



**Impacto del uso del suelo urbano en la calidad fisicoquímica de las aguas de
escorrentía superficial en una cuenca urbana de montaña**

Diana Cristina Atehortúa Rivera

Tesis de maestría para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental

Directora

Lina Claudia Giraldo Buitrago, Doctora (PhD) en Ingeniería

Codirector

Juan Camilo Villegas Palacio, Doctor (PhD) en Recursos Naturales

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Atehortúa Rivera, 2024)
Referencia	Atehortúa Rivera, D. C. (2024). <i>Impacto del uso del suelo urbano en la calidad fisicoquímica de las aguas de escorrentía superficial en una cuenca urbana de montaña</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Ingeniería Ambiental,
 Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su amor y apoyo durante todo este proceso, especialmente a mi hermana y a mi papá por brindarme su ayuda en la fase experimental del proyecto.

A la profesora Lina Claudia Giraldo, directora del presente trabajo de investigación y quien me acompañó durante los últimos 5 años en mi proceso de formación como ingeniera y como magister.

Al profesor Juan Camilo Villegas, codirector del proyecto, por su confianza, su apoyo, por compartir sus conocimientos conmigo. Sin su ayuda, el proceso hubiese sido mucho más complicado.

A los miembros de RedRío por sus recomendaciones y sugerencias, las cuales fueron de gran ayuda para el desarrollo del proyecto. Especialmente a Andrés Ardila por su ayuda en la propuesta del montaje experimental y a Juan Manuel Osorio (Q.E.P.D) por escucharme, apoyarme y ayudarme durante la fase inicial del trabajo experimental.

A Empresas Públicas de Medellín, la administración del Cerro Nutibara y la biblioteca pública Altavista, por permitirme instalar el montaje experimental en cada uno de los puntos propuestos y por mostrar interés en divulgar la información obtenida durante el proceso.

A mis amigos, por sus sugerencias, por escucharme y darme ánimo. Especialmente a Andrés Arboleda, Andrés Octavio Pérez, Daniela Ramírez, Diver Marín, Isabel Castro y Benjamín Atehortúa.

A la Universidad de Antioquia por formarme como profesional y ayudarme a crecer como persona.

RESUMEN

Los crecientes procesos de expansión urbana alteran no solo las condiciones hidrológicas del territorio, sino que también incorporan contaminantes a los cuerpos de agua, dependiendo del uso del suelo. De esta manera la contaminación difusa resultante de la escorrentía de aguas pluviales en estas zonas particularmente, es considerada como una causa de la degradación de la calidad del agua en las fuentes receptoras. En este trabajo se evaluó de manera experimental la relación entre las características del uso del suelo y la calidad de las aguas de escorrentía, considerando además diferentes parámetros de la lluvia como son intensidad, frecuencia y calidad.

Para esto se desarrollaron seis (6) muestreos en la microcuenca de la quebrada Altavista, donde se estudiaron parámetros básicos de calidad del agua, además de algunas fuentes de contaminación urbana como son los metales pesados. Asimismo, se realizaron análisis estadísticos descriptivos y multivariados como son el análisis de componentes principales (PCA) y análisis clúster con el fin de identificar agrupaciones y correlaciones entre los puntos de muestreo y los usos del suelo de interés. A partir tanto del PCA como del clúster jerárquico realizado, se encontró que la concentración de nutrientes y la degradación de los cuerpos de agua son directamente proporcionales tanto a la densidad de población como al establecimiento del sector industrial; asimismo se identificó una alta variabilidad de sólidos suspendidos en todos los monitoreos realizados, para los diferentes usos, especialmente en la zona residencial.

Estos resultados abren la puerta a una cantidad de cuestionamientos en cuanto al impacto del uso del suelo en la composición química de las aguas pluviales y promueven una mejor comprensión de los procesos de contaminación del agua de escorrentía superficial y por ende una visión más completa de las interacciones que se presentan en un ecosistema urbano, estableciendo una herramienta clave para la gestión hídrica en las cuencas urbanas.

Palabras clave: Calidad de las aguas pluviales urbanas, características de la cuenca, calidad del agua, características de la lluvia, lavado de contaminantes.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	8
2	OBJETIVOS DEL PROYECTO	11
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	11
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	11
3.2	IMPACTOS DE LA URBANIZACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO	12
3.3	AGUAS DE ESCORRENTÍA	13
3.4	CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA	14
3.4.1	Fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía.....	14
3.4.2	Factores determinantes en la contaminación de las aguas de escorrentía	15
3.4.3	Transporte de contaminantes	17
3.4.4	Posibles contaminantes transportados por las aguas de escorrentía	17
3.5	IMPACTO DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA CONTAMINADAS EN LOS CUERPOS DE AGUA	19
4	ZONA DE ESTUDIO.....	19
5	METODOLOGÍA.....	21
5.1	FASE PRELIMINAR	21
5.2	FASE DE MUESTREO	25
5.3	FASE DE ANÁLISIS	27
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
6.1	CALIDAD DE AGUA DE ESCORRENTÍA	29
6.1.1	Variación de los parámetros a lo largo del muestreo, entre usos del suelo	29
6.1.2	Análisis de relaciones entre variables de calidad	31
6.1.3	Comportamiento de la calidad de agua, en relación con las fuentes y eventos de precipitación	32
6.2	SÍNTESIS CONCEPTUAL DEL IMPACTO DEL USO DEL SUELO URBANO EN LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	38
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
8	BIBLIOGRAFÍA.....	44

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama del ciclo hidrológico	11
Figura 2. Impactos de la urbanización en el ciclo del agua	13
Figura 3. Relación entre la escorrentía y la impermeabilidad de la superficie del suelo.....	14
Figura 4. Precipitación y variación de las diferentes cargas analizadas en la superficie de las vías en una cuenca urbana	16
Figura 5. Localización general de la microcuenca Altavista	20
Figura 6. Zonas de interés para la selección del sitio de muestreo	23
Figura 7. Metodología desarrollada.....	28
Figura 8. Matriz de correlaciones	31
Figura 9. Porcentaje de varianza explicada	33
Figura 10. Biplot PCA.....	34
Figura 11. Análisis de clúster	36
Figura 12. Procesos que se presentan en el agua lluvia y de escorrentía antes de su descarga en los cuerpos de agua superficial de acuerdo con los diferentes factores que condicionan la partición, el almacenamiento y el transporte del agua en la superficie terrestre	39

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Jerarquía de las geoformas principales.....	22
Tabla 2. Usos del suelo urbano en la microcuenca de la quebrada Altavista.....	22
Tabla 3. Estaciones meteorológicas SIATA	25
Tabla 4. Métodos de referencia para el análisis de las muestras obtenidas	27
Tabla 5. Resumen estadístico de las variables fisicoquímicas analizadas	29
Tabla 6. Pesos de las variables en los componentes del PCA.....	33
Tabla 7. Resultados de muestreo fisicoquímico sobre la quebrada Altavista	40
Tabla 8. Objetivos de calidad del agua para el río Aburrá Medellín a la altura de la estación Aula Ambiental.....	40

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Puntos de muestreo en zona verde urbana	24
Fotografía 2. Puntos de muestreo en zona residencial	24
Fotografía 3. Puntos de muestreo en zona industrial	25
Fotografía 4. Montaje para la recolección de muestras en los sumideros	26
Fotografía 5. Vertimiento de pintura identificado en uso de suelo residencial	35

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los procesos de urbanización se constituyen como una tendencia a nivel mundial, pues se espera que para el año 2030 aproximadamente el 60% de la población viva en ciudades, lo cual implica una mayor urbanización del territorio (Braud et al., 2013). A medida que la población mundial sigue creciendo a un ritmo acelerado, la expansión de las zonas urbanas plantea una importante amenaza a la dinámica natural; la disponibilidad de recursos y la calidad del medio ambiente (McGrane, 2016). Esto cobra importancia debido a que la degradación del suelo se ha visto intensamente acelerada como consecuencia del crecimiento de las zonas urbanas (Trujillo et al., 2016), pues dicha urbanización además de la fragmentación del hábitat, genera diferentes impactos en el ciclo del agua (Torres, 2004), al dar lugar a la expansión de redes de drenaje artificial que alteran la forma en la cual la precipitación se traduce en escorrentía y, por ende, la eficacia del drenaje de la superficie durante los episodios de lluvia (McGrane, 2016).

De esta manera, cambios en el uso del suelo generados por el crecimiento urbano conllevan a una alteración en las propiedades bioquímicas y físicas de los sistemas hidrológicos en las cuencas (Jacobson, 2011), dando como resultado un mayor volumen de escorrentía superficial, mayores pérdidas de infiltración, ocasionando una disminución en la recarga de agua subterránea y una modificación de las vías naturales de agua debido a las redes artificiales (Braud et al., 2013); asimismo, conlleva a una respuesta mucho más rápida de la cuenca que se traduce en una reducción de los tiempos de concentración en la misma (Burns et al., 2005), factores que tienden a causar pérdidas en cuanto a los usos potenciales del agua (Torres, 2004).

Asimismo, los cambios generados en las características químicas de los sistemas hidrológicos superficiales y subterráneos de zonas urbanas y periurbanas se han relacionado con el efecto que tienen las fuentes de contaminación asociadas con las actividades propias de estos sistemas (Jacobson, 2011). En estos sistemas, las vías o superficies impermeables actúan como sumideros de una gran cantidad de elementos entre ellos metales pesados y nutrientes (McGrane, 2016), que se generan por diversas fuentes como son los frenos de los automóviles, residuos de poda, materiales de pavimento, y transportadas en la escorrentía superficial, ocasionando así afectaciones sobre la calidad del agua de las fuentes superficiales. De esta manera, la contaminación de las aguas pluviales urbanas contribuye significativamente a las cargas contaminantes en las aguas receptoras, convirtiéndose así en un objetivo prioritario de estudio y gestión (Brown et al., 2019).

Durante los últimos años, en diversas partes del mundo, se han desarrollado estudios que buscan identificar fuentes concretas de contaminación o grupos determinados de contaminantes que puedan estar presentes en las aguas de escorrentía en zonas urbanas de acuerdo con el uso del suelo en el territorio, así como la influencia de las diferentes características de la lluvia en la concentración de los mismos. Específicamente, se destacan investigaciones realizadas en grandes urbes de China, Corea del Sur, Estados Unidos y algunos países de la Unión Europea, que, en general resaltan cómo la intensidad de la lluvia en la fase inicial de un evento de precipitación es crítica para la magnitud de la primera descarga, entendida como la fase inicial de un evento de escorrentía en el cual se presentan concentraciones considerablemente más altas de contaminantes en relación con la última etapa de dicho evento (Maniquiz et al., 2022). Asimismo, la duración de las lluvias y la duración del período seco anterior (frecuencia de la precipitación) afectan el lavado de la carga contaminante durante las fases intermedia y final de un evento de lluvias (Zhang et al., 2015).

Existen múltiples factores que pueden condicionar los compuestos que se generan y depositan sobre las superficies; particularmente, la impermeabilidad y la densidad poblacional han sido consideradas como factores clave para la selección de los sitios de estudio puesto que están directamente relacionadas con el incremento en la concentración de los contaminantes presentes en las aguas de escorrentía urbana. Asimismo, dichos estudios han permitido clasificar las diferentes fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía e identificar al transporte vehicular (Revitt et al., 2022) y la deposición atmosférica como las principales fuentes de contaminación de las aguas pluviales urbanas (Müller et al., 2019).

Por consiguiente, algunos estudios han buscado desarrollar mecanismos o modelos estadísticos para simular los procesos de transporte y el intercambio de masa entre la escorrentía y la superficie del suelo, con el fin de predecir las cargas de contaminantes de la escorrentía en las vías. Para esto, se incorporan variables como parámetros de calidad del agua, tomados de las bases de datos de contaminantes identificados en los muestreos de lluvias monitoreados (Kayhanian et al., 2007); las características del tráfico, entre las cuales se encuentran factores como la densidad de vehículos, la velocidad y el tipo de combustible; además de la intensidad del evento de lluvia y el período de tiempo seco antecedente (Mooselu et al., 2022). Encontrando que, aunque es complejo determinar la carga contaminante debido a la cantidad de interacciones que se presentan entre los compuestos depositados sobre la superficie, las concentraciones pronosticadas de los principales contaminantes de las aguas de escorrentía, se encuentran dentro del rango de las concentraciones reportadas en la literatura (Al Masum et al., 2022). Por tal motivo, este enfoque de modelación ha permitido a su vez estimar el impacto que podría tener la implementación de tecnologías limpias, como es el caso de la reducción gradual de vehículos con motor de gasolina y diésel por vehículos eléctricos, en la deposición de elementos sobre la superficie de la vía, identificando disminuciones de hasta el 13.1% en la concentración de metales pesados y sólidos suspendidos totales (Revitt et al., 2022).

En relación a los posibles contaminantes encontrados en las aguas de escorrentía, los estudios realizados han documentado la presencia, principalmente, de sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total (PT), carbono orgánico disuelto (COD), nitrógeno total (NT), pH, metales pesados como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn (Müller et al., 2019), además de la demanda biológica de oxígeno (DBO) o demanda química de oxígeno (DQO). En estos estudios se ha identificado a los SST como la principal variable de interés debido a su facilidad de medición y a su asociación con el lavado de partículas depositadas sobre la superficie. De igual manera, se ha reportado el análisis de diferentes formas de nitrógeno (tales como nitratos (NO_3^-), amoníaco (NH_3), nitrógeno total Kjeldahl (NTK)), encontrando que la magnitud de la contaminación se encuentra relacionada con la magnitud de la intervención antrópica en la cuenca, el caudal y las características de la precipitación (Maniquiz et al., 2022). Sin embargo, se han observado grandes variaciones en la calidad de las aguas de escorrentía urbana, tanto en el tiempo como en el espacio (Butler et al., 2018), relacionado con la ubicación geográfica y las características climáticas del sitio en estudio, además de los contaminantes particulares de interés (Maniquiz et al., 2022). Esto, sumado a las emisiones continuas de nuevos elementos químicos y a la descarga de contaminantes emergentes potencialmente peligrosos para las comunidades y el medio ambiente, resaltan la necesidad de mejorar la descripción de fuentes de contaminación (Müller et al., 2019).

Los procesos de urbanización se encuentran relacionados con diversos factores que de cierta manera caracterizan la dinámica poblacional del país, puesto que el grado de urbanización no solo hace referencia a la proporción de población que habita en áreas urbanas, sino que también está determinada por el grado de densidad poblacional que estas albergan. En Colombia la

urbanización, entendida como el aumento de la proporción urbana frente al total de la población, se manifiesta de diversas maneras y adopta diferentes matices ofreciendo un panorama de alta complejidad (Ruíz et al., 2007). En los últimos años, se ha visto cómo en el país el proceso de urbanización ha incrementado significativamente, puesto que el porcentaje de la población que vive en zonas urbanas, de acuerdo con el Banco Mundial, aumentó del 40% en 1960 al 80% en 2018, establecido así nuevas presiones sobre los ecosistemas (Vélez, 2020).

Concretamente, la zona de interés para este estudio corresponde a la subregión del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la cual está localizada en el centro del departamento de Antioquia y se encuentra conformada por los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y Caldas, los cuales representan el 1.8% del área departamental (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007). De acuerdo con el censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), durante el 2018, la cantidad total de habitantes en la subregión del Valle de Aburrá corresponde a 3.726.219 personas, mientras que en 2005 ésta fue de 3.316.358 habitantes (Departamento Nacional de Estadística, 2019), comportamiento que agrava la situación de la cuenca debido a que las diferentes quebradas afluentes al río Aburrá – Medellín, han sufrido serias alteraciones, tanto en los entornos naturales del canal como en el de la cuenca, cambios asociados con el asentamiento de las personas y el desarrollo de actividades económicas, residenciales, industriales y comerciales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018a).

Una de las principales problemáticas a las que se enfrenta la gestión del recurso hídrico en el Valle de Aburrá, es el bajo conocimiento que se tiene del impacto de las aguas lluvia y de escorrentía en la calidad y cantidad de las fuentes de agua superficial, con base en la dinámica de las actividades antrópicas que se desarrollan en el territorio, especialmente en la zona urbana (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia, 2018); puesto que concentra el 60% de la población del departamento y en ella se localiza el 69% de las unidades productivas de Antioquia (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018a), actividades que han incrementado la demanda de recursos y la generación de múltiples contaminantes.

Asimismo, es importante considerar las variaciones en la calidad de las aguas de escorrentía de acuerdo con las características de la lluvia (Zhang et al., 2020), las cuales, junto con las condiciones topográficas y la naturaleza del desarrollo urbano en el Valle de Aburrá, aportan una diversidad de contaminantes a las aguas lluvias y de escorrentía, y posiblemente a los cuerpos de agua. De esta manera, con el fin de estudiar y entender los mecanismos mediante los cuales las aguas lluvia y de escorrentía impactan las aguas receptoras, el presente estudio busca identificar cómo cambia la concentración de los principales contaminantes de las aguas pluviales con base en el uso del suelo urbano, elemento fundamental para el diseño de estrategias que busquen realizar una adecuada gestión del recurso hídrico y garantizar la seguridad hídrica en la cuenca.

2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto potencial de las aguas de escorrentía urbana en la calidad fisicoquímica de los cuerpos de agua superficial, tomando como caso de estudio la microcuenca de la quebrada Altavista.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las diferencias entre la calidad del agua de escorrentía superficial dependiendo del uso del suelo urbano en el territorio.
- Determinar la influencia de las características de la precipitación (intensidad, frecuencia y calidad) sobre la composición de aguas de escorrentía urbana.
- Estimar, conceptualmente, el impacto potencial del vertimiento de las aguas de escorrentía urbana en la calidad fisicoquímica de una fuente de agua superficial.

3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, representa el proceso continuo de la circulación y transformación del agua en sus diversos estados en la esfera terrestre, los cuales se dan de forma continua (Figura 1). Su dinámica se encuentra determinada por las condiciones de la radiación solar, la acción de la gravedad y las interacciones de las capas superiores de la tierra: atmósfera, litosfera y biósfera (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010).

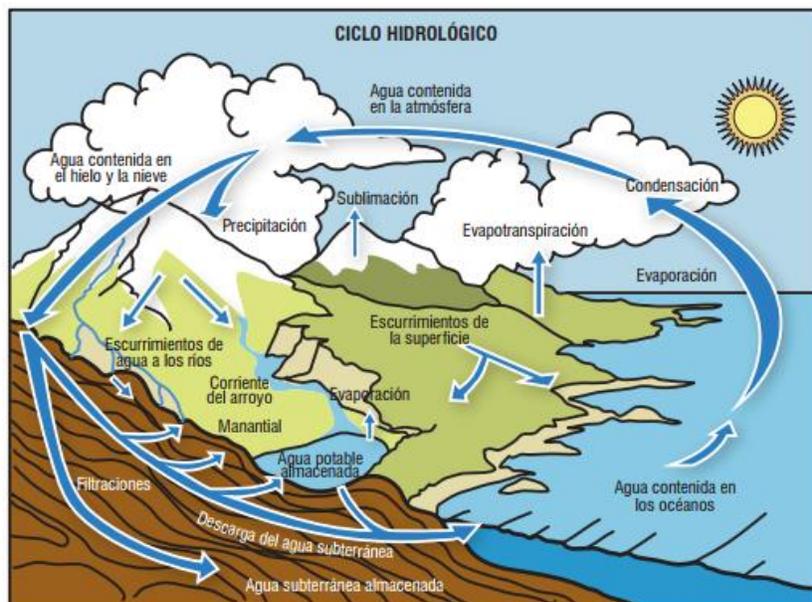


Figura 1. Diagrama del ciclo hidrológico

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010

Esta compleja interacción entre la atmósfera y los diferentes procesos superficiales y subsuperficiales afecta el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en las diferentes unidades hidrográficas. Por ello, los componentes del ciclo hidrológico difieren en sus características químicas, bioquímicas, variabilidad espacial y temporal, resiliencia, vulnerabilidad a la presión donde se incluyen usos del suelo y cambio climático, susceptibilidad a la contaminación y capacidad de proveer servicios ambientales apropiados para ser utilizados en forma sostenible (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010).

Factores como la geografía y morfología de la cuenca tienen un papel fundamental en la transferencia de agua; por ejemplo, las variaciones de pendiente, la forma de las vertientes y su longitud, controlan la velocidad de transferencia. Componentes biológicos como la vegetación, los usos del suelo intervienen en la variabilidad espacial y temporal de las propiedades hidrológicas de la cuenca (Palleiro, 2016). Asimismo, la permeabilidad cobra un papel importante en este tipo de estudios, principalmente en entornos urbanos debido a la impermeabilización del territorio (Leal & Ossa, 2015), lo cual genera alteraciones en el ciclo hidrológico, pues durante un evento de lluvia, aumenta la escorrentía superficial y disminuye el volumen de agua infiltrada (Zgheib et al., 2008).

De esta manera, las modificaciones en las características del suelo condicionan la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación, pues cambia la forma en la cual dicho ecosistema distribuye, almacena, transmite y libera los flujos de agua (García et al., 2018), además de generar una respuesta más rápida en la cuenca, lo cual conlleva a una mayor magnitud en el caudal de las fuentes de agua y a una mayor recurrencia de inundaciones en las zonas aledañas a estas (Miller et al., 2014).

3.2 IMPACTOS DE LA URBANIZACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO

La urbanización trae consigo una serie de desafíos ambientales para el medio ambiente local, regional y en general, pues además de la fragmentación del hábitat, genera una alteración en las propiedades bioquímicas y físicas de los sistemas hidrológicos en las cuencas (Jacobson, 2011). Debido por ejemplo a que la pérdida de superficies permeables reduce la infiltración en el suelo, se presenta un efecto considerable en la respuesta hidrológica de un área a las precipitaciones, ocasionando una respuesta más rápida de la cuenca, pues hay un mayor volumen de escorrentía superficial, una mayor magnitud del caudal de los ríos, una mayor recurrencia de pequeñas inundaciones y un menor flujo de base pues hay una menor recarga de aguas subterráneas (Burns et al., 2005).

Como se observa en la Figura 2, la creciente urbanización resulta en un aumento del paisaje impermeable y en la expansión de las redes de drenaje artificial que pueden facilitar cambios dramáticos en la magnitud y las vías de la escorrentía en una variedad de escalas (McGrane, 2016). Asimismo, la permeabilidad genera alteraciones en el ciclo hidrológico natural puesto que convierte un mayor porcentaje de la precipitación en escorrentía (Leal & Ossa, 2015), aumentando la cantidad de inundaciones en determinado territorio. De esta manera, los impactos que genera la urbanización en el ciclo del agua tienden a disminuir los usos potenciales del agua.

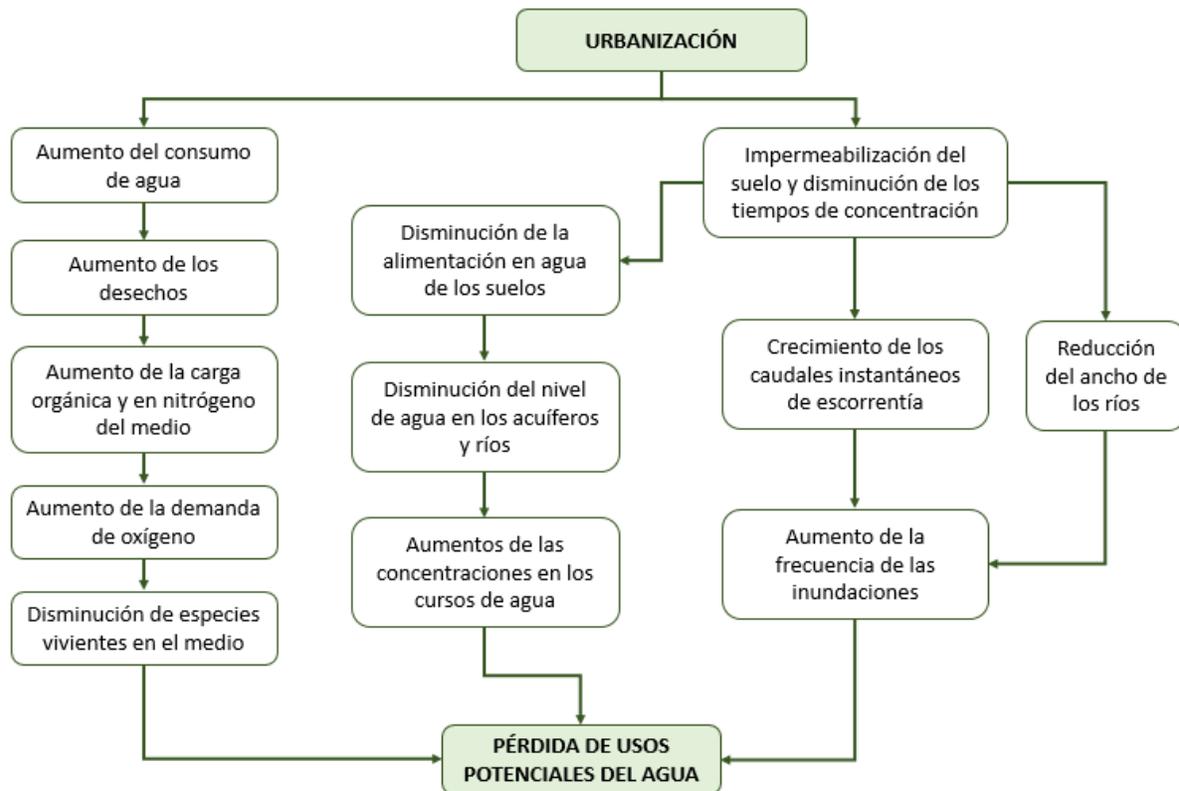


Figura 2. Impactos de la urbanización en el ciclo del agua

Fuente: Torres, 2004

3.3 AGUAS DE ESCORRENTÍA

La escorrentía superficial corresponde a la precipitación que transita sobre la superficie del terreno, para finalmente descargar en los cuerpos de agua superficial. Esta se genera cuando la cantidad (intensidad) de lluvia es tal que sobrepasa la capacidad de almacenamiento (infiltración) en el suelo, de modo que se almacena en las diferentes depresiones del terreno, una vez estas se llenan, se genera entonces la escorrentía (Palleiro, 2016).

Como se mencionó anteriormente, el comportamiento hidrológico de una cuenca está determinado por factores meteorológicos geológicos, geomorfológicos y antrópicos. Dentro de los factores meteorológicos, se destacan la precipitación y la temperatura, puesto que la intensidad, duración y distribución espacial de la lluvia determinan la respuesta hidrológica de la cuenca y la temperatura define la cantidad de agua que se evapora. Entre los factores geomorfológicos se destaca la pendiente, y dentro de los geológicos el material parental y la profundidad del nivel freático en la zona de estudio (Palleiro, 2016). Además, estos factores, en combinación con la intensidad y prácticas de uso de suelo determinan la permeabilidad que está directamente asociada con la generación de escorrentía (Figura 3).

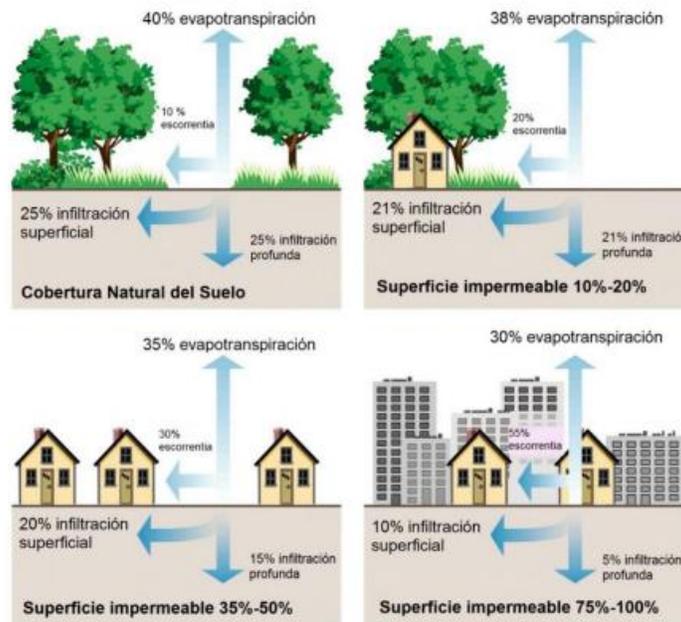


Figura 3. Relación entre la escorrentía y la impermeabilidad de la superficie del suelo

Fuente: Leal & Ossa, 2015

3.4 CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA

La acumulación de contaminantes sobre la superficie está determinada no sólo por las características de la cuenca, donde se incluyen factores convencionales como el uso de la tierra y la fracción de área impermeable, sino también, y de manera importante, por condiciones particulares del sitio como la forma urbana y la conformación de dicha zona impermeable (Liu et al., 2013). De esta manera, se han desarrollado diversos estudios para comprender los procesos de contaminación de las aguas de escorrentía y minimizar el impacto de estas al medio ambiente. A continuación, se describen de forma particular los hallazgos relacionados con las principales fuentes y factores de contaminación de las aguas de escorrentía superficial.

3.4.1 Fuentes de contaminación de las aguas de escorrentía

3.4.1.1 Vehículos

Como importantes fuentes contaminantes relacionados con el tránsito de vehículos se encuentran principalmente aquellos que emplean combustibles basados en hidrocarburos (Revitt et al., 2022) y aceites de motores, donde se pueden identificar en concentraciones significativas metales como el Cadmio, Cromo, Plomo, Cobre, Níquel y Zinc, entre otros elementos que no son muy estudiados, tales como Aluminio, Bromo, Calcio, Hierro, Magnesio, Manganeso y Sodio, entre otros metales pesados (Jiménez, 2015).

Específicamente, se ha identificado que los frenos de los vehículos constituyen una fuente significativa de emisiones, en donde las partículas de desgaste de los frenos son incorporadas a la atmósfera y posteriormente depositadas sobre la superficie de las vías, lo cual cobra importancia puesto que las pastillas de los frenos aportan alrededor del 57% del Cobre total

depositado en la superficie de las vías (Revitt et al., 2022). Por su parte, la concentración de Plomo, se ha relacionado con la eliminación gradual de la gasolina, mientras que el Zinc es liberado por el desgaste de los neumáticos, aportando casi el 30% del Zinc en grandes cuerpos de agua (Hwang et al., 2016). Finalmente, se ha reportado que el Cadmio en zonas urbanas, por ejemplo, proviene de residuos de procesos industriales, desgaste de neumáticos y residuos de combustión (Torres, 2004).

Adicionalmente, el agua lluvia o el viento pueden generar un desprendimiento del polvo presente en las cubiertas exteriores, los óxidos de la carrocería y del chasis, la suciedad de las piezas del motor y las partículas de la pintura y el recubrimiento de los vehículos y sus partes, por lo que estos se pueden depositar sobre la superficie de las vías contribuyendo así a la contaminación de las aguas de escorrentía (Jiménez, 2015).

3.4.1.2 Estructuras sobre la plataforma de vía

Dentro de las estructuras más comunes en ambientes urbanos se encuentran estructuras como las barreras de seguridad, esculturas, etc., las cuales son elaboradas en una amplia gama de elementos. De forma particular, se ha documentado que cuando se corroen liberan una gran cantidad de metales, especialmente Cobre, Zinc, Plomo y Cadmio, los cuales se concentran en la superficie de las aceras y vías (Müller et al., 2022). Específicamente, se ha identificado que la mayor contribución de Zinc se asocia con la presencia de superficies metálicas galvanizadas (Hwang et al., 2016).

3.4.1.3 Deposiciones atmosféricas

La contaminación aportada por este medio depende principalmente de los usos del suelo, por lo cual esta es particularmente importante en zonas urbanas, las cuales debido a sus múltiples dinámicas pueden presentar numerosas fuentes de emisión de contaminantes y una alta probabilidad de lavado y/o transporte de compuestos relacionada con la presencia de áreas impermeables en extensiones considerables (Pandey & Raghubanshi, 2022). De forma particular, evaluar la magnitud de la contaminación generada por la deposición atmosférica presenta fuertes limitaciones puesto además de las reacciones químicas que se generan entre los compuestos, incluye fuentes de contaminación ubicadas por fuera de la cuenca de estudio y que contribuyen a través del transporte atmosférico de largo alcance (Müller et al., 2022).

3.4.2 Factores determinantes en la contaminación de las aguas de escorrentía

Las fuentes de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía vial se encuentran determinadas por diversos factores que guardan una compleja serie de interacciones. A continuación, se describen algunos de los factores que determinan la carga contaminante presente en la superficie de las vías vehiculares.

3.4.2.1 Densidad vehicular

Se ha encontrado una variabilidad en la carga y la composición del material que se deposita sobre la superficie, debido a que su presencia depende también de factores como la densidad vehicular y la contaminación, entre otros; donde se incluyen variables tales como escapes, fugas de fluidos automotrices, desgaste y lavado de los vehículos, así como la abrasión de las carreteras y la densidad del flujo vehicular, creando una compleja mezcla de contaminantes (Müller et al., 2022),

condicionando las reacciones e interacciones que se dan entre estos, ocasionando así que dos eventos de acumulación de partículas consecutivos puedan mostrar patrones diferentes, variando la calidad de las aguas de escorrentía en una cuenca en un momento determinado (Wijesiri et al., 2016).

3.4.2.2 Tiempo seco precedente

En múltiples estudios se han reportado que las concentraciones de contaminantes en la escorrentía de aguas pluviales incrementan a medida que aumenta el período seco antecedente entre dos eventos de precipitación, puesto que durante este los materiales son continuamente arrastrados (por factores como el viento y las corrientes de aire inducidas por el tráfico) y depositados sobre la superficie del suelo (Jiménez, 2015) quedando disponibles para ser lavados en un próximo evento de precipitación (Kayhanian et al., 2012). En tiempo húmedo, por el contrario, las precipitaciones de agua lavan y arrastran con mayor frecuencia los contaminantes que se encuentran sobre la superficie del suelo (Suescún et al., 2017).. Aunque se cree que el principal método de remoción de los contaminantes acumulados en la superficie es el transporte físico, es importante considerar que también se produce una eliminación química y/o biológica, como lo son la volatilización, biodegradación, degradación química y fotoquímica (Jiménez, 2015)

De esta manera, la naturaleza del evento de precipitación es particularmente de interés debido a que condiciona el lavado del material depositado sobre la superficie pues constituye el punto de recarga de contaminantes (Zhang et al., 2015). Particularmente se han evidenciado concentraciones hasta un 20% mayores en la parte inicial de un evento de precipitación en comparación con el final de la temporada de lluvias (Simpson et al., 2022). Este comportamiento se observa en la Figura 4, donde se muestra un claro aumento de la carga total superficial a medida que incrementan los días de tiempo seco precedente.

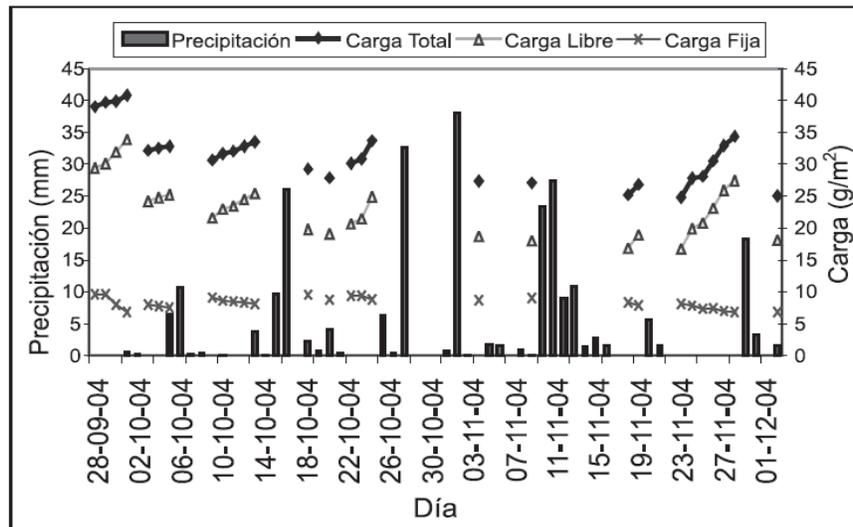


Figura 4. Precipitación y variación de las diferentes cargas analizadas en la superficie de las vías en una cuenca urbana

Fuente: Zafra et al., 2007

3.4.2.3 Características de los eventos de precipitación

La naturaleza del evento de precipitación determina el lavado del material que se encuentra en la superficie, además del punto de partida para la recarga de contaminantes durante el tiempo seco precedente. La frecuencia de dichos eventos cobra importancia pues al ser muy frecuentes eliminan una pequeña fracción de la carga contaminante acumulada. La lluvia y las aguas de escorrentía disgregan y disuelven parte de los contaminantes que no se llegan a eliminar en la superficie y que quedan disponibles para ser lavados en el siguiente evento de precipitación (Jiménez, 2015).

3.4.2.4 Factores climáticos

En este ítem se consideran variables como la temperatura, humedad, el viento y la luz solar, las cuales pueden determinar la interacción y la transformación de los compuestos depositados en la superficie, al condicionar procesos tales como la volatilización y la fotodegradación. Asimismo, los patrones y características del viento, como el caso de la velocidad, pueden tener correlaciones significativas con la acumulación de contaminantes (Simpson et al., 2022).

3.4.2.5 Características de la vía

Las características específicas del lugar de estudio pueden afectar la cantidad y calidad de las aguas de escorrentía urbana, por ejemplo, el material y el estado de las vías son factores determinantes en la composición y la concentración de los diferentes compuestos que se encuentran depositados en éstas (Mooselu et al., 2022). El deterioro del pavimento, por ejemplo, puede aumentar la carga contaminante, debido a que las características de la vía y el tamaño de las partículas condicionan la velocidad con la cual la lluvia lava el material acumulado sobre la superficie (Zafra et al., 2007).

3.4.3 Transporte de contaminantes

Existen dos mecanismos que determinan de forma simultánea en el transporte de sedimentos durante los eventos de precipitación generados. El primer mecanismo consiste en que el material sedimentado es disgregado por el impacto del agua lluvia que cae sobre la superficie, mientras que el segundo caso el material se encuentra diluido y las gotas de lluvia generan turbulencia lo que favorece la mezcla y brinda un aporte continuo de disolvente limpio (Estupiñán, 2009).

3.4.4 Posibles contaminantes transportados por las aguas de escorrentía

3.4.4.1 Metales pesados

Los metales pesados predominantes en las vías son el Zinc y el Plomo; sin embargo, se puede encontrar Hierro, Níquel, Cobre, Mercurio, Cromo y Cadmio (Zgheib et al., 2011), sustancias de interés prioritario definidas por la Directiva Marco europea del Agua (DMA), y que cobran particular interés debido a que el funcionamiento diario de los vehículos libera una gran variedad de contaminantes, como subproductos de la combustión que contaminan considerablemente no solo el aire, sino también el suelo y el agua (Hwang et al., 2016); situación que ha catalogado las aguas de escorrentía como una fuente importante de metales pesados a los cuerpos de agua en zonas urbanas (Barbosa et al., 2012).

3.4.4.2 Nutrientes

En términos de calidad, los más importantes son nitrógeno y fósforo, estos son de importancia puesto que generan problemas de eutrofización. Las principales fuentes de nutrientes la constituyen los fertilizantes en zonas rurales, mientras que en zonas urbanas las principales fuentes son la deposición atmosférica, los desechos de animales, la materia orgánica y los combustibles fósiles (Buitrago, 2011).

3.4.4.3 Sólidos suspendidos

Son el principal contaminante de las aguas de escorrentía, de forma particular, las partículas más finas, pues suelen ocupar la mayor parte del total de los sólidos suspendidos. La alta capacidad de adsorción de dichas partículas se relaciona con la facilidad que tienen dichos compuestos, para el intercambio de cationes, su capacidad para atrapar moléculas orgánicas polares y su afinidad por algunos metales (Jiménez, 2015).

3.4.4.4 Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's) son compuestos orgánicos caracterizados por presentar núcleos bencénicos, son relativamente estables. Dichos compuestos provienen principalmente de la combustión incompleta del carbón, petróleo y gasolina, basuras y otras sustancias orgánicas; se incorporan a la atmósfera esencialmente por incendios forestales, combustión del carbón y del escape de automóviles, adhiriéndose a partículas de polvo (Torres, 2004).

3.4.4.5 Variables microbiológicas

Debido a la contaminación generada por las heces de animales, como perros y gatos, de habitantes de calle, a la mala conexión de aguas usadas, a la respuesta en suspensión de los depósitos de los sumideros, a los sólidos de las calzadas y a los despojos vegetales, es necesario determinar la cantidad de Coliformes Fecales (CF) y Estreptococos Fecales (EF) pues a partir de su relación CF/EF es posible identificar el origen de la contaminación (Torres, 2004).

De esta manera, las fuentes de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía vial, se encuentran determinadas por diversos factores que guardan una compleja serie de interacciones (Egodawatta et al., 2009). El estudio de la calidad de las fuentes de agua particularmente en zonas urbanas presenta diversos retos asociados principalmente a los efectos de la densificación y expansión urbana, la distribución de la población, los cambios regionales en las características de la precipitación además de la incorporación de la no estacionalidad, dada la limitación que tienen los modelos para representar de forma adecuada la complejidad de las interacciones en los ecosistemas, particularmente si se tienen en cuenta las respuestas desconocidas del sistema al cambio climático y la urbanización, junto con las amenazas que plantean los nuevos contaminantes y la contaminación urbana (Miller & Hutchins, 2017).

3.5 IMPACTO DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA CONTAMINADAS EN LOS CUERPOS DE AGUA

Los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos generan una serie de modificaciones físicas y químicas en los ecosistemas acuáticos, las cuales determinan la distribución y la composición de las comunidades de microorganismos que allí habitan (Roldán & Ramírez, 2008). En las aguas de escorrentía se han encontrado altas cargas de DBO, sólidos suspendidos, nutrientes, metales, petróleo y otros compuestos derivados de este. Las diferentes formas de sólidos indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico o inorgánico. Entre el grupo de nutrientes, los principales elementos para la productividad primaria son el fósforo y el nitrógeno, estos pueden generar problemas de eutrofización en los cuerpos de agua, especialmente el fósforo, y reducir así la concentración de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua (Sierra, 2011).

Los metales pueden acumularse en los sedimentos, fitoplancton, organismos bentónicos y peces, su toxicidad puede reducir la diversidad y abundancia de la biota acuática sensible, favoreciendo su sustitución por especies tolerantes a la contaminación. Su impacto depende de la forma en la cual están presentes, de las propiedades físicas y químicas de las masas de agua receptoras (Jiménez, 2015). Es así como un metal absorbido sobre partículas sólidas puede, como respuesta a variaciones en las condiciones de pH y de oxidorreducción, ser liberado bajo una forma soluble más tóxica para el medio natural (Torres, 2004). Los metales no se biodegradan y generalmente se presentan en formas inmóviles, por lo que tienen una alta persistencia en el ambiente. Adicionalmente, la presencia de metales puede ocasionar implicaciones negativas para el funcionamiento de los organismos, lo que reduce la flora y fauna, y al ser bioacumulables afecta toda la cadena trófica (Taka, 2022).

Los compuestos orgánicos biodegradables pueden estimular el crecimiento de las bacterias en las aguas receptoras, aquellos que son tóxicos pueden ser perjudiciales para la vida acuática. La presencia de MTBE debido a su alta solubilidad en el agua, baja volatilidad, bajo potencial de adsorción a los sedimentos o a cualquier otro material orgánico es de gran importancia; en los ecosistemas acuáticos puede degradarse hasta CO₂ bajo condiciones aerobias, sin embargo, su biodegradación es limitada por la cinética de crecimiento de las bacterias y su escasez en el medio. Una fracción de las partículas que se encuentran depositadas en la superficie es de naturaleza inorgánica no reactiva por lo que sólo incrementa la turbiedad y las cargas de sólidos movilizadas, sin embargo, otras sí pueden interactuar elevando la demanda de oxígeno, la carga de nutrientes o metales pesados y la toxicidad por los pesticidas (Jiménez, 2015).

El principal contaminante de las aguas de escorrentía son los sólidos suspendidos, puesto que las fracciones finas transportan una serie de contaminantes, producen un aumento significativo en la turbiedad de los cuerpos de agua, lo cual genera un impacto visual negativo. Las fuentes principales de sólidos en dichas aguas se encuentran conformadas principalmente por las partículas que son depositadas en la superficie del terreno (Buitrago, 2011).

4 ZONA DE ESTUDIO

El Valle de Aburrá, es una de las subregiones más pobladas del país, se encuentra localizada en la zona centro-sur del departamento de Antioquia, Colombia, en medio de la Cordillera Central de los Andes. La subregión cuenta con un área de 1.152 km², los cuales representan el 1.8% del territorio departamental. Es una depresión profunda y alargada de 60 Kilómetros de Sur a Norte,

con alturas, en el fondo del valle, que van desde 1800 m.s.n.m. en Caldas (al Sur) y los 1400 m.s.n.m. en Barbosa (al Norte), hasta los 2600 metros de altura promedio de las montañas y los altiplanos que definen parte de sus límites (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia, 2011), con alturas por encima de los 3000 m.s.n.m. en su divisoria. Está enmarcado por una topografía pendiente e irregular; las cordilleras que lo encierran dan lugar a la formación de diversos microclimas, saltos de agua, bosques, sitios de gran valor paisajístico y ecológico (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2010).

El río Aburrá - Medellín es un eje articulador de todos los municipios que conforman el Valle de Aburrá, a él desembocan más de 200 quebradas de diferente magnitud, pero con algunas características similares. En la parte central más urbanizada, existen alrededor de 60 quebradas, cada una de las cuales sirve a una comunidad con diversas actividades como las económicas, la residencial, la industrial y el comercio, razón por la cual, el río Aburrá-Medellín se presenta como un ecosistema altamente intervenido donde su recuperación y protección no obedece solamente a factores ambientales, sino que también se imponen aspectos económicos sociales, culturales, entre otros (Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia, 2011).

De forma particular, la microcuenca de la quebrada Altavista se encuentra al suroccidente del municipio de Medellín, ubicado en la zona centro de la subregión. Su punto más alto se localiza a los 2340 m.s.n.m. entregando finalmente sus aguas sobre la margen izquierda del Río Aburrá-Medellín a una altura de 1488 m.s.n.m. (Alcaldía de Medellín & Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2007). Por otra parte, la longitud del cauce equivale a 10.86 km, mientras que el área total de la microcuenca es de 24.15 km², de los cuales el 64% corresponde a un uso rural y el otro 36% a un uso del suelo urbano (Alcaldía de Medellín & Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2007). En la Figura 5 se puede observar la localización general de la microcuenca en estudio.

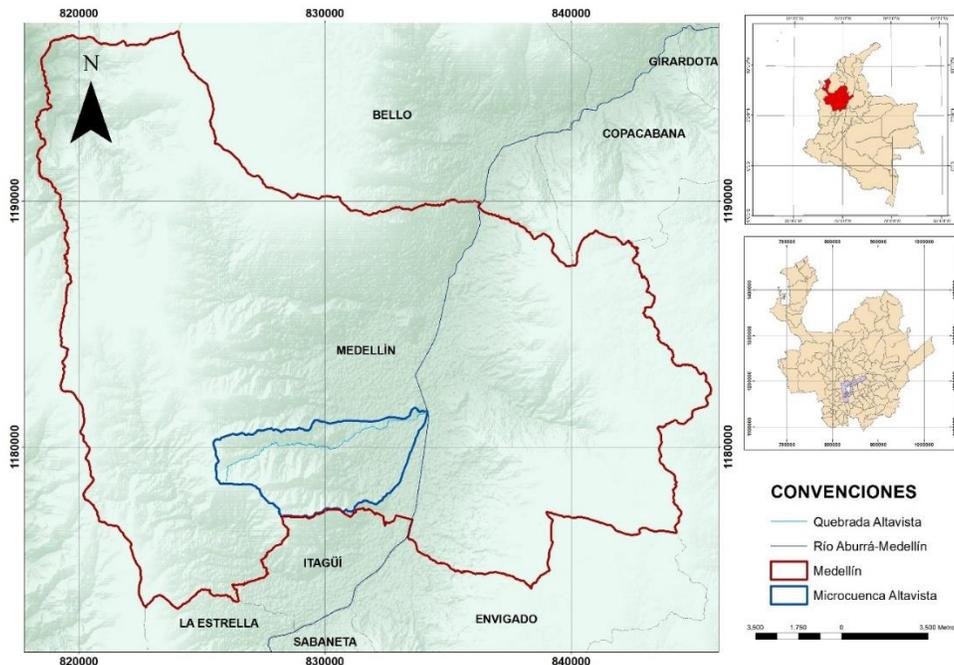


Figura 5. Localización general de la microcuenca Altavista

La parte alta de la cuenca se caracteriza por tener una densidad poblacional baja, allí se observan las mayores pendientes del terreno y se conservan las coberturas vegetales protectoras, en esta zona de la microcuenca se presentan principalmente actividades como la ganadería extensiva, plantaciones forestales y algunos cultivos. En el tramo medio por su parte se comienza a identificar un incremento en la densidad poblacional, especialmente a lo largo de la quebrada Altavista, manteniéndose despobladas las áreas colinadas. En cuanto a las actividades económicas que se desarrollan en la zona, es posible encontrar la minería especialmente por empresas ladrilleras y algunas pocas fracciones de cultivos transitorios, las coberturas vegetales predominantes son pastos naturales arbolados y enmalezados, dedicados a una actividad ganadera poco especializada (Alcaldía de Medellín & Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2007).

Finalmente, el tramo bajo corresponde a la zona urbana de la cuenca, en esta zona se presentan las máximas densidades poblaciones y las bajas pendientes; adicionalmente, esta cuenta con una zona de uso industrial, lo cual sumado a la canalización total de la quebrada Altavista modifica considerablemente las características naturales del cauce (Alcaldía de Medellín & Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, 2007). De esta manera, la microcuenca de la quebrada Altavista, especialmente en la parte baja, presenta múltiples problemáticas, entre las que predominan el manejo inadecuado de vertimientos y residuos sólidos, la disminución o remoción de la cobertura vegetal, la ocupación del cauce y la deficiencia hidráulica a lo largo de la canalización de la sección. El primer relacionado con la baja conexión a los sistemas de alcantarillado convencionales, así como el aporte considerable de aguas residuales no domésticas asociadas con la actividad minera y el uso del suelo industrial y la reducción de la cobertura vegetal vinculada con los procesos de urbanización (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018b).

5 METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo ha tenido como eje metodológico, establecer mediante una revisión bibliográfica los diferentes contaminantes que pueden estar presentes en las aguas de escorrentía y con base en esta revisión analizar su variabilidad fisicoquímica dependiendo de características de la zona de estudio, como por ejemplo el uso del suelo, la intensidad y la frecuencia de los diferentes eventos de precipitación.

Para evaluar adecuadamente tanto la relación existente entre las condiciones fisiográficas y actividades antrópicas con respecto a los fenómenos de precipitación como los impactos potenciales que genera el agua de escorrentía en la calidad de las fuentes hídricas, se requiere de una serie de acciones de búsqueda e interpretación de información, las cuales permitan la identificación de las zonas críticas donde se realiza el mayor aporte de contaminantes. A continuación, se describen cada una de las fases desarrolladas para tal fin.

5.1 FASE PRELIMINAR

Con el propósito de determinar los sitios de monitoreo, se realizó a través de la herramienta álgebra de mapas en ArcGIS, la superposición y reclasificación de los mapas de pendientes, coberturas y usos del suelo de la subregión del Valle de Aburrá, con el fin de identificar zonas de mayor interés de acuerdo con dichos factores. En el caso del mapa de pendientes, la priorización se hizo de acuerdo con su clasificación en la literatura (altas, medias y bajas), mediante la herramienta Spatial Analyst Tools en ArcGIS y siguiendo la sugerencia realizada por

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el año 2009, en la cual relacionan pendientes bajas con tierras a nivel y pendientes altas a tierras escarpadas, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Jerarquía de las geoformas principales

GEOFORMA	GRADIENTE (%)	CALIFICACIÓN
Tierras a nivel	<10	Bajas
Tierras con pendiente	10-30	Medias
Tierras escarpadas	>30	Altas

Particularmente, para evaluar el efecto del relieve en el aporte de contaminantes a las aguas de escorrentía, se consideran de mayor importancia las altas pendientes, pues en estas, al caer la lluvia se genera un mayor arrastre de partículas debido a las altas velocidades adquiridas por el agua, las cuales favorecen el desprendimiento de partículas de la superficie. Asimismo, para la reclasificación del mapa de coberturas y usos del suelo, fue necesario tener en cuenta la descripción de las coberturas identificadas y el estado en el cual se encuentra cada de estas, pues estos factores determinan la facilidad con la cual un contaminante se arrastra y transporta sobre la superficie hasta llegar a un cuerpo de agua. De esta manera, los puntajes se asignan considerando que las coberturas y usos del suelo en los que se tiene mayor interés son aquellos usos no consolidados, en los cuales, el terreno se encuentra más expuesto a factores de intemperismo tales como tejido urbano continuo, zonas quemadas, tierras desnudas y degradadas. Como resultado de la fase preliminar se encontró que las zonas que posiblemente generan un mayor impacto en la calidad de las aguas de escorrentía se encuentran localizadas principalmente en la zona urbana, debido a que presentan coberturas con muy baja o nula permeabilidad y la mayor actividad antrópica. En la Tabla 2 se presenta la descripción de cada uno de los usos del suelo identificados, mientras en la Figura 6 es posible identificar posibles zonas de interés.

Tabla 2. Usos del suelo urbano en la microcuenca de la quebrada Altavista

USO GENERAL DEL SUELO URBANO	SUBCATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
Áreas y corredores de alta mixtura	Centralidades con predominancia económica	Se asocia con zonas en donde predomina el uso del suelo en función de las actividades económicas y la prestación de servicios públicos. En estas se desarrollan actividades y funciones con alta proporción e intensidad, las cuales generan atracción de población y de actividades económicas de escala.
	Centralidades y corredores con alta mixtura	
	Áreas de actividad económica en transformación	
Áreas y corredores de media mixtura	Zonas de Transición; Centralidades dotacionales; Aglomeraciones comerciales y de servicios barriales	Este uso corresponde a las áreas cuya característica es una media intensidad de mixtura de actividades urbanas, estas poseen diferentes tamaños, condiciones de localización, accesibilidad y vocación económica.
Áreas de baja mixtura	Áreas predominantemente residenciales	Su uso predominante es la vivienda, la cual se entiende como el espacio en donde habitan permanentemente las personas y no está totalmente destinado a otros fines, sin embargo, permite la mezcla con las actividades económicas de uso cotidiano.

Fuente: (Departamento Administrativo de Planeación, 2014)

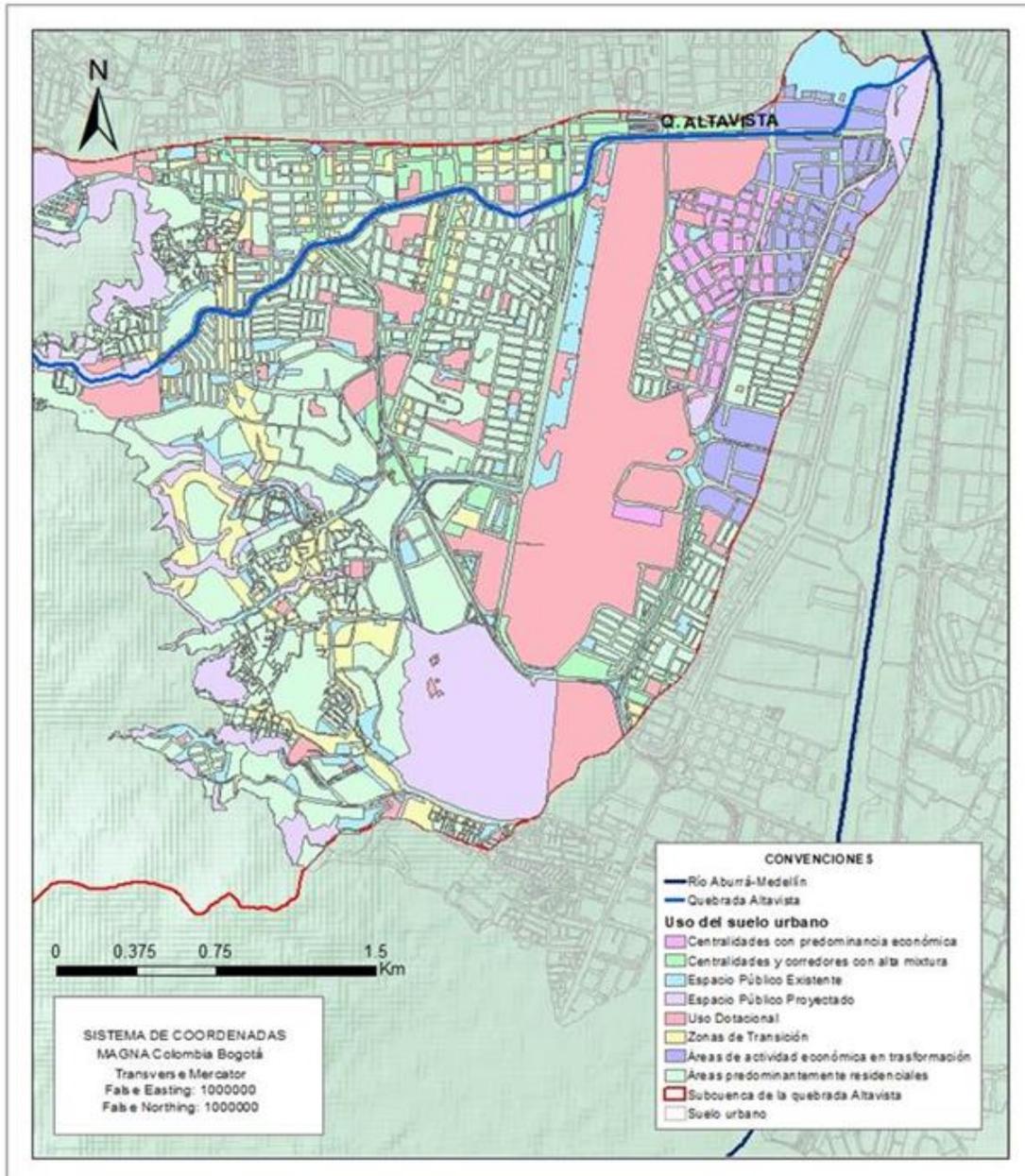


Figura 6. Zonas de interés para la selección del sitio de muestreo

Con base en esto y con el fin de evaluar el impacto potencial que tienen diferentes usos del suelo urbano en la calidad fisicoquímica de los cuerpos de agua, se selecciona la microcuenca de la quebrada La Altavista, debido a que concentra una mayor cantidad de usos, lo cual por cuestiones de logística y presupuesto hace más viable el desarrollo del proyecto. Específicamente se seleccionan los usos residencial e industrial debido a que presentan la mayor ocupación en la parte baja de la cuenca, además del cerro Nutibara considerado como un ecosistema urbano, ecosistema que se encuentra consolidado como área protegida dentro de la ciudad de Medellín. Particularmente, presenta una extensión de 33.3 Ha y es considerado un espacio de recreación

y cultura, con un importante valor histórico, ecológico y turístico para la ciudad (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, sf). En la Fotografía 1 se observan algunos de los puntos seleccionados en esta zona.



Fotografía 1. Puntos de muestreo en zona verde urbana

En relación a la zona residencial, los puntos de muestreo se encuentran localizados entre la carrera 74 con calle 28 y 29 pertenecientes al barrio Granada de la comuna 16 (Belén) , lugares en donde como se observa en la Fotografía 2, predomina el uso de suelo residencial; mientras que la zona industrial está ubicada sobre la calle 31 y la carrera 65^a en el barrio Fátima, zona en la cual se presentan una gran variedad de talleres de mecánica automotriz en donde se realiza el mantenimiento, restauración y limpieza de vehículos, tal como se muestra en la Fotografía 3. Por otra parte, los recipientes para la recolección de la muestra de agua lluvia fueron ubicados sobre el techo de la biblioteca pública Altavista, localizada en la parte alta de la microcuenca.



Fotografía 2. Puntos de muestreo en zona residencial



Fotografía 3. Puntos de muestreo en zona industrial

Adicionalmente, con el fin de obtener información sobre la intensidad y la frecuencia de cada uno de los eventos de precipitación, se identificaron las estaciones meteorológicas del SIATA (Sistema de alertas tempranas del Valle de Aburrá) y se seleccionaron aquellas con mayor cercanía a los puntos de muestreo establecidos. En la Tabla 3 se presenta una descripción de las estaciones designadas.

Tabla 3. Estaciones meteorológicas SIATA

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	COMUNA / VEREDA	COORDENADAS	
			LATITUD	LONGITUD
1	Casa de gobierno Altavista	V. Altavista – Sector central	6.222600	-75.628200
197	Universidad de Medellín	Comuna 16 - Belén	6.230240	-75.609970
202	Área Metropolitana del Valle de Aburrá	Comuna 10 – La Candelaria	6.242238	-75.574031
249	CEDEPRO	V. Buga – Patio Bonito	6.219590	-75.636239

5.2 FASE DE MUESTREO

Debido a que la naturaleza del evento de precipitación determina el lavado del material que se encuentra en la superficie, se desarrollaron seis (6) muestreos, entre los periodos febrero y junio de 2021 y abril de 2022, en los cuales se analizaron diferentes eventos de precipitación, abarcando las temporadas seca y de lluvia en la zona de estudio; se realizó un seguimiento de factores como intensidad (I_{LL}) y tiempo seco precedente (TSP), para cada uno de estos. Adicionalmente, con el propósito de caracterizar el proceso de contaminación del agua lluvia y del agua que fluye sobre la superficie de la cuenca, se desarrolló tanto la toma de muestras de agua lluvia antes de su contacto con la superficie, como la instalación de recipientes para la recolección del agua de escorrentía en los sumideros, antes de su entrada al sistema de

alcantarillado, tal como lo plantea (Estupiñán, 2009); en la Fotografía 4 se presenta el montaje experimental empleado.



Fotografía 4. Montaje para la recolección de muestras en los sumideros

Dicha toma de muestras se realizó de forma puntual en tres puntos representativos de cada uso del suelo de interés, que recogen agua de escorrentía en un evento de lluvia, para obtener un volumen de 2 litros (Buitrago, 2011), con el fin de posteriormente realizar una muestra compuesta y analizar cada una de las variables determinadas. En cuanto a las estaciones meteorológicas para la obtención de las características de la lluvia, estas fueron seleccionadas a partir de la red de monitoreo conformada por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), de acuerdo con su cercanía y radio de influencia sobre los puntos de interés establecidos.

En relación a la selección de los contaminantes a analizar, a partir de las restricciones del proyecto, se realizó la medición de parámetros básicos de calidad del agua tales como pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), turbiedad, además de nutrientes, específicamente fósforo y nitrógeno en sus formas de fósforo total (PT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y nitratos (NO_3^-) (Zgheib et al., 2012). Por otra parte, en cuanto a la evaluación de fuentes urbanas, se han identificado algunas como la deposición atmosférica, el tráfico, jardines y edificaciones, en las cuales se evalúan sustancias prioritarias, definidas por la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, tales como metales, entre los que sobresalen Zinc (Zn), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Níquel (Ni) y Cromo (Cr) (Zgheib et al., 2008).

Durante los meses de febrero de 2021 y abril de 2022 se realizaron un total de 6 campañas de monitoreo, en cada uno de los puntos de muestreo localizados en la microcuenca de la quebrada Altavista, desde la parte alta hasta la zona baja de la cuenca. Las muestras fueron analizadas en el grupo Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) de la Universidad de Antioquia. En la Tabla 4 se presentan las metodologías para la determinación de cada uno de los parámetros analizados en las muestras obtenidas. De forma particular, para el caso del pH y la conductividad eléctrica, estos fueron medidos in situ a través de un equipo multiparamétrico HACH HQ40D.

Tabla 4. Métodos de referencia para el análisis de las muestras obtenidas

PARÁMETRO	SÍMBOLO	MÉTODO DE REFERENCIA
Sólidos Suspendidos Totales	<i>SST</i>	SM 2540 D; Ed. 23, 2017*
Turbiedad	-	SM 2130 B; Ed. 23, 2017*
Demanda Química de Oxígeno	<i>DQO</i>	SM 5220 D; Ed. 23, 2017*
Fósforo Total	<i>PT</i>	SM 4500-P B, E; Ed. 23, 2017*
Nitrógeno Kjeldahl	<i>NTK</i>	SM 4500-N org B, 4500-NH3 B, C; Ed. 23, 2017*
Nitratos	<i>NO₃⁻</i>	SM 4110 B*
Zinc	<i>Zn</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*
Cobre	<i>Cu</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*
Plomo	<i>Pb</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*
Níquel	<i>Ni</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*
Cromo	<i>Cr</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*
Cadmio	<i>Cd</i>	SM 3030 F, SM 3120 B Modificado*

*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

5.3 FASE DE ANÁLISIS

Durante esta etapa se realizó un análisis estadístico de la información obtenida en las fases anteriores, mediante el uso de herramientas computacionales como R, el cual a partir de un paquete estadístico (*car*, *moments*, *mvShapiroTest*, *corrplot*, *factoextra*, *ggplot2*, *MVN*, *normtest*, *pvclust*, *STAT*, *vegan*, *plotly*, *psy*) permite realizar análisis univariados y multivariados, permitiendo identificar la relación entre los diferentes parámetros medidos en campo y detectar diferencias significativas entre cada uno de los puntos de muestreo y las características de la precipitación evaluadas en los diferentes eventos de lluvia.

Particularmente, con el propósito de analizar la variación espacial de la calidad del agua de escorrentía de acuerdo con las variables determinadas, así como la relación entre estas y el efecto que tiene tanto el uso del suelo como las características de la lluvia, se realizó un análisis de correlación que permitió identificar además de la redundancia, la relación o no entre los parámetros medidos. Por otra parte, se desarrolló un análisis de componentes principales (PCA), el cual permitió reducir la dimensionalidad de los datos, conservando al mismo tiempo la mayor variación posible del mismo (Ringnér, 2008), permitiendo así identificar la contribución que tiene cada una de las variables. Finalmente, se realizó un análisis clúster con el cual se analizaron las tendencias de agrupación entre las diferentes estaciones y campañas en función de las similitudes entre ellas.

En la Figura 7 se presenta de forma gráfica, el flujograma de la metodología desarrollada con el fin de cumplir los objetivos planteados.



Figura 7. Metodología desarrollada

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 CALIDAD DE AGUA DE ESCORRENTÍA

6.1.1 Variación de los parámetros a lo largo del muestreo, entre usos del suelo

En la Tabla 5 se muestra un resumen estadístico (media, desviación estándar, mínimo y máximo) de las 16 variables analizadas en los diferentes puntos de muestreo seleccionados para cada uno de los usos del suelo evaluados (ver Fotografía 1, Fotografía 2 y Fotografía 3). Específicamente se tomaron un total de 24 muestras. A partir de dicha caracterización ambiental es posible identificar la dinámica de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los diferentes usos del suelo de interés. En términos generales, como puede observarse en la Tabla 5 los metales pesados presentaron una mayor variación en uso de suelo residencial, esto relacionado con la variación de factores como velocidad, densidad del tráfico, diversidad de vehículos que pueden circular en el sector, estado y características de las vías, los cuales condicionan las concentraciones de dichos contaminantes en el material depositado sobre la superficie (Müller et al., 2019).

Tabla 5. Resumen estadístico de las variables fisicoquímicas analizadas

PARÁMETRO	USO DEL SUELO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMÉTICA	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
<i>SST</i>	Industrial	955.00	4875.00	2562	69.94%
	Residencial	32.00	5138.00	1556.33	126.35%
	Natural	309.00	3553.00	1351.67	87.04%
	Lluvia	10.00	22.00	12.00	40.82%
<i>Turbiedad</i>	Industrial	83.80	296.00	213.63	38.90%
	Residencial	36.30	210.00	120.72	60.96%
	Natural	45.00	583.00	274.00	63.70%
	Lluvia	1.00	12.80	5.57	81.15%
<i>DQO</i>	Industrial	169.00	486.00	352.50	40.02%
	Residencial	158.00	375.00	251.67	37.72%
	Natural	82.80	364.00	163.50	65.92%
	Lluvia	25.00	26.20	25.20	1.94%
<i>PT</i>	Industrial	1.33	8.01	3.93	61.65%
	Residencial	0.80	9.40	2.88	113.85%
	Natural	0.59	8.06	2.37	120.14%
	Lluvia	0.02	0.08	0.04	66.85%
<i>NTK</i>	Industrial	8.15	40.30	18.59	70.10%
	Residencial	6.11	15.90	10.97	32.14%
	Natural	6.86	72.70	27.51	86.84%
	Lluvia	5.00	5.00	5.00	0.00%
<i>NO₃⁻</i>	Industrial	0.20	1.22	0.58	61.90%
	Residencial	0.20	0.76	0.43	43.43%
	Natural	0.35	1.41	0.80	62.22%
	Lluvia	0.55	4.89	1.56	106.59%
<i>Zn</i>	Industrial	0.28	1.28	0.96	36.63%
	Residencial	0.88	3.36	2.00	57.07%
	Natural	1.10	3.60	2.12	48.92%
	Lluvia	0.10	0.10	0.10	0.00%
<i>Cu</i>	Industrial	0.10	0.36	0.21	52.27%
	Residencial	0.10	0.28	0.13	55.54%
	Natural	0.10	0.10	0.10	0.00%
	Lluvia	0.10	0.10	0.10	0.00%
<i>Pb</i>	Industrial	0.04	0.28	0.14	65.47%
	Residencial	0.02	0.19	0.06	100.00%
	Natural	0.01	0.07	0.03	84.98%
	Lluvia	0.01	0.01	0.01	0.00%

PARÁMETRO	USO DEL SUELO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA ARITMÉTICA	COEFICIENTE DE VARIACIÓN
<i>Ni</i>	Industrial	0.02	0.15	0.06	81.62%
	Residencial	0.01	0.14	0.04	134.21%
	Natural	0.01	0.03	0.02	48.75%
	Lluvia	0.01	0.01	0.01	0.00%
<i>Cr</i>	Industrial	0.02	0.29	0.12	84.96%
	Residencial	0.01	0.12	0.04	113.15%
	Natural	0.01	0.06	0.04	46.39%
	Lluvia	0.01	0.01	0.01	0.00%
<i>Cd</i>	Industrial	0.00	0.02	0.01	142.43%
	Residencial	0.00	0.02	0.005	141.65%
	Natural	0.00	0.00	0.00	68.37%
	Lluvia	0.00	0.00	0.00	11.66%
<i>pH</i>	Industrial	6.64	7.72	7.24	5.57%
	Residencial	6.29	7.70	6.787	7.15%
	Natural	6.48	7.48	6.98	5.02%
	Lluvia	5.78	8.77	7.48	13.94%
<i>CE</i>	Industrial	91.60	1118.00	356.100	106.58%
	Residencial	75.20	1223.00	405.533	104.17%
	Natural	105.00	357.00	207.167	51.94%
	Lluvia	25.00	53.10	29.917	38.01%

Por otra parte, el Zinc presentó una variación mayor, la cual puede derivarse del tránsito de vehículos en la zona, puesto que se ha identificado que la presencia de dicho elemento en las aguas de escorrentía se encuentra relacionado principalmente con el desgaste de los neumáticos y los aceites de los automóviles (Torres, 2004). Sin embargo, en promedio, en el uso del suelo industrial se registraron los valores más altos de metales pesados en comparación el resto de usos del suelo analizados, lo cual se relaciona particularmente con las actividades de lavado de los vehículos y el desgaste de su pintura durante dicho proceso, los cuales constituyen una fuente importante de Pb, Cd, Cr y Zn (Müller et al., 2019).

El segundo parámetro con mayor variación corresponde al fósforo total, particularmente para la zona natural urbana con valor mínimo y máximo de 0.59 y 8.06 mg/L, respectivamente. Asimismo, el nitrógeno total Kjeldahl presenta la mayor variación en este uso del suelo, dicho comportamiento puede relacionarse con prácticas de jardinería en la zona, tales como la aplicación de fertilizantes, así como los desechos de animales asociado con el ingreso de mascotas al Cerro Nutibara, lo cual se relaciona con estudios desarrollados, donde se ha demostrado que las zonas verdes en áreas urbanas son puntos críticos para la entrada de nutrientes en las aguas de escorrentía (Hobbie et al., 2017). Por otra parte, con la tercera variación en promedio más alta, se encuentran los sólidos suspendidos totales, los cuales presentaron una mayor variación en el uso del suelo residencial, con valores que varían entre 32 y 5138 mg/L; lo cual se relaciona con la presencia de antejardines y zonas verdes, que pueden aportar sólidos suspendidos a las aguas pluviales urbanas especialmente durante eventos de precipitación con altas intensidades al generar erosión del suelo o por actividades relacionadas con la jardinería (Gromaire et al., 2001).

Adicionalmente, fue posible identificar una mayor variación de NO_3^- , turbiedad y pH en las muestras de agua lluvia recolectadas. De forma particular, los nitratos son considerados iones primarios del agua de lluvia y son generados principalmente por fuentes antrópicas (Zeng et al., 2022), particularmente por la combustión de combustibles fósiles (carbón y gasolina), especialmente durante el tránsito vehicular, a partir de la oxidación del oxinitruro (NO_x) o la quema de biomasa (Zeng et al., 2023), actividades que a su vez se relacionan con la generación de

material particulado y los cambios de pH identificados en dichas muestras de agua (Garcés & Hernández, 2004). Finalmente, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para determinar la normalidad de las variables; todos los parámetros, con excepción del Cobre y Cadmio, se distribuyeron normalmente y no requieren una transformación de los registros antes de realizar nuevos análisis.

6.1.2 Análisis de relaciones entre variables de calidad

En la Figura 8 se muestra la matriz de correlación para el conjunto de variables analizadas. En esta se puede observar que variables como los NO_3^- y el pH no se correlacionaron fuertemente con las demás variables, puesto que los valores más alto de coeficiente de correlación corresponden a 0.32 y 0.44, respectivamente.

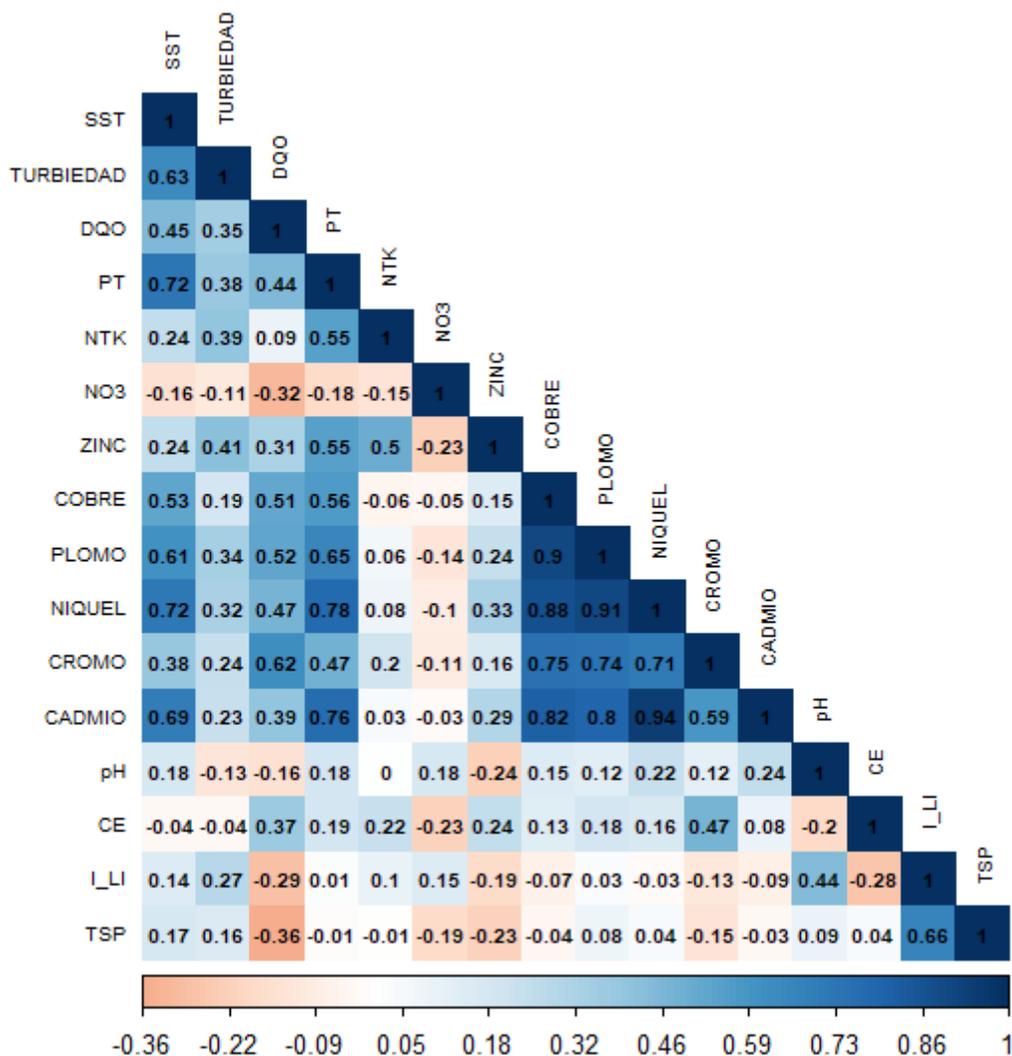


Figura 8. Matriz de correlaciones

En esta matriz de correlación (Figura 8) se observa una relación negativa entre el pH y el Zinc (-0.24), lo cual se relaciona con lo reportado en la literatura puesto que la biodisponibilidad y la toxicidad de los metales se encuentran determinadas por la composición química del agua, especialmente por factores como el pH, la dureza, la alcalinidad y la materia orgánica disuelta, entre otros (Price et al., 2021); De forma particular, la solubilidad del Zinc tiende a incrementar en soluciones ligeramente ácidas (Choque, 2020). Asimismo, se identifica una alta correlación entre los sólidos suspendidos totales y la turbiedad (0.63), lo cual se asocia a que esta última corresponde a una medida indirecta de los sólidos en suspensión presentes en el agua.

Adicionalmente, es posible identificar una alta correlación entre el fósforo total y sólidos suspendidos totales (0.72), asociado a que los sólidos tienen la capacidad de conformar un medio para el encapsulamiento o establecimiento de organismos en el medio acuático (Du et al., 2022), mientras que los nutrientes, especialmente el nitrógeno y el fósforo se encuentran incorporados en las moléculas orgánicas que desempeñan funciones vitales en las células de los organismos.

Por otra parte, se observa una alta correlación entre cada uno de los metales evaluados, lo cual se relaciona con su fuente de generación pues las principales fuentes de metales pesados en las vías se asocian a la eliminación gradual de gasolina de los vehículos, así como el desgaste de los neumáticos y las pastillas de los frenos (Revitt et al., 2022). Asimismo, se observa una alta correlación de la DQO con parámetros como los metales pesados, lo cual se asocia con la oxidación de estos compuestos en el agua.

En relación a la conductividad eléctrica, se encuentra una correlación positiva entre esta variable y parámetros como los nutrientes y los metales pesados, caso que se encuentra asociado con los iones diluidos en el agua, los cuales son producto de la contaminación orgánica e inorgánica (Sierra, 2011). Además, en cuanto al tiempo seco precedente, se observa que presenta una correlación positiva con la intensidad de la lluvia, los sólidos suspendidos totales y la turbiedad, lo que se asocia con que a medida que incrementa el TSP, aumenta la concentración de SST y demás compuestos contaminantes que se depositan en la superficie del terreno y que están disponibles para ser transportados hacia los cuerpos de agua por medio de la escorrentía superficial, resultados similares a los reportados por Maniquiz et al., 2022, donde obtuvieron que la concentración media de los contaminantes evaluados fue más alta durante eventos con un mayor tiempo seco antecedente.

6.1.3 Comportamiento de la calidad de agua, en relación con las fuentes y eventos de precipitación

Teniendo en cuenta el análisis de correlaciones desarrollado y con el propósito tanto de crear nuevas variables que no estuvieran relacionadas entre sí como evaluar la influencia de los parámetros medidos en la varianza del conjunto de estaciones muestreadas, se realizó un análisis PCA. Como parte de los resultados obtenidos, en la Figura 9 se observa que, mediante los dos primeros componentes del modelo matemático empleado, fue posible explicar un 64.7% de la varianza del conjunto de datos, por lo cual se realizó el biplot (ver Figura 10), teniendo en cuenta únicamente estos dos componentes.

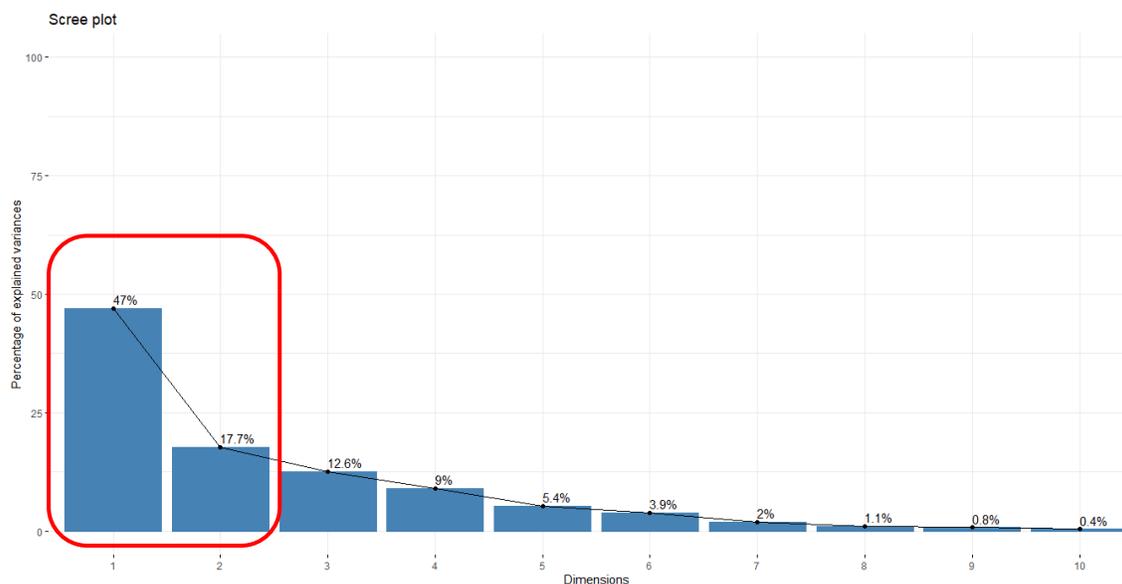


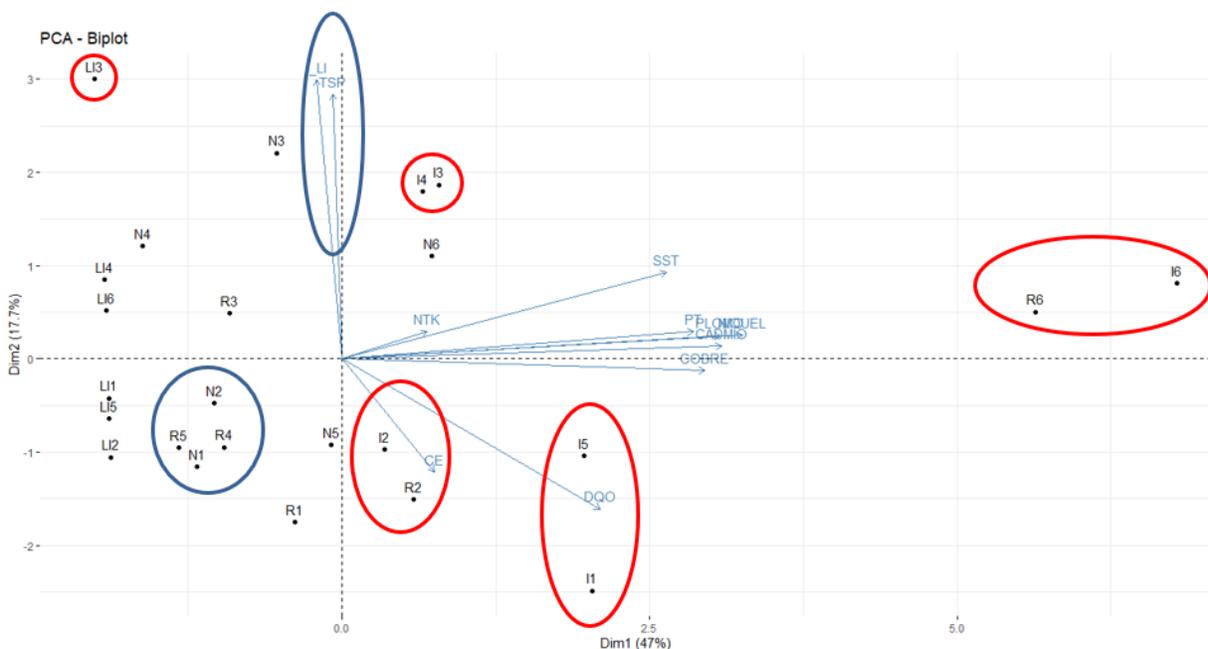
Figura 9. Porcentaje de varianza explicada

Como se muestra en la Tabla 6, el conjunto de variables analizadas lograron agruparse en los dos componentes seleccionados, en el caso del primer eje se encontraron aquellas variables asociadas directamente con los niveles de contaminación disuelta y particulada sobre los cuerpos de agua, debido a que congrega variables como SST, PT, NTK, Plomo, Níquel, Cromo y conductividad eléctrica; mientras que el segundo componente se relacionó principalmente con las características de la lluvia, dado que la intensidad de la lluvia y el tiempo seco precedente presentaron mayores pesos. A su vez, es importante mencionar que las variables con mayor contribución correspondieron a los diferentes metales pesados analizados seguido de los sólidos suspendidos totales.

Tabla 6. Pesos de las variables en los componentes del PCA

Parámetro	PC1	PC2
SST	0.344	0.197
DQO	0.273	-0.341
PT	0.372	0.062
NTK	0.090	0.062
Plomo	0.384	-0.027
Níquel	0.401	0.053
Cromo	0.424	0.054
CE	0.402	0.029
I_LL	0.098	-0.257
TSP	-0.027	0.634

Adicionalmente, en la Figura 10 es posible observar de forma gráfica la contribución que tuvieron las variables analizadas en el proceso de contaminación de las aguas de escorrentía, así como su asociación a cada uno de los dos ejes seleccionados y la distribución de los sitios de monitoreo en cada una de las campañas desarrolladas de acuerdo con las variables analizadas en dichos puntos.



*Donde LI corresponde a las muestras de agua lluvia, N a las muestras tomadas en zona natural urbana, I en zona industrial y R en zona residencial.

Figura 10. Biplot PCA

En la Figura 10 se observa una agrupación de los eventos de lluvia, donde particularmente el LL3 (el tercer evento de precipitación muestreado) fue el que presentó la mayor intensidad y el mayor tiempo seco precedente, seguido del cuarto evento de lluvia monitoreado. En el primer caso, se identifica que la muestra de agua lluvia se caracteriza por presentar los más altos valores de turbiedad (12.88 NTU) y pH (8.77 U. de pH); lo cual se relaciona con el alto flujo vehicular presentado en vías aledañas a las instalaciones de la biblioteca pública Altavista, así como a las actividades antrópicas que se desarrollan en la zona (especialmente la ladrillera Altavista) factores que realizan un significativo aporte de impurezas a la atmósfera, incrementando los niveles de turbiedad del agua lluvia.

Adicionalmente, el pH básico se puede relacionar con las diversas restricciones de movilidad realizadas entre el primero y el quinto día de abril de 2021, con el fin de aplanar las cifras de contagio de COVID-19, puesto que, al transitar una menor cantidad de vehículos en la ciudad, se reducen las concentraciones de CO_2 en la atmósfera, el cual debido a su interacción con el vapor de agua es transformado en ácido carbónico, ocasionando una ligera disminución del pH del agua lluvia (Garcés & Hernández, 2004), contraste que además se puede observar durante los eventos monitoreados sin condiciones específicas de restricción vial, donde se presentan valores de pH cercanos a la neutralidad. Dichos hallazgos se relacionan con lo reportado en la literatura, en donde al investigar los efectos de las restricciones de movilidad generadas por la contingencia del COVID-19, encontraron una considerable disminución en la concentración de contaminantes en la atmósfera, particularmente de NO_x , el cual cobra especial interés debido a los efectos que el nitrógeno puede tener en los ecosistemas como agente acidificante (Rogora et al., 2022).

Por otra parte, el cuarto evento monitoreado registra el valor más bajo de pH (5.78 U. de pH) y bajos niveles de NO_3^- (0.75 mg/L). Este valor de pH se relaciona con la alta carga contaminante derivada de la utilización de combustibles fósiles y de ciertas prácticas como la quema de

residuos sólidos o escombros, puesto que algunas de las principales causas de estos valores de pH en la lluvia son los óxidos de nitrógeno y azufre generados por los procesos de combustión (Garcés & Hernández, 2004). De igual manera, al observar las muestras de agua analizadas en la zona industrial para los dos eventos evaluados, se encuentra que la carga de sólidos suspendidos totales es mucho mayor en relación a la concentración de metales pesados, lo cual está asociado a las características de la lluvia, así como al arrastre y transporte de sólidos, puesto que se pudo generar una mayor acumulación de partículas durante el tiempo seco precedente, además de que al caer con una mayor intensidad probablemente se generó una mayor disgregación de las partículas depositadas sobre la superficie. Dicho comportamiento guarda relación con los hallazgos presentados por Mallin et al., 2009, donde con una mayor intensidad de la lluvia aumentaron significativamente los valores de turbiedad, SST, fósforo total y otras variables como los ortofosfatos y la demanda biológica de oxígeno (DBO_5).

El segundo evento de lluvia analizado en la zona industrial, de forma particular se asemeja a las muestras tomadas en la zona residencial, esto se asocia a que durante el tiempo transcurrido entre la instalación de los recipientes de muestreo y el evento de lluvia no hubo desarrollo de alguna actividad industrial, por lo que los contaminantes depositados en la vía se relacionan principalmente al tránsito de vehículos en la zona, mientras que durante el primer y el quinto evento monitoreados, la zona industrial, al igual que en Choe et al., 2002, se relaciona con los mayores niveles de metales pesados (1.28 mg/L Zn, 0.32 mg/L Cu, 0.16 mg/L Pb, 0.29 mg/L Cr). Asimismo, se identificó una alta concentración de parámetros básicos de calidad del agua tales como DQO (483 mg/L) y CE (1118 μ S/m), variables que se encuentran correlacionadas puesto que, al incrementar la concentración de iones disueltos por un efecto de contaminación en el agua, aumenta la cantidad de oxígeno requerido para oxidar dichos compuestos.

Para el sexto evento de precipitación monitoreado, se presentaron características de tiempo seco precedente prolongado, altas intensidades de lluvia y especialmente, para el uso de suelo residencial, se encontraron vertimientos de pintura, los cuales se reflejan en el aumento en la concentración de variables como los metales pesados, ocasionando un efecto de contaminación similar al generado por el desarrollo de la actividad antrópica en la zona industrial. En la Fotografía 5 se evidencian los hallazgos del vertimiento realizado.



Fotografía 5. Vertimiento de pintura identificado en uso de suelo residencial

Por otra parte, como era de esperarse, los eventos de lluvia se encuentran en sentido contrario al incremento de contaminantes, donde a medida que pasamos de la zona verde urbana, el uso residencial y finalmente industrial, se genera un incremento considerable de estos, relacionado con el aumento de la actividad antrópica. Mientras que las muestras tomadas en la zona verde urbana y residencial presentan características similares, probablemente relacionado con que los puntos de muestreo localizados en el Cerro Nutibara (catalogado como ecosistema natural urbano) se encuentran contiguos a la vía de acceso vehicular de la calle 30A, lo cual puede aportar una serie de contaminantes por el tránsito de vehículos y por las corrientes de flujo (aire) generadas; adicionalmente, la zona se encuentra adecuada con estructuras metálicas galvanizadas para el tránsito de personas en el lugar, las cuales de acuerdo con lo identificado por Müller et al., 2022, cuando se corroen liberan una gran cantidad de metales que se concentran en la superficie de las aceras y vías.

No obstante, es importante resaltar que, en algunos estudios realizados, la concentración total de contaminantes en la escorrentía superficial en la zona residencial es mayor que en la zona industrial y no se reportan variaciones significativas en las características fisicoquímicas de las aguas pluviales por uso de suelo de la zona residencial y por tipo de industria de la zona industrial (Choe et al., 2002), caso contrario a lo identificado en el presente estudio, en el cual se observó una mayor concentración de metales pesados en la zona industrial además de una alta variación en la concentración de compuestos especialmente en la zona residencial.

Con el propósito de confirmar y complementar los análisis realizados mediante el PCA, se desarrolló un análisis clúster jerárquico agrupando los puntos de monitoreo, de forma tal que se obtuvo la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre estos. Como se observa en la Figura 11, se identificaron 4 agrupaciones entre los diferentes sitios de muestreo de acuerdo con cada una de las campañas realizadas.

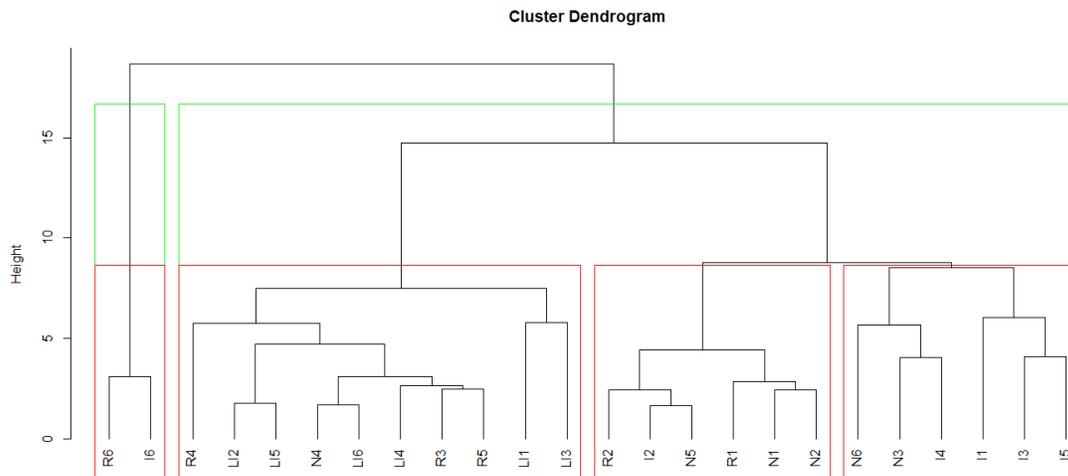


Figura 11. Análisis de clúster

Como se observa en la Figura 11, en el segundo clúster se encuentran agrupados los eventos de lluvia con características fisicoquímicas similares, excepto para el caso de las muestras industrial (I6) y residencial (R6) del sexto evento de lluvia monitoreado, las cuales presentaron las concentraciones más altas de metales pesados, comportamiento relacionado con las características del evento de precipitación generado en dicho muestreo, puesto que de forma

similar a los resultados obtenidos por Mallin et al., 2009, el tiempo seco precedente y la alta intensidad de la lluvia generó una mayor acumulación y arrastre de los contaminantes depositados sobre la superficie.

En cuanto al segundo clúster, es posible identificar que a gran escala agrupa los 6 eventos de lluvia caracterizados, sin embargo, este a su vez se divide en 2. En el primero es posible encontrar la mayoría de las lluvias analizadas a excepción de las lluvias de los eventos uno (LI1) y tres (LI3), las cuales se caracterizaron por presentar condiciones similares en cuanto a la concentración de nutrientes y metales pesados. Asimismo, en dichos eventos se observaron las más altas concentraciones tanto de turbiedad como de nitratos, concentración que además de relacionarse con el ciclo natural del nitrógeno en la tierra (Zeng et al., 2023), puede incrementar con el desarrollo de actividades antrópicas como la quema de carbón y combustible al incorporar óxido de nitrógeno en la atmósfera. Específicamente en el caso del evento 4 de lluvia monitoreado (LL4); se presentó el valor de pH más bajo reportado (5.7 U. de pH), el cual se encuentra posiblemente relacionado con la quema de residuos sólidos en zona rural y con la ocurrencia de incendios en diferentes puntos de la ciudad, puesto que, de acuerdo con las noticias reportadas, durante el mes de mayo (cuarto mes de muestreo), se registró el mayor número de incendios del primer semestre del año 2021 (López, 2021).

De forma particular, los eventos residencial, agua lluvia y natural (R4, LL4 y N4) del cuarto evento de precipitación monitoreado y los residenciales del tercer (R3) y quinto (R5) monitoreo, presentan niveles cercanos en los parámetros asociados con los nutrientes, así como valores menores al límite de detección en algunos metales pesados como el Cobre y el Cadmio, lo cual, en el caso de los nutrientes para los usos residencial y natural, relacionado con el aporte de materia orgánica, fertilizantes y desechos animales (Gromaire et al., 2001), mientras que en el caso de la muestra de aguas lluvia, estos niveles de nutrientes están asociados a la deposición atmosférica (Pandey & Raghubanshi, 2022).

Dentro del tercer clúster se agrupan las muestras de los puntos residencial (R1, R2), natural (N1 y N2) e industrial (I2) del segundo evento de precipitación evaluado, además del muestreo en zona natural (N5) del quinto muestreo; donde se puede identificar que los tres (3) últimos eventos se agrupan en un nivel más específico puesto que en estos se presentaron altas concentraciones de SST, similares concentraciones de turbiedad, nutrientes, metales pesados, CE y pH neutro. Es importante mencionar que dentro de esta categoría se encuentra el punto I2 debido a que durante el tiempo previo a la toma de muestras no hubo desarrollo de la actividad industrial, presentando así una afinidad con las tendencias presentadas en las zonas residencial y/o natural urbana.

Por su parte, en el cuarto clúster, se observa que como puntos más alejados de las condiciones presentadas por el agua lluvia, se encuentran los eventos uno, tres y cinco, analizados en la zona industrial, los cuales se caracterizaron por presentar la mayor concentración de metales pesados. Mientras que tanto los eventos tres y seis de la zona verde urbana como el cuatro de la zona industrial presentan los valores más altos de SST. Resultados acordes a lo esperado puesto que en el primer caso se puede observar de forma evidente el impacto que tiene el desarrollo de actividades industriales (especialmente de mecánica automotriz) en la incorporación de metales pesados a las aguas de escorrentía. En general, se observa que las aguas de escorrentía en zonas menos intervenidas, es decir, parques y zonas residenciales, presentan distintas características fisicoquímicas y a su vez distintas a las muestras de agua lluvia, por lo cual es evidente la alteración generada por el desarrollo de cualquier tipo de actividad antrópica, y como era de esperarse, el grupo que más dista es el industrial.

6.2 SÍNTESIS CONCEPTUAL DEL IMPACTO DEL USO DEL SUELO URBANO EN LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

El agua interactúa con gases, sólidos y líquidos que se encuentran en la naturaleza, pues a través de la atmósfera se produce el transporte de partículas de una zona a otra, para ser posteriormente depositadas sobre la superficie, material que depende de las características y compuestos presentes en la atmósfera. Adicionalmente, durante eventos de precipitación los suelos son lavados, de forma que se arrastran una serie de residuos y elementos que determinan la calidad físicoquímica de las aguas de escorrentía y por ende de las fuentes superficiales (Palleiro, 2016). De esta manera, por ejemplo, la escorrentía es considerada entonces como una fuente de contaminación difusa, pues se origina en áreas extensas y su descarga se encuentra ligada a un fenómeno aleatorio, la lluvia, que es variable en el tiempo.

Al generarse algún evento de precipitación, se realiza un lavado de los contaminantes que se encuentran presentes en la atmósfera. Posteriormente, una parte del agua lluvia es interceptada por la vegetación presente antes de llegar al terreno, mientras que la otra parte tiene contacto directo con la superficie terrestre. Dependiendo de la permeabilidad y la porosidad de la superficie con la que se encuentre, el agua tiene tres (3) opciones; puede comenzar a infiltrarse convirtiéndose en una fuente de recarga para los acuíferos, acumularse o transportarse en la superficie del suelo dependiendo de la pendiente de éste. En el primer caso, una vez se llega al nivel de saturación, de acuerdo también con la pendiente del terreno, las aguas de escorrentía pueden acumularse en la superficie o ser transportadas sobre esta. Cuando se acumulan, debido a la energía de la luz solar, el agua se evapora reincorporándose de nuevo a la atmósfera hasta que haya la suficiente humedad para generarse un nuevo evento de precipitación.

Mientras que el agua que es transportada por la superficie adquiere múltiples compuestos que han sido acumulados en la superficie del terreno, dependiendo del número de días de tiempo seco en la zona, el viento y las corrientes de aire generadas por el tráfico vehicular, limpieza o barrido, deposición atmosférica, adsorción y oxidación de químicos de un estado a otro, entre otros (Estupiñán, 2009), los cuales junto con las características del régimen de precipitación en la zona determinan entonces la composición de las aguas de escorrentía. Es importante mencionar, que de forma particular los contaminantes más comunes en zonas urbanas son: aceites, combustibles, fluidos hidráulicos, polvo, residuos y detritus, entre otros; asimismo es posible encontrar metales pesados originados por la corrosión de algunos materiales, y por las emisiones atmosféricas de vehículos e industrias (Zafra et al., 2017), mientras que en zonas rurales los compuestos que se pueden encontrar están asociados con los diferentes usos del suelo en el territorio. Posteriormente, estas aguas son descargadas a los cuerpos de agua superficial, ya sea por la red de alcantarillado pluvial o combinado o como una fuente difusa, generando de acuerdo con su composición una serie de impactos negativos en el ecosistema y la fauna acuática. En la Figura 12 se muestra de forma gráfica cada una de las relaciones mencionadas.



Figura 12. Procesos que se presentan en el agua lluvia y de escorrentía antes de su descarga en los cuerpos de agua superficial de acuerdo con los diferentes factores que condicionan la partición, el almacenamiento y el transporte del agua en la superficie terrestre

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, las modificaciones en las características del suelo condicionan la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación pues cambia la forma en la cual dicho ecosistema distribuye, almacena, transmite y libera los flujos de agua (García et al., 2018), además de generar una respuesta más rápida en la cuenca, lo cual conlleva a una mayor magnitud en el caudal de las fuentes de agua y a una mayor recurrencia de inundaciones en las zonas aledañas a estas (Miller et al., 2014).

Específicamente para la quebrada Altavista, se obtuvieron los resultados de dos muestreos fisicoquímicos realizados a partir de la operación de la red de monitoreo del recurso hídrico en la región - RedRío, durante el 28 de agosto de 2019 (muestreo 1) y el 22 de noviembre de 2021 (muestreo 2). En la Tabla 7 se muestran cada uno de los parámetros medidos.

Tabla 7. Resultados de muestreo fisicoquímico sobre la quebrada Altavista

Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2
pH (U. de pH)	7.845	7.767
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	453.364	288.427
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	838.000	153.000
DQO (mg/L)	347.000	181.000
Fósforo total (mg P/L)	4.450	0.884
Nitrógeno total Kjeldahl (mg N/L)	26.400	15.000

Con el fin de conocer algunos valores de referencia acordes a la dinámica de la quebrada Altavista, se identificaron las estaciones de monitoreo del río Aburrá-Medellín entre las cuales se encuentra la descarga de dicha quebrada al río; específicamente este punto se localiza antes de la estación Aula Ambiental, para la cual se plantean los siguientes objetivos de calidad de acuerdo con la Resolución Metropolitana 2016 de 2012.

Tabla 8. Objetivos de calidad del agua para el río Aburrá Medellín a la altura de la estación Aula Ambiental

Parámetro	Valor	Unidad
DQO	<100	mg/L
pH	>6.5 - <8.5	U. de pH
Sólidos suspendidos totales	<200	mg/L
Conductividad eléctrica	<120	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Nitrógeno total Kjeldahl	<10	mg/L
Fósforo total	<2	mg/L

Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia, 2020

A partir de la información presentada en la Tabla 8, se puede observar que la quebrada Altavista presenta valores de pH dentro del rango de los objetivos de calidad establecidos en ambos muestreos, los cuales a su vez están relacionados con los resultados obtenidos para esta variable en las diferentes muestras de agua lluvia y de escorrentía analizadas. No obstante, al observar las demás variables es posible evidenciar el impacto de las actividades antrópicas en la cuenca puesto que la DQO, la conductividad eléctrica y el nitrógeno total Kjeldahl presentan valores por encima de los rangos establecidos como objetivos de calidad, lo cual de acuerdo con los resultados obtenidos durante el análisis

estadístico se puede relacionar directamente con las descargas de agua de escorrentía, las cuales además de ser una fuente importante de metales y sólidos suspendidos totales representan un aporte considerable de fósforo a los cuerpos de agua.

Especialmente parámetros como la conductividad eléctrica, los sólidos suspendidos totales y los nutrientes (N y P) cobran interés puesto que, en el primer caso, esta variable permite establecer relaciones e interpretación de resultados con los sólidos disueltos en las descargas (Sierra, 2011). En el caso de la estación Aula Ambiental, se han establecido diversos rangos de conductividad eléctrica de acuerdo con los monitoreos continuos que se realizan en este punto (Giraldo, 2022), identificando de esta manera que el valor obtenido para dicha variable durante el primer muestreo se clasifica como regular mientras que en el segundo caso se encuentra en el rango aceptable.

De forma particular los sólidos suspendidos totales por ejemplo generan depósitos de sedimentos en el fondo del cauce y disminuyen el paso de la luz a través de la columna de agua, limitando la actividad fotosintética dentro del mismo y por ende propiciando el desarrollo de condiciones anaerobias. El fósforo total y el nitrógeno total Kjeldahl por su parte conforman dos de los nutrientes esenciales para el establecimiento de la vida acuática, por lo cual su exceso se puede identificar mediante la proliferación de algas conllevando así a procesos de eutrofización en la fuente hídrica. Como se identificó durante los análisis de agua de escorrentía realizados en los diferentes puntos de muestreo, los sólidos suspendidos totales y los nutrientes representan dos de los principales parámetros de contaminación en esta matriz de agua, presentando las mayores variaciones en los diferentes usos del suelo evaluados, permitiendo inferir que la calidad de la quebrada para las dos campañas de monitoreo analizadas está condicionada con el ingreso de aguas de escorrentía.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los análisis de correlación y de componentes principales, fue posible identificar dos componentes que pueden afectar drásticamente la calidad del agua, la fracción de contaminación disuelta y el material suspendido, donde se agruparon variables como CE, DQO, PT, NTK, SST y metales pesados, mientras que el segundo corresponde a los parámetros asociados con las características de la precipitación como son tiempo seco precedente e intensidad de la lluvia. Es importante mencionar que la mayor contribución estuvo representada por los metales pesados y los sólidos suspendidos totales, siendo esta última de particular interés puesto que dicho parámetro es considerado como el principal contaminante de las aguas de escorrentía, cobrando importancia por su alta capacidad de adsorción y su afinidad por algunos metales.

Debido a que los mayores niveles de contaminación observados se encontraron en la zona industrial, se identificó que la concentración de nutrientes y la degradación de los cuerpos de agua son directamente proporcionales a la densidad de la población y el establecimiento del sector industrial, en donde la presencia de coberturas con muy baja o nula permeabilidad y el aumento de la actividad antrópica generan una fuerte alteración en la calidad de las aguas de escorrentía. Asimismo, fue posible identificar que las zonas rurales tienen una influencia positiva en relación a la calidad del agua, puesto que las partes más altas de la cuenca albergan ecosistemas naturales y poco intervenidos que protegen la superficie del terreno, promoviendo la reducción de contaminantes que llegan a los cuerpos hídricos.

De forma particular, se observa una alta variabilidad de sólidos suspendidos totales en todos los monitoreos realizados, para los diferentes usos, especialmente en la zona residencial, lo cual puede relacionarse con la poda de prados y antejardines, lavado de vehículos y aceras, separación de residuos por parte de los recicladores en los bordes de las vías, ocasionando así una complejidad en el control de las actividades que se desarrollan en zonas residenciales, especialmente aquellas que afectan la concentración de dicho parámetro.

En términos generales se identificaron dos grandes agrupaciones entre los eventos de lluvia monitoreados, sin embargo, al incrementar la escala de agrupación se puede observar que dichos eventos se asocian de acuerdo con los usos del suelo de interés, encontrando particularmente los puntos industriales en un mismo grupo y otro grupo con los usos residencial y zona natural urbana, mostrando así la variabilidad que puede presentarse especialmente en zonas residenciales.

Se evidenció una alteración química en las aguas de escorrentía independiente del uso evaluado con respecto a la lluvia, sin embargo, mediante los análisis realizados fue posible corroborar que los puntos de muestreo tienen una tendencia de agrupación de acuerdo con los niveles de contaminación medidos en estos sitios, la cual varía levemente en los diferentes muestreos realizados por lo que a partir de los datos obtenidos no es posible predecir dicha alteración con un grado de certeza confiable, especialmente en una zona residencial, puesto que en esta zona en particular se desarrollan una amplia variedad de actividades antrópicas, como la construcción y/o adecuación de espacios, lavado de vías y aceras, jardinería, mantenimiento y/o reparación de vehículos de transporte, almacenamiento de residuos sólidos, entre otras. Por lo cual, es más estable en términos de la alteración química el impacto generado en la zona industrial en donde consistentemente se están desarrollando las mismas actividades.

Al analizar la calidad fisicoquímica de la quebrada Altavista fue posible identificar el impacto generado por el desarrollo de las actividades antrópicas en la cuenca, puesto que variables básicas de calidad del agua, tales como la DQO, la conductividad eléctrica y el nitrógeno total Kjeldahl presentan valores por encima de los rangos establecidos como objetivos de calidad representando condiciones de mala calidad. Dichas características se pueden asociar con las descargas de aguas de escorrentía puesto que de acuerdo con el análisis estadístico desarrollado y con base en las particularidades identificadas en el territorio, este medio constituye particularmente una fuente importante de metales pesados, nutrientes y sólidos suspendidos totales al medio acuático.

Mediante un adecuado procedimiento de caracterización de los contaminantes transportados por las aguas de escorrentía, se puede mejorar e incrementar el manejo, uso y aprovechamiento de dichas aguas, con el fin de disminuir el impacto negativo que éstas ejercen sobre los cuerpos de agua superficial y la presión generada por el alto consumo del agua, la cual en la subregión del Valle de Aburrá proviene de cuencas externas, generando una dependencia hídrica.

La evaluación de la relación existente entre las condiciones fisiográficas y actividades antrópicas con respecto a los fenómenos de precipitación y a los impactos que estos generan en la calidad del agua de la quebrada Altavista requiere de una gran variedad de información, la cual en algunas ocasiones no se encuentra actualizada o no es fácil de obtener. Adicionalmente, la lluvia es una variable con un comportamiento aleatorio, lo que

se convierte también en un factor limitante para la correcta ejecución de la metodología propuesta, razón por la cual se debe realizar un seguimiento continuo del estado del tiempo de la zona.

De acuerdo con los resultados obtenidos se encuentra que el análisis realizado abre la puerta a una cantidad de cuestionamientos en cuanto al impacto del uso del suelo en la composición química de las aguas de escorrentía, por lo cual se requiere un tiempo de muestreo mayor que involucre a su vez una mayor cantidad de variables.

Se deben realizar una mayor cantidad de estudios sobre las características de la escorrentía en zonas urbanas, debido a que el conocimiento sobre la acumulación y el lavado de contaminantes, la movilización de compuestos por las aguas pluviales y por ende la calidad del agua en sistemas superficiales influenciadas por contaminación mixta es limitado, lo cual condiciona a su vez las normas y políticas establecidas en el territorio en cuanto a la gestión hídrica, puesto que para la formulación de estrategias efectivas se requiere de una amplia recopilación y análisis de datos específicos de la zona de interés, de forma que permita establecer rangos específicos en la concentración de los principales contaminantes reportados en la calidad fisicoquímica de las aguas de escorrentía en vista que la normatividad actual vigente solo exige análisis y reporte para algunos de estos conllevando a visión limitada en la funcionalidad de los sistemas.

Asimismo, la generación de información específica del territorio permitirá comprender la variedad de compuestos, sus fuentes y las complejas interacciones entre estos, facilitando el desarrollo de modelos que bajo diferentes escenarios permitan identificar por ejemplo los efectos del cambio climático en la calidad de las aguas de escorrentía, representado en la alteración de las temporadas seca y lluvia, para de esta manera generar adecuadas estrategias de adaptación que promuevan la conservación de los ecosistemas.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Medellín. (2009). ATLAS, Planos Protocolizados. Plan de Ordenamiento Territorial. Acuerdo 46 de 2006. Municipio de Medellín. Medellín, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/3PcK2AT>.
- Alcaldía de Medellín, & Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. (2007). Formulación del plan integral de ordenamiento y manejo de la microcuenca Altavista. Medellín, Colombia.
- Al Masum, A., Bettman, N., Read, S., Hecker, M., Brinkmann, M. & McPhedran, K. (2022). Urban stormwater runoff pollutant loadings: GIS land use classification vs. sample-based predictions. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 45349–45363. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18876-x>.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2010). Atlas Metropolitano. Disponible en <https://bit.ly/2Q6GH7p>.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018a). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica - Río Aburrá. Medellín, Colombia.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018b). Programa para el mejoramiento integral de la microcuenca Altavista, Municipio de Medellín. Medellín, Colombia.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (sf). Área de recreación Cerro Nutibara. Municipio de Medellín. Medellín, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/3EBdY4a>.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia. (2011). Resumen ejecutivo proyecto Red de Monitoreo Ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburrá-Medellín – Fase III. Disponible en <https://bit.ly/2ma3mFw>.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia. (2018). Informe compendio del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) del río Aburrá-Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia. (2020). Calidad de Agua Superficial Informe Final. Medellín, Colombia. Disponible en <https://bit.ly/3aZK5Qx>.
- Barbosa, A., Fernandes, J. & David, L. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, Volume 46, Issue 20, 2012, Pages 6787-6798, ISSN 0043-1354. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>.
- Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., Kermadi, S. & Michel, K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology*, 485, 5–23. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.049>.
- Brown, J., Bell, C., Hogue, T., Higgins, C. & Selbig, W. (2019). An integrated statistical and deterministic hydrologic model for analyzing trace organic contaminants in commercial and high-density residential stormwater runoff. *Science of The Total Environment*,

Volume 673, 2019, Pages 656-667, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.327>.

Buitrago, N. (2011). Cuantificación y caracterización de la calidad de agua de escorrentía de techo para el prediseño de una piscina de retención en el campus de la Universidad Nacional de Colombia. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7698>.

Burns, D., Vitvar, T., McDonnell, J., Hassett, J., Duncan, J. & Kendall, C. (2005). Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA. *Journal of Hydrology*, Volume 311, Issues 1–4, 2005, Pages 266-281, ISSN 0022-1694. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.01.022>.

Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C., Davies, J.W. (2018). *Urban drainage*. CRC Press.

Choe, J., Bang, K & Lee, J. (2022). Characterization of surface runoff in urban areas. *Water Science and Technology*, Vol 45 No 9 pp 249–254. Disponible en <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0251>.

Choque, N. (2020). Caracterización y aceptabilidad de agua dosificada con Magnesio y Zinc. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú. Disponible en <https://bit.ly/3VTfoyy>.

Chow, V., Mays, L. & Maidment, D. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colombia.

Departamento Administrativo de Planeación. (2014). Revisión y Ajuste al Plan de Ordenamiento Territorial-Medellín. Disponible en <https://bit.ly/3VI1QpZ>.

Departamento Nacional de Estadística. (2019). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 - Valle de Aburrá. Disponible en <https://bit.ly/3HmWE6K>.

Du, Y., Song, K., Wang, Q., Li, S., Wen, Z., Liu, G., Tao, H., Shang, Y., Hou, J., Lyu, L. & Zhang, B. (2022). Total suspended solids characterization and management implications for lakes in East China. *Science of The Total Environment*, Volume 806, Part 4, 151374, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.bibliotecaitm.elogim.com/10.1016/j.scitotenv.2021.151374>.

Egodawatta, P., Thomas, E. & Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of The Total Environment*, Volume 407, Issue 6, 2009, Pages 1834-1841, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.027>.

Estupiñán, H. (2009). Metodología para modelar el sistema de drenaje incorporando los procesos de acumulación y lavado en una cuenca urbana. Campus Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. Disponible en <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11127>.

Garcés, L & Hernández, M. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *LASALLISTA de Investigación*, 1(2), 67–73. Disponible en <http://hdl.handle.net/10567/190>.

- García, V., Villegas, J., Suescún, D., Flórez, C., Merino, L., Betancur, T. & León, J. (2018). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1117–1129. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>.
- Giraldo, L. (2022). Aburrá- Medellín River Water Quality Space-Time Variation from the Electrical Conductivity and Its Use as an Indicator of Quality. *Revista EIA*, 19(38), Reia3805. pp. 1-20. Disponible en <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1525>.
- Gromaire, M., Garnaud, S., Saad, M. & Chebbo, G. (2001). Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, Volume 35, Issue 2, Pages 521-533, ISSN 0043-1354. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00261-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00261-X).
- Hobbie, S., Finlay, J., Janke, B. & Baker, L. (2017). Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(16):4177-4182. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.1618536114>.
- Hwang, H., Fiala, M., Park, D. & Wade, T. (2016). Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles. *International Journal of Urban Sciences*, 20(3), 334–360. Disponible en <https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1193041>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá D.C, Colombia. Disponible en <https://cutt.ly/L1RUYOH>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2007). *Levantamiento semidetallado de las coberturas terrestres, departamento de Antioquia*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Jacobson, C. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, Volume 92, Issue 6, 2011, Pages 1438-1448, ISSN 0301-4797. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018>.
- Jiménez, V. (2015). *Implantación de técnicas de drenaje sostenible de escorrentías de autopistas (TDSEA) en la comunidad autónoma de Galicia*. Universidade da Coruña. La Coruña, España. Disponible en <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/16456>.
- Kayhanian, M., Suverkropp, C., Ruby, A. & Tsay, K. (2007). Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environmental Management*, Volume 85, Issue 2, Pages 279-295, ISSN 0301-4797. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.09.024>.
- Kayhanian, M., Fruchtman, B. D., Gulliver, J. S., Montanaro, C., Ranieri, E. & Wuertz, S. (2012). Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. *Water Research*, 46(20), 6609–6624. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.026>.

- Leal, E., & Ossa, J. (2015). Soluciones y nuevos enfoques para el manejo de aguas lluvias o drenaje urbano sostenible al agua SUDS.
- Liu, A., Egodawatta, P., Guan, Y. & Goonetilleke, A. (2013). Influence of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. *Science of the Total Environment*, 444, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.053>.
- López, C. (2021). Medellín ha tenido 294 incendios en lo que va de 2021. *El Colombiano*. Disponible en <https://bit.ly/3HuZCCt>.
- Mallin, M., Johnson, V. & Ensign, S. (2009). Comparative impacts of stormwater runoff on water quality of an urban, a suburban, and a rural stream. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1–4), 475–491. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0644-4>.
- Maniquiz, M., Robles, M., Cruz, G., Reyes, N. & Kim, L. (2022). First Flush Stormwater Runoff in Urban Catchments: A Bibliometric and Comprehensive Review. *Hydrology*; 9(4):63. Disponible en <https://doi.org/10.3390/hydrology9040063>.
- McGrane, S. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13), 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>.
- Miller, J. & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12(January), 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>.
- Miller, J., Kim, H., Kjeldsen, T., Packman, J., Grebby, S. & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>.
- Müller, A., Österlund H., Marsalek, J. & Viklander M. (2019). The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of The Total Environment*. Volume 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136125>.
- Mooselu, M., Liltved, H., Hindar, A. & Amiri, H. (2022). Current European approaches in highway runoff management: A review. *Environmental Challenges*, Volume 7, 2022, 100464, ISSN 2667-0100. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100464>.
- Palleiro, L. (2016). Influencia de la escorrentía rural sobre el aporte de metales pesados y sedimentos al sistema fluvial: análisis a escala de cuenca. Universidad da Coruña. La Coruña, España. Disponible en <http://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/17841>.
- Pandey, R. & Raghubanshi, A. (2022). Impact of throughfall deposition and its runoff through different land use surfaces on the chemistry of Ganga water, Varanasi. *Limnology* 23, 111–125. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10201-021-00672-0>.

- Price, G., Stauber, J., Holland, A., Koppel, D., Van, E., Ryan, A. & Jolley, D. (2021). The Influence of pH on Zinc Lability and Toxicity to a Tropical Freshwater Microalga. In *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 40, Issue 10: 2836-2845. Disponible en <https://doi.org/10.1002/etc.5177>.
- Revitt, D., Ellis, J., Gilbert, N., Bryden, J. & Lundy, L. (2022). Development and application of an innovative approach to predicting pollutant concentrations in highway runoff. *Science of the Total Environment*, 825:153815. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153815>.
- Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis?. *Nature Biotechnology*, 26(3), 303–304. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nbt0308-303>.
- Rogora, M., Steingruber, S., Marchetto, A., Mosello, R., Giacomotti, P., Orru, A., Tartari, G. & Tiberti, R. (2022). Response of atmospheric deposition and surface water chemistry to the COVID-19 lockdown in an alpine area. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 62312–62329. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20080-w>.
- Roldán, G., & Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de la limnología Neotropical*. Universidad de Antioquia .
- Ruíz, M., Rubiano, N., González, A., Lulle, T., Bodnar, Y., Velázquez, S., Cuervo, S. & Castellanos, E. (2007). Ciudad, espacio y población : el proceso de urbanización en Colombia. Disponible en <https://bit.ly/3hgsSWj>.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del agua - Evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín.
- Simpson, I., Winston, R. & Brooker, M. (2022). Effects of land use, climate, and imperviousness on urban stormwater quality: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, Volume 809, 152206, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152206>.
- Suescún, D., Villegas, J., León, J., Flórez, C., García, V. & Correa, G. (2017). Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 17(3), 827–839. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1071-7>.
- Taka, M., Sillanpää, N., Niemi, T., Warsta, L., Kokkonen, T. & Setälä, H. (2022). Heavy metals from heavy land use? Spatio-temporal patterns of urban runoff metal loads. *Science of The Total Environment*, Volume 817, 152855, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152855>.
- Torres, A. (2004). *Apuntes de clase sobre hidrología urbana*. Pontificia Universidad Javeriana.

- Trujillo, J., Torres, M., Keesstra, S., Brevik, E. & Jiménez, R. (2016). Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses. *Science of The Total Environment*, Volume 553, 2016, Pages 636-642, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101>.
- Vélez, J. (2020). Does urbanization boost environmental impacts in Colombia? An extended STIRPAT–LCA approach. *Quality and Quantity*, 54(3), 851–866. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11135-019-00961-y>.
- Wijesiri, B., Egodawatta, P., McGree, J. & Goonetilleke, A. (2016). Influence of uncertainty inherent to heavy metal build-up and wash-off on stormwater quality. *Water Research*, Volume 91, 2016, Pages 264-276, ISSN 0043-1354. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.028>.
- Zafra, C., Temprano, J. & Suárez, J. (2017). A simplified method for determining potential heavy metal loads washed-off by stormwater runoff from road-deposited sediments. *Science of the Total Environment*, 601–602, 260–270. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.178>.
- Zafra, C. & Temprano, J. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana : metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía Contamination by urban superficial runoff: accumulated heavy metals on a road surface. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 27(1), 4–10. Disponible en <https://bit.ly/3YkAOqz>.
- Zeng, J., Han, G., Zhang, S., Xiao, X., Li, Y., Gao, X., Wang, D. & Qu, R. (2022). Rainwater chemical evolution driven by extreme rainfall in megacity: Implication for the urban air pollution source identification. *Journal of Cleaner Production*, Volume 372, 133732, ISSN 0959-6526. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133732>.
- Zeng, J, Han, G., Zhang, S. & Qu R. (2023). Nitrate dynamics and source identification of rainwater in Beijing during rainy season: Insight from dual isotopes and Bayesian model. *Science of The Total Environment*, Volume 856, Part 2, 159234, ISSN 0048-9697. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159234>.
- Zgheib, S., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2008). Screening of priority pollutants in urban stormwater: Innovative methodology. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 111(May 2014), 235–244. Disponible en <https://doi.org/10.2495/WP080231>.
- Zgheib, S., Moilleron, R. & Chebbo, G. (2011). Influence of the land use pattern on the concentrations and fluxes of priority pollutants in urban stormwater. *Water Science and Technology*, 64(7), 1450–1458. Disponible en <https://doi.org/10.2166/wst.2011.770>.
- Zgheib, Sally, Moilleron, R. & Chebbo, G. (2012). Priority pollutants in urban stormwater: Part 1 – Case of separate storm sewers. *Water Research*, Volume 46, Issue 20, 2012, Pages 6683-6692, ISSN 0043-1354. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.012>.

Zhang, J., Li, S. & Jiang, C. (2020). Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: Watershed versus riparian zone. *Ecological Indicators*, Volume 113, 2020, 106226, ISSN 1470-160X. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106226>.

Zhang, W., Li, T. & Dai, M. (2015). Influence of rainfall characteristics on pollutant wash-off for road catchments in urban Shanghai. *Ecological Engineering*, Volume 81, 2015, Pages 102-106, ISSN 0925-8574. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.016>.