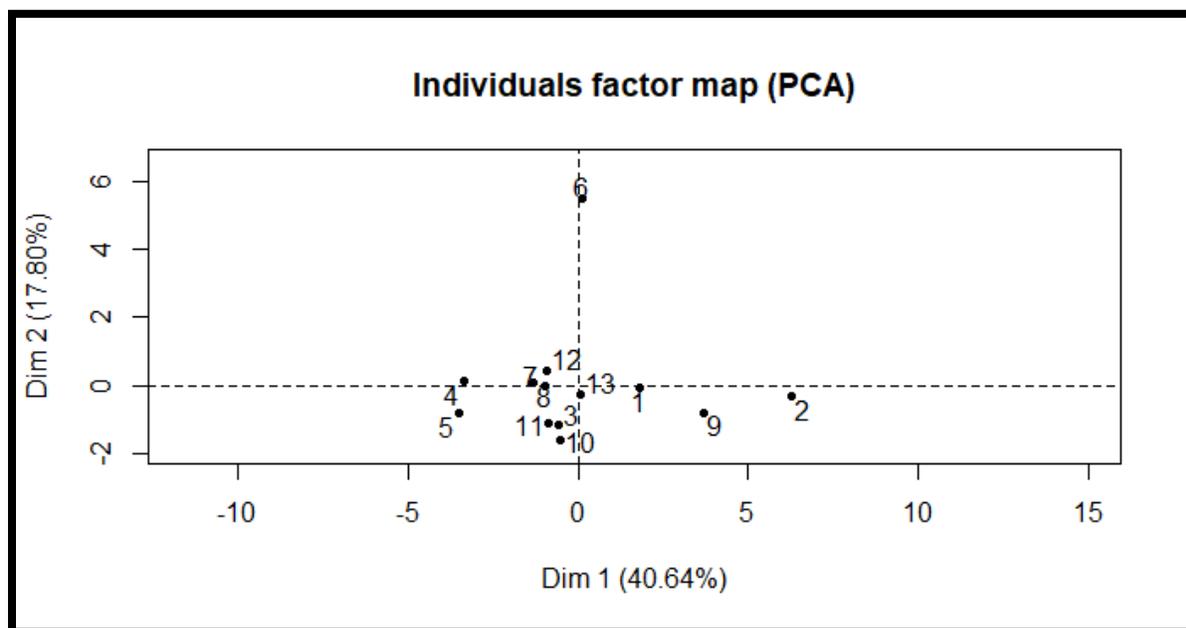


Ilustración 50. Análisis de componente principales

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

También se observa de los resultados, que la varianza significativa se presenta en los dos primeros componentes decreciendo muy poco a partir del tercer componente. Además, se puede evidenciar contaminantes como la conductividad y los cloruros que tienen unos vectores considerables sobre los ejes de los factores, por lo que podríamos decir que estos contaminantes son los determinantes en la cuenca sanitaria, y se podrían proyectar los indicadores de contaminación de acuerdo con ellos.

De otro lado, teniendo en cuenta que los cloruros son una medida indirecta del incremento del color en la red, tal como se demostró en el capítulo 7, y la conductividad, tiene correlación directa con el incremento de los niveles de contaminantes en la red. Por lo tanto, se pueden tener dos parámetros que monitorear y medir en línea para determinar los niveles de contaminación en el colector la Doctora y establecer una línea base.

### 9.3 Calidad del Agua Residual en los Distritos Sanitarios

#### 9.3.1 Análisis por Conductividad

De acuerdo con la Ilustración 51, y teniendo en cuenta que la conductividad describe los niveles de contaminantes en el colector la doctora, encontramos que en la parte baja de la cuenca se registran incrementos muy significativos en la los registros de conductividad máxima, por lo tanto, se concluye que en este distrito se presentan picos altos de concentraciones de contaminantes. Este punto asociado al DS ARnD, reafirma que el incremento de cargas contaminantes en la cuenca se concentra en este distrito.

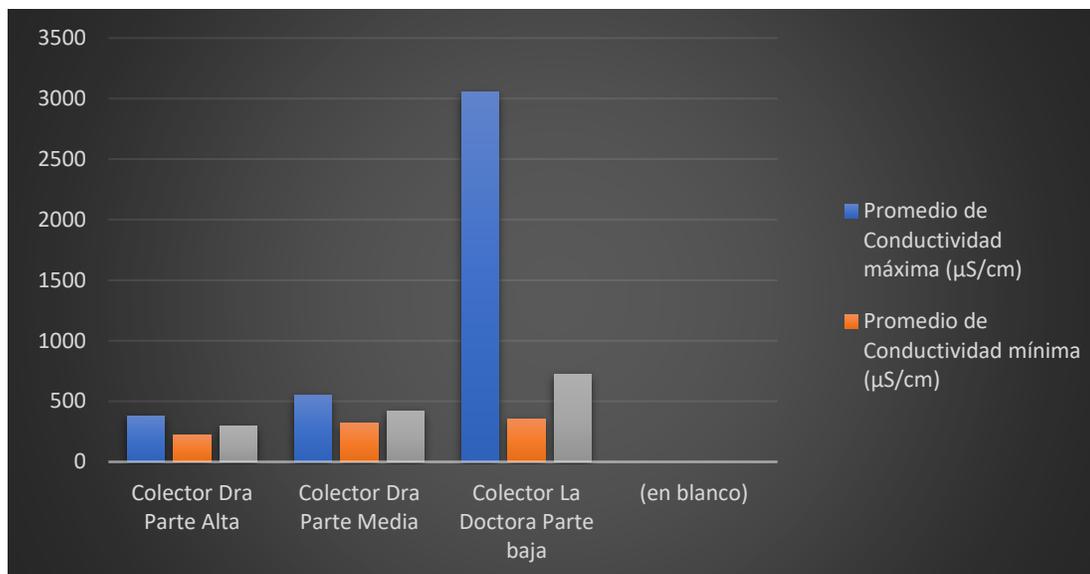


Ilustración 51. Conductividad en el colector La Doctora

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

### 9.3.2 Análisis por Color

En cuanto al color se observa el comportamiento de la Ilustración 52; para este efecto se grafican los parámetros correlacionados cloruros y color; se aprecia un incremento de color aparente entre los tres puntos de muestreo, pero un incremento menos gradual entre el color real y cloruros.

Lo anterior obedece a que el color aparente está asociado a la turbiedad del agua, la cual, es natural que aumente a medida que se incremente el volumen de vertimientos transportados.

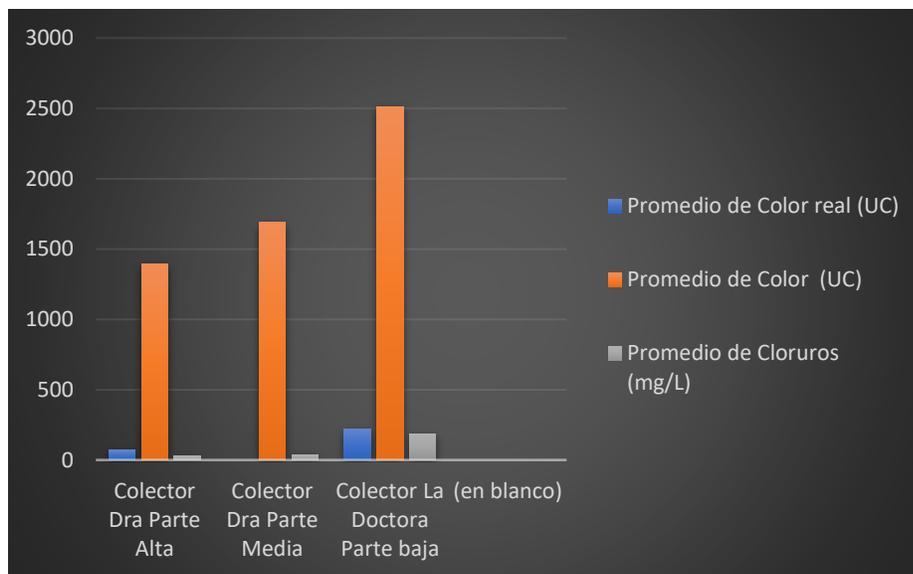


Ilustración 52. Color en el colector La Doctora

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

Los cloruros presentan una correlación más fuerte con el color real, ya que este se presenta en procesos de tinte en los cuales se eleva el pH y por lo tanto podemos inferir que, de acuerdo con el comportamiento observado en el color real y cloruros, los incrementos de color real en la red se presentan en el DS ARnD.

### 9.3.3 Análisis por Daño Potencial en la Red

Continuando con la presentación de los análisis, la Ilustración 53, visualiza las mediciones de pH en las tres secciones delimitadas para la cuenca la Doctora.

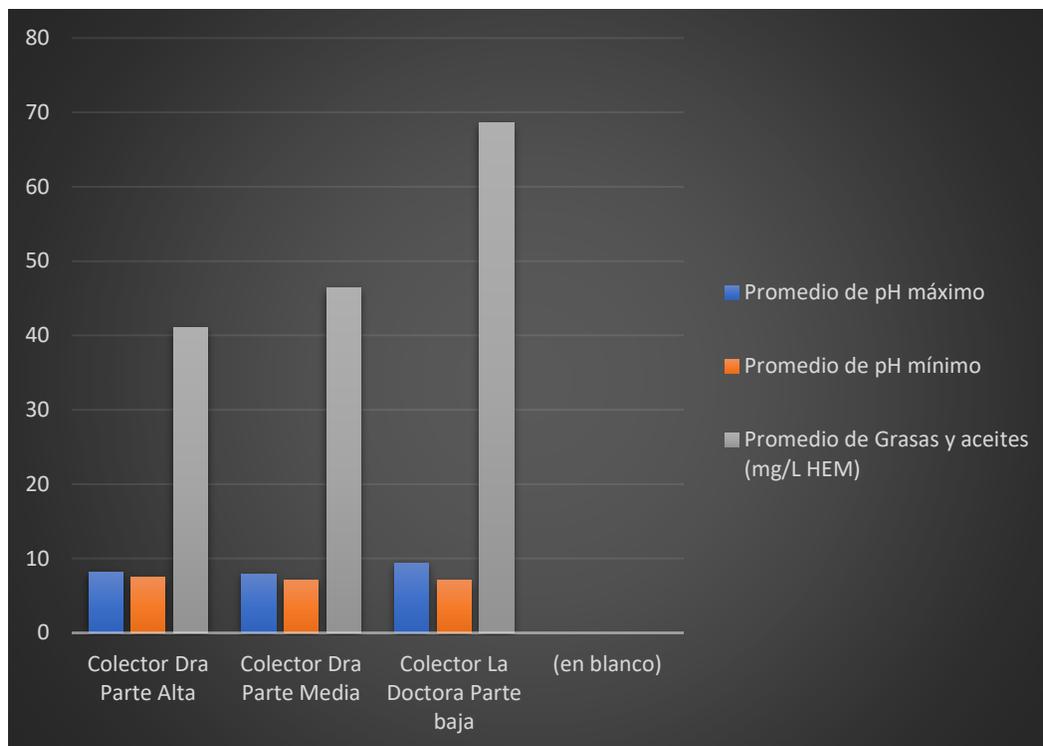


Ilustración 53. pH en el colector La Doctora.

Fuente: elaboración propia empleando software RStudio

## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 10.1 Caudal de Agua Residual en la Cuenca

#### 10.1.1 Agua Residual Doméstica ARD:

En cuanto al caudal de vertimientos entregado a las redes de alcantarillado, el 75% de los usuarios presentan tendencia esperada para el vertimiento generado en una instalación residencial, corresponden a 21.947 usuarios del servicio de alcantarillado y no sobrepasan un volumen mensual promedio de 14,38 m<sup>3</sup>, aportan el 50% de los vertimientos de ARD en la cuenca, con 179.343 m<sup>3</sup> mensuales.

En la cuenca se asientan usuarios residenciales con volúmenes altos de generación de vertimientos, los cuales se agrupan en el 25% de la población general, y aportan el otro 50% del caudal de ARD.

Los vertimientos de ARD se concentran en la parte baja de la cuenca cerca al río Medellín; adicionalmente estos puntos de descarga se ubican en una zona clasificada como de uso de suelo urbano y semiurbano según el PBOT (Sabaneta. Concejo Municipal, 2009) y su distribución espacial es homogénea.

#### 10.1.2 Agua Residual no Doméstica ARnD

Se presenta en general una tendencia baja de generación de vertimientos de ARnD por punto de descarga en el municipio de Sabaneta. De otro lado, se puede observar que el 75% de la población presenta vertimientos promedio mensuales inferiores a los 19 m<sup>3</sup>, con una media de 46 m<sup>3</sup> por mes, este valor de caudal se acerca mucho al generado en un establecimiento residencial generador de ARD.

Adicionalmente el 50% de población presenta vertimientos menores a 9,92 m<sup>3</sup>/mes y aportan tan sólo el 5% del ARnD generado en la cuenca (6.582,32 m<sup>3</sup>/mes).

Se puede inferir que la vocación del 50% de establecimientos generadores de ARnD en el municipio de Sabaneta, genera en muchos casos ARD teniendo en cuenta sólo el volumen del caudal de descarga que provienen de actividades comerciales que no realizan procesos productivos.

El volumen de vertimientos generado por este tipo de usuarios de alcantarillado no denota una actividad productiva que los pueda hacer objeto de seguimiento y control. Por el contrario, en la cuenca se asientan empresas con volúmenes altos de generación de vertimientos, los cuales se agrupan en el 25% de la población general y en los cuales se puede concentrar la gestión en el seguimiento y control de vertimientos.

Si se toma como base el análisis anterior, se podría concentrar la población objeto de vigilancia y control en el municipio de Sabaneta en sólo 728 instalaciones de un total de 2.914, optimizando los programas de investigación y control de las ARnD en la cuenca, disminuyendo el espectro de usuarios a vigilar en un 75%, debido a la enorme diferencia del volumen de vertimiento generado entre un establecimiento comercial y una gran industria.

Se observa como esta población significativa, se agrupa en áreas geográficas muy definidas, en la parte media y baja de la cuenca. En la primera por fenómenos de expansión urbana se encuentran ubicadas industrias de la construcción asociadas al desarrollo de vivienda en el sector. También en la zonas nororiental y noroccidental del mapa, en donde se encuentran parques y bodegas especializadas para actividades industriales; esta tendencia permite establecer la hipótesis en la cual se pueden identificar áreas o distritos diferenciales de agua residual al interior de las cuencas hídricas, a partir de la clasificación de los vertimientos puntuales al alcantarillado público.

El 50% de la población con caudales más altos, que equivalen a 1.165 descargas, y generan 128.795,83 m<sup>3</sup>/mes, el 95% del volumen de ARnD generado en la cuenca La Doctora.

Adicionalmente, se observa que el 25% de la población de ARnD con los más altos caudales de vertimiento, es la que presenta las variaciones más importantes, y que es equivalente a 728 puntos de vertimiento, se recomienda priorizar estos puntos de vertimiento para monitoreo y control en función del caudal, debido al aporte del 91% del total del ARnD, que es vertida mensualmente a las redes de alcantarillado en la cuenca La Doctora.

Se presentan áreas de presión importantes en las donde se desarrollan grandes proyectos de vivienda que se están consolidando en Sabaneta, y que están densificando la ocupación del suelo.

Para el ARnD se observa una concentración de vertimientos muy importante en la parte baja y centro de la cuenca, en donde se encuentran los parques y bodegas especializadas para actividades industriales en el municipio, adicionalmente se observa en la parte central del mapa un fenómeno interesante de concentración alta de vertimientos en el área de desarrollo del sector de la construcción, esta zona tiende a convertirse en residencial a medida que los proyectos de vivienda finalicen, e inicie el proceso de vinculación de los usuarios residenciales que los habitarán.

## 10.2 Calidad del Agua Residual no Doméstica

De acuerdo a las auto declaraciones de vertimientos de ARnD, se presenta una cantidad importante de vertimientos de ARnD con gran aporte de caudal, y concentraciones contaminantes vertidas a las redes de alcantarillado en el sector

comprendido por actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes, con un total de 551.179 m<sup>3</sup>/mes declarados, el 54% del total de aporte del caudal registrado por auto declaraciones en la cuenca.

El segundo sector donde se observa gran aporte de caudal contaminantes al alcantarillado en la cuenca La Doctora es el de alimentos y bebidas, con un 29% del total del registro, 8.677 m<sup>3</sup>/mes.

Esto indica una vocación industrial en los sectores productivos dedicados a la fabricación y manufactura de bienes y elaboración de productos alimenticios y bebidas, con el 83% de aporte de vertimientos de ARnD presentados en auto declaraciones de usuarios tipo industrial. Tan sólo para estos dos sectores el volumen de vertimientos declarados están un 414% por encima de los valores totales registrados en la cuenca para ARnD en micro medición.

En cuanto a la concentración y carga del ARnD para las auto declaraciones, de acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que el tipo de actividad productiva no tiene relación directa con los contaminantes muestreados, y por lo tanto el tipo de actividad productiva no describe el tipo de contaminación es vertido a la red, esto se determina de acuerdo con el tamaño de la industria.

Adicionalmente, se obtuvo una correlación muy alta entre los parámetros de cloruros y nitrógeno con el color y pH máximo e inversamente proporcional con el pH mínimo, este comportamiento obedece a la gran presencia en la cuenca de industrias dedicadas a procesos de tinte, estampación, teñida y lavado de textiles, las cuales tienen vertimientos con pH mayores a 9, que elevan el pH de sus procesos industriales, además de incorporar sales y detergentes.

Este resultado es relevante para este estudio, puesto que el color al ser un contaminante de alto impacto en las fuentes hídricas debe ser monitoreado constantemente en la red para evitar afectaciones ambientales, labor que se dificulta ya que este parámetro no se puede tomar en tiempo real puesto que para determinarlo se debe enviar una muestra para posterior análisis de laboratorio.

De acuerdo con la alta correlación presentada entre los cloruros y el color para la cuenca La Doctora, con la implementación de sondas con electrodos de cloruros en puntos estratégicos de la red de alcantarillado se podría monitorear indirectamente el aumento de los niveles de color, este tema en particular requeriría un estudio más especializado.

Por otro lado, para los caudales registrados tan sólo cuatro auto declaraciones explican el 75% de los vertimientos de ARnD en la cuenca La Doctora, en otras palabras, el 7% de la población de industrias vierten, 51.620,5 m<sup>3</sup>/mes del caudal total.

La carga contaminante presenta una tendencia muy parecida a la de los caudales, en la cual con tan sólo el 25% de la muestra se está demostrando la mayoría de la carga contaminante de la cuenca en DBO<sub>5</sub>, DQO y SST, mientras que el 75% de la población muestreada vierte cargas contaminantes considerablemente muy bajas, en relación con las industrias que tienen alto consumo de agua en sus procesos productivos.

Los resultados anteriores demuestran que la carga contaminante está definida de acuerdo con el caudal y el tamaño de la industria, y no de acuerdo con el tipo de actividad productiva descrita en el (Colombia. Presidencia de la República, 2015).

Se presentan fluctuaciones de pH en zonas industriales muy definidas, predominando pH con niveles altos de la población, diez vertimientos presentan pH

mayores a 9 unidades. En cuanto al pH mínimo el riesgo por daño potencial en la red se puede configurar con tan sólo cuatro vertimientos que declaran pH mínimo por debajo de 4, el 25% de las auto declaraciones de ARnD.

El color y las grasas y aceites, se resalta la ubicación geográfica de puntos de vertimiento altos en dos zonas específicas de la cuenca, correspondientes a parques industriales.

Hay tres zonas especiales en la cuenca donde se ejerce mayor presión por calidad del agua del ARnD, destacando los dos centros industriales más importantes de Sabaneta donde se presenta una densificación importante de empresas.

También al interior de la cuenca se encuentran unas áreas en las cuales, aunque se ejerce menor presión por contaminantes, se encuentran vertimientos de que no se tengan registrados por auto declaraciones y donde se pueden intensificar programas de monitoreo y control.

### 10.3 Distritos Sanitarios de Agua Residual

#### 10.3.1 Distrito Sanitario de Agua Residual Doméstica DS ARD

El ARD presenta un comportamiento homogéneo en la parte alta de la cuenca donde se observan fenómenos de expansión urbana en zonas que han cambiado de uso del suelo y que tradicionalmente eran semi rurales, este fenómeno ha implicado el asentamiento de importantes proyectos de construcción de propiedad horizontal que han incrementado la presión por caudales a las redes de alcantarillado instaladas en estas zonas.

### 10.3.2 Distrito Sanitario de Agua Residual no Doméstico DS ARnD

Este distrito presenta según los resultados tres zonas de presión significativas en la cuenca, correspondientes a parques industriales con concentración de vertimientos de ARnD.

### 10.3.3 Distrito Sanitario de Agua Residual Mixto DS ARND y ARD

En la zona central de sabaneta se presenta un fenómeno muy interesante, existe una alta presión de ARnD por caudal, pero no se tienen registros de auto declaraciones de industrias en la zona, y adicionalmente también se presenta una alta presión de ARD, este fenómeno requiere una investigación más a fondo de las industrias en la zona, y verificar si el fenómeno se debe a la densificación urbana en el municipio, por la presencia de industria de la construcción con proyectos de vivienda que pueden estar elevando los caudales del distrito.

## 10.4 Calidad del Agua Residual Colector La Doctora

La conductividad del ARD presenta correlaciones directas con los cloruros, color, DBO5, DQO, nitrógeno, grasas y aceites, además del punto de muestreo, por lo que podemos concluir que la medida de conductividad promedio al tener una relación directa con 6 parámetros contaminantes en los estudios de caracterización, describe la variación de la contaminación en el colector La Doctora, por lo tanto se puede tomar la conductividad como medida para determinar la línea base para la contaminación en el colector la Doctora.

El distrito sanitario ARD presenta los niveles de conductividad más bajos de la cuenca, su variabilidad total no es significativa en comparación con el distrito sanitario de ARnD y tiene un comportamiento homogéneo.

Teniendo en cuenta la ubicación de los puntos definidos, podemos decir que el área comprendida entre los puntos de muestreo 1 y 2 DS ARD y mixto presenta un comportamiento homogéneo debido a la naturaleza doméstica de los vertimientos transportados.

Por el contrario, en el punto tres de muestreo DS ARnD se observa un incremento importante en la variabilidad de los resultados, y por lo tanto una mayor presión diferencial en la cuenca por contaminantes vertidos a la red, lo que representa un cambio en la naturaleza del agua residual transportada por el colector de doméstica a no doméstica, debido a la presión de contaminantes de origen industrial en la parte baja de su recorrido.

Según los hallazgos, en la parte baja de la cuenca se registran incrementos muy significativos en los registros de conductividad máxima, por lo tanto se concluye que en este distritos se presentan picos altos de concentraciones de contaminantes, este punto asociado al distrito sanitario DS ARnD, reafirma que el incremento de cargas contaminantes en la cuenca se concentra en este distrito, situación que puede generar afectaciones a los sistemas de tratamiento de la planta de agua residual San Fernando.

En el estudio se evidenció que la conductividad y los cloruros explican hasta el 58% de los estudios de caracterización, por lo que podríamos decir que son los determinantes en la cuenca sanitaria. Si tenemos en cuenta que los cloruros son una medida indirecta del incremento del color en la red como se demostró en el capítulo 7, y

la conductividad tiene correlación directa con el incremento de los niveles de contaminantes en la red, podemos tener dos parámetros que se pueden monitorear y medir en línea para determinar los niveles de contaminación en el colector la Doctora y establecer una línea base en la cuenca sanitaria.

En cuanto al color y grasas y aceites se observa el mismo comportamiento, de los resultados se aprecia un incremento en los tres puntos de muestreo.

Lo anterior obedece a que el color aparente está asociado con la turbiedad del agua, lo cual es natural que aumente a medida que se incremente el volumen de vertimientos transportados, los cloruros presentan una correlación más fuerte con el color real, ya que este se presenta en procesos de tinte en los cuales se eleva el pH, por lo tanto podemos concluir que de acuerdo con el comportamiento observado en el color real y cloruros, los incrementos de color real en la red se presentan en el distrito sanitario de agua residual no doméstica.

## 11. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTAS

Con base en la determinación de distritos sanitarios se pueden evaluar alternativas de separación de redes de alcantarillado a partir de la calidad del agua residual en las cuencas, lo anterior con el fin de cumplir dos objetivos, el primero no realizar mezcla de agua residual ARD y ARnD en las redes de transporte para luego ser conducida a las plantas de tratamiento donde en algunos casos debido a la mezcla se dificulta su depuración. Este objetivo apunta al principio de separación en la fuente establecido por la ONU en su *Informe Mundial del Agua 2017* (UNESCO, 2017).

El segundo es poder conducir las aguas residuales no domésticas a sitios donde se puedan ofrecer sistemas de tratamiento de aguas residuales in situ a los usuarios industriales, no como alternativa de tratamiento individual de cada industria, sino de tratamiento agrupado y sectorizado de las aguas residuales, en este aspecto se puede generar una alternativa viable en la que se puedan mancomunar esfuerzos de todos los actores ambientales del territorio, en la gestión integral de gestión de vertimientos. Para este caso se pueden explorar asociaciones público-públicas APP o público privadas APP, en las cuales en asociación con las autoridades y mediante mecanismos como tasas retributivas, se puedan generar proyectos de tratamiento de aguas residuales industriales sectorizados en las cuencas con distritos sanitarios de ARnD.

En el caso de la cuenca la doctora, y de acuerdo con los resultados ofrecidos por el estudio, en el cual se determinó que el tipo ARnD no está definida por el tipo de sector productivo según la Resolución 0631 (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015) sino por su caudal, se propone tener en cuenta este estudio como base para la exoneración de la presentación de estudios de caracterización para

establecimientos comerciales que no sobrepasen un volumen de vertimiento de 14,38 m<sup>3</sup>/mes en promedio, y representan aproximadamente 21.947 usuarios del servicio de alcantarillado, lo anterior apuntando a la optimización de recursos y operaciones para la gestión integral de vertimientos.

En este escenario y concentrando la gestión de los vertimientos en 728 usuarios y clasificados de acuerdo a los distritos sanitarios identificados, obtenemos que tan sólo para el DS ARnD, hay potencial de ofrecer tratamiento industrial sectorizado para un caudal de 163.835 m<sup>3</sup>/mes provenientes 437 industrias, además y teniendo en cuenta que según las auto declaraciones generadas en el sector se presenta que un cumplimiento por parte de los usuarios del 11% en los niveles permitidos (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), se configura una oportunidad de ofrecer alternativas de tratamientos sectorizados para garantizar el cumplimiento de la normatividad además de generar oportunidades de negocio en el tratamiento y depuración de las aguas residuales del sector industrial de la cuenca.

En cuanto al distrito sanitario mixto, en el cual no se tienen abundantes registros por auto declaraciones, se recomienda realizar investigaciones en campo con el fin de registrar las industrias que están produciendo los altos volúmenes de caudal y requerir en su caso los respectivos estudios de caracterización, con el fin de obtener los registros que permitan evaluar el comportamiento de los contaminantes en esta zona específica. Adicionalmente se recomienda instalar en este distrito, en el cual se registra la zona de transición del agua residual en la cuenca donde se convierte de ARD a ARnD, estaciones de calidad móviles y automáticas, con el fin de registrar con más detalle los puntos donde el agua cambia notablemente su composición en términos de sus contaminantes.

Con respecto a la tasa retributiva se propone tener en cuenta el modelo estadístico presentado y determinar los puntos donde se deben realizar los estudios de caracterización para colectores típicos de agua residual doméstica. Lo anterior, debido a que se demostró donde se encuentran los puntos de presión significativos de acuerdo con el tipo de agua transportada en la red, en este caso en la parte alta de la cuenca - punto de muestreo 1- donde se registra un área de presión por ARD.

Para la tasa retributiva ARnD se recomienda tomar el punto 3 en la parte baja de la cuenca, en el DS ARnD de acuerdo con la presión de vertimientos de ARnD en ese lugar del municipio de Sabaneta.

## REFERENCIAS

- Alonsof, J. M., Bartham, J., Bowlingc, M., Enaultd, J., Kaysera, G. L., Loretd, J. F., . . .  
Settya, K. E. (2017, february 24). Water quality, compliance, and health outcomes among utilities implementing Water Safety Plans in France and Spain. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*.
- Álvarez, V. A., & Ortiz, J. D. (2018, 08 14). ¿Está desbordado Sabaneta por su acelerada expansión urbana? *El Colombiano*.
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2019, 04 21). *standardmethods.org*. Retrieved from *standardmethods.org*: <https://www.standardmethods.org/www.apha.org>
- Chen, H., Cui, X., Long, R., Yang, T., & Zhu, D. (2016, January 20). Application of the public–private partnership model to urban sewage treatment. *Journal of Cleaner Production*, 142(2), 1065-1074.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 0631. Por la cual se establecen los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos a los cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Bogotá D.C. 2015).
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 0075. Por la cual se adopta el formato de reporte sobre el estado de cumplimiento de la norma de vertimiento puntual al alcantarillado público. (Bogotá D.C. 2011).
- Colombia. Presidencia de la República, Decreto 1594. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título IV-

Parte III-Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos (Bogotá D.C. 1984).

Colombia. Presidencia de la República, Decreto 3930. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del Título IV-Parte III-Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (Bogotá D.C. 2010).

Colombia. Presidencia de la República, Decreto 2667. Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones (Bogotá D.C. 2012).

Colombia. Presidencia de la República, Decreto 1076. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Bogotá D.C. mayo 26, 2015).

Colombia. Presidencia de la República, Decreto 1076 por el cual se adopta el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (Bogotá D.C. 2015).

Empresas Públicas de Medellín. (2012). *Las ciudades y el agua*. Medellín: Universidad de Medellín.

ESRI. (2019, 4 21). *Arc Gis Pro*. Retrieved from Análisis estadístico: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/commonly-used-tools/statistical-analysis.htm>

ESRI. (2019, 4 21). *Arc Gis Pro*. Retrieved from Cómo funciona la densidad kernel: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm>

- ESRI. (2019, 04 21). *Arc Gis Pro*. Retrieved from Análisis de clúster y de valor atípico (I Anselin local de Moran): <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-moran-s.htm>
- ESRI. (2019, 4 21). *Arc Gis Pro*. Retrieved from Clustering alto/bajo (G general de Getis-Ord): <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/high-low-clustering.htm>
- Granados, C., & Sánchez, E. (2014, January). Water Reforms, Descentralización and Child Mortality in Colombia, 1990–2005. *World Development*, 53, 68-79.
- Gupta, R., Sharma, R. K., & Yadav, M. (2016). Water Quality and Sustainability in India: Challenges and Opportunities. In *Chemistry and Water The Science Behind Sustaining the World's Most Crucial Resource 2017*, (pp. 183-205). Delhi, India.
- Hukka, J. J., & Vinnari, E. M. (2007, June). Public–public partnerships in the Finnish water services sector. *Utilities Policy*, 15(2), 86-92.
- INVEMAR. (2017). Protocolo para el monitoreo del agua. *Protocolo para el monitoreo del agua*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.
- Jácome Trujillo, S. C. (2016). *Proyecto de práctica académica, Implementación, seguimiento y ajuste del modelo para la investigación, monitoreo y control de las aguas residuales en las Empresas Públicas de Medellín E.S.P.* Medellín: Universidad de Antioquia.

- Jingiie, Z., Vladan, B., & Xuan, W. (2016, Julu). Improving real-time forecasting of water quality indicators with combination of process-based models and data assimilation technique. *Ecological Indicators*, 66, 428-439.
- Karpuzcu, M. (2017, june). Legislative and institutional assessments for integrated river basin management in Turkey. *Environmental Science & Policy*, 72, 20-29.
- Laboratorio Microbiológico Ortiz Martínez. (2018). *Estudio de caracterización de vertimientos líquidos en redes de alcantarillado*. Medellín.
- Liu, N., Shang, J., Sun, Y., & Zhang, J. (2016, 20 January). Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model . *Journal of Cleaner Production*, 142, 613–625.
- Mangala Praveenaa, S., & Zaharin Arisb, A. (2012, February 12). A baseline study of tropical coastal water quality in Port Dickson, Strait of Malacca. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1-2), 196-199.
- Martínez, L. m. (2018). *Estudio de caracterización de vertimientos líquidos en redes de alcantarillado*. Medellín.
- May, C., Ting , F., & Wenhui, C. (2017, May 15). Temporal variations in water quality in a brackish tidal pond: Implications for governing processes and management strategies. *Journal of Environmental Management*, 193, 108-117.
- Mcintoshb, B. S., Tannera, A. S., Tillotsone, M. R., & Widdowsond, D. C. (2016). The water Utility Adoption Model (wUAM): Understanding influences of organisational and procedural innovation in a UK water utility. *Journal of Cleaner Production*.

- Mickelson, A., & Tsvanki, D. (2017). Information Systems for Real-Time Water Quality Monitoring. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Boulder, CO, United States.
- Paavola, J. (2011, may 15). Reprint of: Sewage Pollution and Institutional and Technological Change in the United States, 1830-1915. *Ecological Economics*, 70, 1289-1296.
- Pedrosa Correo, I., Juarros-Basterretxea Correo, J., & Robles-Fernández Correo. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 15-24.
- Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Aburrá, Decreto 1640 de 2012 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA, CORNARE 2017).
- Sabaneta. Concejo Municipal, Acuerdo N° 22. Por el cual se adopta el Plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de Sabaneta (Sabaneta 9 9, 2009).
- Tongesayi, S. (2016). Water Quality and Public Health: Role of Wastewater. In *Chemistry and Water The Science Behind Sustaining the World's Most Crucial Resource 2017* (pp. 553-596). West Long Branch, New Jersey, United States.
- UNESCO. (2017). *Agua Residual el recurso desaprovechado*. ONU, ONU Agua. París: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

