

EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS METALES
PESADOS CROMO, NÍQUEL Y PLOMO EN EL RÍO OCOA, EN LA ZONA
COMPRENDIDA ENTRE LA DESEMBOCADURA DEL CAÑO MAIZARO HASTA
EL PUENTE MURUJUY, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO - META

IVON ALEJANDRA BABATIVA PULIDO
JUAN CARLOS CAICEDO MOLINA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE Cr, Ni Y Pb - RÍO OCOA

EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS METALES
PESADOS CROMO, NÍQUEL Y PLOMO EN EL RÍO OCOA, EN LA ZONA
COMPRENDIDA ENTRE LA DESEMBOCADURA DEL CAÑO MAIZARO HASTA
EL PUENTE MURUJUY, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO – META

IVON ALEJANDRA BABATIVA PULIDO
JUAN CARLOS CAICEDO MOLINA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero ambiental

Directora
YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Ingeniera Química
Magistra en Hidrosistemas

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2018

PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE Cr, Ni Y Pb - RÍO OCOA

Autoridades Académicas

P. Juan Ubaldo López Salamanca, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio Cortes Galledo, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Arturo Restrepo Restrepo, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Fernando Cajicá Gamboa, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón

Secretaria de División Sede Villavicencio

Yésica Natalia Mosquera Beltrán

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota De Aceptación

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Decano de Facultad

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN
Director Trabajo de Grado

MÓNICA HELENA RODRÍGUEZ MESA
Jurado

HENRY CONTRERAS LEÓN
Jurado

Villavicencio. Marzo de 2018

Contenido

	Pág.
Resumen	1
Introducción.....	3
Capítulo I.....	4
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general.	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Justificación	7
1.4 Alcance	9
Capítulo II	
Antecedentes y marco referencial.....	11
2.1 Antecedentes	11
2.2 Marco teórico.....	14
2.2.1 Metales pesados.....	14
2.2.2 Metales pesados en el agua.	17
2.3 Marco conceptual.....	18
2.3.1 Calidad del agua.	18
2.3.2 Toxicidad.....	18
2.3.3 Contaminación del agua.	18
2.3.4 Temperatura.	18
2.3.5 Potencial de hidrógeno (pH).	19
2.3.6 Conductividad.	19
2.3.7 Oxígeno disuelto.	19
2.3.8 Bioacumulación.....	19
2.3.9 Biodisponibilidad.	19
2.3.10 Espectrofotometría de absorción atómica de llama.....	20
2.4 Marco legal	20

PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE Cr, Ni Y Pb - RÍO OCOA

2.4.1 Constitución política de 1991.....	20
2.4.2 Decreto 2811 de 1974.	21
2.4.3 Decreto 1541 de 1978.	21
2.4.4 Decreto 1594 de 1984.	22
2.4.5 Resolución 2115 de 2007.	22
2.4.6 Organización Mundial de la Salud.	23
2.4.7 Agencia de Protección Ambiental.....	23
Capítulo III	
Metodología.....	24
3.1 Hipótesis	24
3.2 Diagrama metodológico.....	24
3.3 Área de estudio	25
3.4 Estaciones de muestreo	26
3.4.1 Estación 1: Aguas arriba de la desembocadura de caño Maizaro.	27
3.4.2 Estación 2: Aguas abajo de la desembocadura de caño Maizaro.	28
3.4.3 Estación 3: Punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y vertimiento de estación petrolera Apiay.....	29
3.4.4 Estación 4: Aguas arriba Vertimiento estación petrolera Apiay.	29
3.4.5 Estación 5: Aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay.....	30
3.4.6 Estación 6: Punto intermedio entre Vertimiento de estación petrolera Apiay y puente Murujuy.	31
3.4.7 Estación 7: Puente Murujuy.	31
3.5 Variables de estudio.....	32
3.6 Muestras.....	33
3.6.1 Tamaño de la muestra.	33
3.6.2 Recolección de muestras de agua.....	33
3.7 Tratamiento de los datos	34
3.7.1 Evaluación de la calidad del agua.	34
3.7.2 Análisis espacial.....	35
3.7.3 Análisis estadístico.....	35
3.7.4 Recomendaciones a entidades ambientales.....	35

PRESENCIA Y DISTRIBUCIÓN DE Cr, Ni Y Pb - RÍO OCOA

Capítulo IV

Resultados y discusión.....	36
4.1 Evaluación de la calidad del agua	36
4.2 Variación espacial de las concentraciones de metales pesados en el tramo de estudio	47
4.2.1 Fuentes de contaminación	48
4.3 Correlación de los metales pesados con las variables ambientales.....	51
4.4 Recomendaciones a entidades ambientales	57

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones.....	59
Referencias bibliográficas	62
Apéndices	69
Apéndice A. Plano 1. Variación espacial de las concentraciones de Cromo.....	69
Apéndice B. Plano 2. Variación espacial de las concentraciones de Níquel	69
Apéndice C. Plano 3. Variación espacial de las concentraciones de Plomo.....	69
Apéndice D. Plano 4. Fuentes de contaminación por metales pesados	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Criterio de calidad admisible para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna.....	22
Tabla 2. Valor máximo aceptable en el agua para consumo humano.	22
Tabla 3. Valor de referencia en el agua OMS	23
Tabla 4. Valor de referencia en el agua EPA	23
Tabla 5. Estaciones de muestreo.....	27
Tabla 6. Variables de estudio	32
Tabla 7 Resultados de parámetros in-situ y concentraciones de Cr, Ni y Pb para cada estación de muestreo en las épocas con precipitación alta y baja	37
Tabla 8. Cumplimiento y nivel de excedencia del Cromo	41
Tabla 9. Cumplimiento y nivel de excedencia del Níquel.....	41
Tabla 10. Cumplimiento y nivel de excedencia del Plomo	42
Tabla 11. Resultados de la correlación de Spearman entre Cromo y variables ambientales	52
Tabla 12. Resultados de la correlación de Spearman entre Níquel y variables ambientales	52
Tabla 13. Resultados de la correlación de Spearman entre Plomo y variables ambientales	53
Tabla 14. Desviación estándar de las concentraciones de Cr	54
Tabla 15. Desviación estándar de las concentraciones de Ni	55
Tabla 16. Desviación estándar de las concentraciones de Pb.....	55

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama metodológico. Por Ivon Babativa, 2018.	25
Figura 2. Ubicación del tramo de estudio - Río Ocoa. Por Juan Caicedo, 2018.	26
Figura 3. Estación aguas arriba de la desembocadura de caño Maizaro. Por Ivon Babativa, 2018.	28
Figura 4. Estación aguas abajo de la desembocadura de caño Maizaro. Por Ivon Babativa, 2018.	28
Figura 5. Estación punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y vertimiento de estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.	29
Figura 6. Estación aguas arriba Vertimiento estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.	30
Figura 7. Estación aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.	30
Figura 8. Estación punto intermedio entre Vertimiento de estación petrolera Apiay y puente Murujuy. Por Ivon Babativa, 2018.	31
Figura 9. Estación puente Murujuy. Por Ivon Babativa, 2018.	32
Figura 10. Contraste de Cromo total frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.	39
Figura 11. Contraste de Níquel frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.	39
Figura 12. Contraste de Plomo frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.	40

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Plano 1. Variación espacial de las concentraciones de Cromo.	69
Apéndice B. Plano 2. Variación espacial de las concentraciones de Níquel	69
Apéndice C. Plano 3. Variación espacial de las concentraciones de Plomo	69
Apéndice D. Plano 4. Fuentes de contaminación por metales pesados	69

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la concentración, distribución y relación con variables ambientales de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo en el río Ocoa, ubicado en el municipio de Villavicencio del departamento del Meta, en un tramo de 25 km aproximadamente, comprendido entre la desembocadura del Caño Maizaro hasta el puente Murujuy. Para tal fin, se establecieron dos muestreos en época con niveles de precipitación altos (>400 mm) y dos más para época con niveles de precipitación bajos (<100 mm). Las variables que se midieron en campo fueron temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto, la cuantificación de los metales pesados se realizó en un laboratorio certificado por el IDEAM a partir de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica por llama.

Las concentraciones máximas de los 3 metales estudiados ($0,063$ mgCr/l - $0,019$ mgNi/l - $0,049$ mgPb/l) estuvieron por encima de los límites permisibles establecidos por el decreto 1594 de 1984, el Cromo y el Plomo sobrepasaron los valores de referencia de la resolución 2115 de 2007 y la OMS; particularmente el Plomo supero el límite máximo de concentración señalado por la EPA. Se encontraron correlaciones significativas ($p < 0,05$) entre la presencia de Plomo y temperatura, pH y conductividad.

Se representaron espacialmente las concentraciones de los metales mediante mapas de distribución y en conjunto con los resultados se establecieron recomendaciones dirigidas a las entidades ambientales con el fin de abordar la problemática de contaminación por metales pesados a nivel de la cuenca.

Palabras claves: Metales pesados, Cromo, Níquel, Plomo, calidad del agua, contaminación del agua, variables ambientales.

Abstrac

The objective of this work is to evaluate the concentration, distribution and relationship with environmental variables of the heavy metals Chromium, Nickel and Lead in the Ocoa River, located in the municipality of Villavicencio in the department of Meta, in a stretch of approximately 25 km in the area between the mouth of the Maizaro Canal and the Murujuy Bridge. To this end, two samplings were established at a time with high levels of precipitation (> 400 mm) and two more at a time with low levels of precipitation (< 100 mm). The variables that were measured in the field were temperature, pH, conductivity and dissolved oxygen, the quantification of heavy metals was performed in a laboratory certified by the IDEAM based on the flame atomic absorption spectrophotometry technique.

The maximum concentrations of the 3 metals studied (0.063 mgCr/l - 0.019 mgNi/l - 0.049 mgPb/l) were above the permissible limits established by Decree 1594 of 1984, Chromium and Lead exceeded the reference values of Resolution 2115 of 2007 and OMS; particularly the Lead exceeded the maximum concentration limit indicated by the EPA. Significant correlations were found ($p < 0.05$) between the presence of lead and temperature, pH and conductivity.

The concentrations of the metals were spatially represented by distribution maps and, in conjunction with the results, recommendations were made to environmental entities in order to address the problem of heavy metal contamination at the regional level.

Keywords: Heavy metals, Chromium, Nickel, Lead, water quality, water pollution, environmental variables.

Introducción

Los metales pesados en el recurso hídrico se consideran como una de las formas más peligrosas de contaminación, debido a que, aún en bajas concentraciones representa un peligro potencial para la salud pública, por su facilidad de bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica (Mancera & Álvarez, 2006). Estas sustancias se encuentran de forma natural a través de los ciclos bioquímicos, sin embargo, las concentraciones en el ambiente pueden incrementar como consecuencia de las diferentes actividades antrópicas. Existen factores ambientales como la temperatura, el potencial de hidrogeno (pH), conductividad y oxígeno disuelto, que han demostrado ser determinantes en el comportamiento, la solubilidad y la distribución de los metales en el agua (Mero, 2010).

Desde esta premisa la presente investigación planteó determinar la concentración y relación Cromo, Níquel y Plomo con las variables ambientales - pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura - en el río Ocoa, debido a que existe evidencia que da razón de una posible alteración de la calidad de este cuerpo hídrico por la presencia de estos metales, los cuales normalmente son aporte de los vertimientos de origen doméstico e industrial, así como de la influencia de los factores mencionados en su movilización en el medio acuático.

Para ello, se establecieron 7 estaciones de muestreo a lo largo de la parte oriental del cuerpo hídrico, con el fin de determinar las concentraciones en época con niveles de precipitación altos y bajos. Finalmente, desde los resultados se establecieron recomendaciones a entidades ambientales que tiendan al aseguramiento de las condiciones de salud pública.

El contenido de la presente investigación está dividido en cinco capítulos. Capítulo I: planteamiento del problema, objetivos, justificación y alcance; capítulo II: Antecedentes y marco referencial; capítulo III: Metodología; en el capítulo IV: Resultados y discusión V: Conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I

1.1 Planteamiento del problema

Colombia tiene una de las mayores ofertas hídricas a nivel mundial, con un valor estimado de 57.000 m³/hab/año, lo cual es significativamente alto si se le compara con los promedios de Norte América, Europa, África y Asia con valores de 16.000, 6.500, 4.700 y 3.400 m³/hab/año, respectivamente (IDEAM, 2001), no obstante, este potencial hídrico se ha limitado principalmente por la descarga de aguas residuales domésticas, y de aguas generadas por las actividades productivas, tales como, la industria agrícola, petrolera y minera (Eduardo & Triana, 2007). Estas descargas deterioran las condiciones de calidad del recurso hídrico, las condiciones ambientales y por supuesto repercute en la salud pública.

Dentro de los aportes más críticos de los vertimientos sobre las fuentes hídricas, se encuentran los metales pesados debido a que poseen un alto grado de toxicidad, elevado nivel de persistencia y acelerada bioacumulación en los organismos vivos (Buenfil & Flores, 2007); el comportamiento de estos en el medio acuático se relaciona con diferentes factores ambientales como pH, temperatura (Mero, 2010), conductividad eléctrica (Solano Marín, 2006), entre otros, que afectan su disponibilidad, solubilidad, movilidad y toxicidad; características que, de acuerdo con Reyes, Vergara, Torres, Díaz, y González (2016) pueden producir efectos adversos a la salud pública de manera directa y afectaciones a todo el sistema acuático, razón por la cual se encuentran dentro de los principales causantes de contaminación del recurso hídrico (Edith Barba, 2002).

En Colombia los estudios que permiten identificar contaminación por metales pesados, son limitados en número y se enfocan principalmente en las regiones Andina (Combariza Bayona, 2009; Londoño Franco, 2014; Unidad de Planeación Minero Energética, 2006); Caribe (Marrugo, 2011) y Pacífico (Medina, Ayala, & Perea, 2011; Quesada Moreno, 2015), en donde se registran concentraciones que superan hasta en 34% los valores recomendados por la OMS para agua de consumo humano. Esta realidad pone en alerta autoridades

ambientales y a la academia, no solo por la evidente contaminación y sus efectos, sino por la falta de medición sistemática que permita tener un panorama de las condiciones de calidad de agua asociada a la presencia de metales pesados, al menos en las cuencas de mayor importancia a nivel nacional. Contar con la caracterización nacional es la base para la toma de posteriores decisiones que propendan por el aseguramiento de la salud pública.

Justamente, con base en los antecedentes, es importante reconocer que en la región Orinoquia los estudios técnico-científicos sobre identificación de metales pesados en el agua son escasos, no obstante, existen investigaciones que detectan concentraciones de Hg y Pb tanto en biota $< 95\mu\text{g/L}$ (González V, González R, Bedolla, Arrollo, & Manzanares, 2008; Guerra, Trujillo, Herrera, & Callejas, 2016; Mancera & Álvarez, 2006; Ortega, 2014) como en sedimentos $< 0.12\mu\text{g/g}$ (Trujillo et al., 2010), niveles que de acuerdo con la OMS (2006) pueden ocasionar enfermedades como colitis, gastritis hemorrágica, efectos neurotóxicos y cancerígenos, entre otros.

En cuanto a Villavicencio, a pesar de ser reconocida como una de las ciudades de esta región más representativas en desarrollo económico, posee una cantidad insuficiente de investigaciones que permitan dar razón del estado de contaminación por metales pesados en agua, lo cual es relevante, ya que dentro de su jurisdicción se encuentran 3 cuerpos de agua urbanos, de los que se destaca el río Ocoa por los múltiples usos y demandas que presenta; al atravesar parte del municipio permite con facilidad el desarrollo de actividades industriales y agropecuarias, así mismo, es receptor de 14 puntos de vertimientos ilegales (CORMACARENA, 2011b) y de los procesos de escorrentía urbana, los cuales están ligados con la contaminación por metales pesados de acuerdo al estudio realizado por Trujillo y Torres (2015).

El Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, refiere la calidad del agua en la parte oriental de la cuenca del río Ocoa -comprendida entre la desembocadura del caño Maizaro hasta el puente Murujuy- como “Buena”(CORMACARENA, 2011b), no obstante el monitoreo hidrobiológico y físico-químico del Observatorio de Políticas Públicas (Mejía, 2014) y el Plan de reconversión a tecnologías limpias de la estación Apiay de Ecopetrol

(Ecopetrol, 2015), ponen en duda esta afirmación al encontrar concentraciones de Níquel, Plomo y Cromo que sobrepasan los niveles de referencia nacionales e internacionales en más del 100%.

Si bien estos estudios son limitados en número, dejan claridad de una afectación en la calidad del agua del río Ocoa por presencia de metales pesados principalmente, Ni, Pb y Cr, a causa de los diferentes tipos de vertimientos que son incorporados en relación con las actividades socio-económicas que en su territorio se desarrollan. Por tal razón esta investigación desea determinar ¿Cuáles son las concentraciones de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo, su distribución y relación con variables ambientales* en el río Ocoa, en la zona comprendida entre la desembocadura del caño Maizaro hasta el puente Murujuy?

* Para efectos del presente trabajo se entenderá como variables ambientales: pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura y precipitación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

O.G. Evaluar la concentración, distribución y relación con variables ambientales de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo en el río Ocoa, en la zona comprendida entre la desembocadura del Caño Maizaro hasta el puente Murujuy, para establecer recomendaciones a entidades ambientales que tiendan al aseguramiento de las condiciones de salud pública.

1.2.2 Objetivos específicos.

O.E.1. Determinar la concentración de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo, para evaluar las condiciones de calidad de agua en términos de estos contaminantes frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio.

O.E.2. Analizar espacialmente la relación entre la concentración de los metales pesados estudiados y las fuentes de contaminación, a lo largo del tramo de estudio.

O.E.3. Evaluar la relación entre la concentración de los metales de pesados estudiados y las variables ambientales en el tramo de estudio.

O.E.4. Establecer recomendaciones dirigidas a entidades ambientales con base en los resultados obtenidos sobre presencia y distribución de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo en el tramo de estudio.

1.3 Justificación

Los metales pesados como el Cromo, Níquel y Plomo son sustancias con un alto grado de toxicidad (Molina, Aguilar, & Cordovez, 2010; Nava Ruíz & Méndez Armenta, 2011; Orroño, 2011), que se encuentran en situaciones u objetos cotidianos, así como, en procesos industriales y pueden ingresar a los sistemas acuáticos vía atmosférica, terrestre y directa.

Rodríguez (2013) refiere que el Plomo ingresa al medio acuático principalmente por la corrosión de tuberías y pinturas que contienen este elemento. Por su parte, Molina et al. (2010), refieren que el Cromo se encuentra comúnmente en colorantes, pigmentos, en el curtido de cuero, preservantes para maderas, inhibidores de corrosión y tóner para copadoras; su presencia sigue detectándose en suministros de agua potable. El Níquel está presente en actividades industriales como la producción de acero inoxidable o en grifos a nivel doméstico (OMS, 2006).

La presencia de estos metales en elementos de uso común y su inadecuada disposición, sumados a la descarga de aguas residuales, tanto industriales, como domésticas, sin tratamiento apropiado, puede aumentar la disponibilidad de dichas sustancias en el recurso hídrico, siendo una de las formas de contaminación más peligrosas, debido a que, aún en bajas concentraciones representan un peligro potencial para la salud pública (Reyes et al., 2016), por su facilidad de bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica (Mancera & Álvarez, 2006). A nivel mundial se han generado episodios de envenenamiento o intoxicación en países como México (González Valdez et al., 2008), Perú (Espinoza et al., 2003), Chile (Higueras et al., 2005) y Honduras (Félix Rivera, 1997), entre otros.

La exposición a cada uno de estos contaminantes puede generar graves afectaciones a la salud del hombre. Se ha demostrado que el Plomo puede ocasionar afectaciones cardiovasculares, renales y al sistema nervioso central (Molina et al., 2010); que las intoxicaciones por Cromo pueden provocar mutaciones en el tracto gastrointestinal, así como lesiones en los riñones (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), 1996); y en el caso del Níquel, la dermatitis alérgica es su efecto principal (Zaldua, Cambra, Onaindia, & Varela, 2010). Es importante resaltar que además de las afecciones antes mencionadas, al alterar las condiciones físico-químicas como pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto (Solano Marín, 2006), también ponen en riesgo el equilibrio ecosistémico (IDEAM, 2001), favoreciendo su movilización en el medio acuático (Arauzo, Rivera, Valladolid, Noreña, & Cedenilla, 2003).

El municipio de Villavicencio no es ajeno a la problemática mencionada, y sus cuerpos de agua superficiales se ven igualmente comprometidos por la contaminación; el Observatorio de Políticas Públicas (Mejía, 2014) de la ciudad refiere que el río Ocoa ha presentado un deterioro en su calidad en los últimos 20 años, consecuencia del desarrollo de procesos industriales y domésticos que han dado inadecuada disposición final de los residuos y vertimientos, como se ha mencionado, dichas actividades están directamente relacionadas con la descarga de este tipo de metales.

La investigación planteada pretende ofrecer en recurso hídrico una primera aproximación acerca de la afectación por este tipo de sustancias en la ciudad de Villavicencio, donde la población relacionada son aquellas personas quienes actualmente destinan las aguas de la parte oriental del río Ocoa a actividades domésticas, agrícolas, piscícolas, así como de pesca y silvicultura (CORMACARENA, 2011b); con el fin de articular esfuerzos entre las autoridades ambientales y la academia para generar alternativas que propendan a encontrar posibles soluciones. De igual forma se proyecta hacer una contribución a FOCALAE (Foro de Cooperación América Latina-Asia del Este), quienes tienen como uno de sus propósitos abordar la problemática de contaminación al recurso hídrico por metales pesados a nivel nacional, inicialmente a través del mapeo nacional de presencia y distribución de estos contaminantes.

1.4 Alcance

En términos espaciales el estudio se desarrolló en el río Ocoa que se localiza en el Norte del departamento del Meta, en la jurisdicción del municipio de Villavicencio; el tramo en el que se trabajó se encuentra en la parte oriental de la cuenca, en la zona comprendida entre la desembocadura del Caño Maizaro hasta el puente Murujuy, y se ha seleccionado por la clasificación que da el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico a su calidad de agua como “Buena” afirmación que se pone en duda por la identificación de 14 vertimientos ilegales de actividades domésticas, industriales y agropecuarias (CORMACARENA, 2011b), así como el hallazgo de concentraciones de Cromo, Plomo y Níquel por parte del Observatorio de Políticas Públicas del municipio (Mejía, 2014) y Ecopetrol (Ecopetrol, 2015).

La población a quien va dirigido el presente estudio son las entidades ambientales y la academia, con el fin de articular esfuerzos para abordar la problemática local de contaminación por metales pesados. Con lo anterior se pretende generar a futuro medidas de manejo adecuado del recurso encaminadas a las fuentes generadoras de vertimientos, así como soluciones a los habitantes de las veredas Caños Negros, Apiay, La Llanerita, San Juan Bosco, Santa Helena Baja, Peralonso, El Guamo e Indostán, quienes actualmente destinan las aguas del río Ocoa al desarrollo de actividades domésticas, agrícolas, piscícolas, así como de pesca y silvicultura (CORMACARENA, 2011b).

Se monitorearon concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo, además de parámetros físico-químicos como pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura, debido a que son variables que se relacionan con la presencia de estas sustancias (Solano Marín, 2006), y qué favorecen su movilidad en el medio acuático (Arauzo et al., 2003).

En cuanto a la parte de temporal, la evaluación de las concentraciones de los metales mencionados se llevó a cabo tanto en el segundo semestre del año 2017 como en el primer semestre del año 2018, en los días 27-28 de octubre y 8 de noviembre, periodo en el que para efectos de este trabajo se clasifica como época con niveles de precipitación altos -con valores > 400 mm- (IDEAM, 2017); así como los días 6 y 13 de febrero, periodo en el que para el

estudio se denomina como época con niveles de precipitación bajos -con valores < 100 mm- (IDEAM, 2018), anterior con base en lo reportado por el IDEAM (2011) para el municipio de Villavicencio.

Capítulo II

Antecedentes y marco referencial

2.1 Antecedentes

La presencia de metales pesados como el Cromo, Níquel y Plomo en cuerpos hídricos representan un peligro potencial tanto para la salud pública, como para el equilibrio ecosistémico (IDEAM, 2001), es por esto que a nivel internacional se adelantan estudios que permitan identificar el estado de las fuentes hídricas en relación a la contaminación por estas sustancias.

En España, por efecto del aporte de aguas residuales urbanas e industriales en el río Jarama se han registrado concentraciones de Cromo en sus formas total y hexavalente que llegan hasta 0,1 mg/l, las cuales superan hasta en 100% los niveles de referencia establecidos por el Real Decreto 995 de 2000 de Madrid, y en más del 100% los valores establecidos por la W.A. EPA para aguas superficiales (Arauzo et al., 2003). De igual forma en el estudio de movilidad de los metales pesados, se correlacionan las concentraciones de variables ambientales como conductividad eléctrica y pH para determinar la influencia de estas frente al Cromo y Plomo que son solubles en aguas de escorrentía (Solano Marín, 2006). La importancia de estos estudios en torno al presente trabajo radica en que soportan que las aguas residuales de origen urbano e industrial contribuyen en la presencia de los metales pesados en el recurso hídrico, así como en la relación de existente entre las variables ambientales y la solubilidad de los metales.

Por otra parte, en países como México (Buenfil & Flores, 2007) y Perú (Huaranga M, Méndez, Quilcat, & Huaranga A, 2012) se detectaron concentraciones de Plomo en agua que llegan hasta 1,97 mg/l en los Ríos Hondo y Moche, atribuidas principalmente a actividad agrícola y las aguas residuales industriales; Buenfil y Flores (2007), luego de haber realizado su estudio en la columna de agua, resaltan que debido a fenómenos de disolución, corrientes y el constante flujo, se espera que las concentraciones de metales pesados sean mucho

mayores en sedimentos ya que por su condición de bioacumulación se alojan de forma fácil en la materia orgánica. Se destaca de los estudios mencionados el aporte de metales que representa la actividad agrícola e industrial, así como la naturaleza de acumulación de estos contaminantes en los sedimentos, contribuye para el análisis de los resultados, principalmente de Pb.

En Cuba los valores de Plomo en sedimentos presentaron concentraciones que llegan hasta 0,217 mg/g, estas fueron asociadas por los autores como el resultado de la actividad urbana y el manejo inadecuado del vertedero de residuos sólidos aledaño al cuerpo hídrico (Cazorla, Olivares-Rieumont, Columbie, Mederos, & Castillo, 2005). En República Dominicana (Contreras, Mendoza, & Gómez, 2004) se determinó que las concentraciones más altas de Cromo, Níquel y Plomo en sedimento tuvieron valores de 0,184 mg/g – 0,0736 mg/g – 0,273 mg/g respectivamente, siendo igualmente aporte de vertimientos domésticos e industriales. Se toman como referentes para el presente estudio debido a que ratifican la contribución de los vertimientos domésticos y el manejo inadecuado de los residuos a la problemática de contaminación por metales estudiados en este trabajo.

A nivel nacional y regional los estudios de detección de metales pesados se han enfocado principalmente en la detección de Mercurio en peces de interés comercial, (Ortega, 2014) y (Guerra et al., 2016) encuentran concentraciones de Mercurio que llegan hasta 0,00351 mg/g en peces extraídos de la cuenca Orinoco, hecho que se relaciona con el vertido de aguas residuales de minería aurífera y agroquímicos; Trujillo et al. (2010) encontraron concentraciones de Mercurio con valores máximos de 0,00129 mg/g en el punto de muestreo localizado en Puerto López – Meta lo cual se relacionó con la explotación aurífera cercana; y finalmente González et al. (2014) al evaluar los marcadores de exposición a contaminantes determinaron concentraciones entre 82µg/l de Plomo en sangre, atribuidas posiblemente a hidrocarburos pesados y livianos, pesticidas, soldadura, pinturas, entre otras causas. Estos referentes exponen la limitación en número y cobertura geográfica en cuanto a la situación de contaminación en la región de la Orinoquia.

El estudio realizado en la cuenca baja del río Sinú, en el departamento de Córdoba, es un antecedente fundamental para el presente estudio debido a que se determinaron concentraciones en agua de Cromo que llegan hasta 0,1 mg/l, Níquel con valor máximo de 0,8 mg/l y Plomo de hasta 0,03 mg/l, las cuales se asocian a vertimientos de aguas servidas producto de núcleos poblacionales, de actividades agrícolas e industriales que se desarrollan aledañas al área de estudio. De este referente se destaca el manejo dado a los valores que se encuentran por debajo del límite de detección, cuando fue necesario involucrarlos se utilizó un valor igual a la mitad del mismo; de igual forma se implementó un mapeo en el que se evidenció la variación de las concentraciones de los metales estudiados (Marrugo, 2011).

Ahora bien, para la ciudad de Villavicencio, con base en los antecedentes logrados, es importante reconocer que los estudios técnico-científicos publicados son limitados en número, sin embargo, dentro de los existentes se encuentran el monitoreo hidrobiológico y físico-químico (Mejía, 2014) donde se identifica que las concentraciones de Níquel con valor de 85µg/l en la zona de vertimientos industriales del río Ocoa están por encima de los valores máximos permisibles establecidos por el decreto 1594 de 1984, así como el trabajo de Trujillo y Torres (2015) en el cual se identificaron concentraciones de Plomo < 40791,8µg/g - Cromo < 115, 3µg/g - Níquel < 123,3µg/g en sedimentos viales de 3 sectores de la ciudad, de igual forma mencionan que la presencia de estas concentraciones pueden afectar los cuerpos hídricos aledaños por procesos de escorrentía urbana.

De acuerdo a los estudios presentados anteriormente se hace evidente que la problemática de contaminación por metales pesados es de escala global, que el desarrollo de estudios que den razón del comportamiento de estas sustancias en los medios acuático, terrestre y aéreo es de suma importancia ya que permiten conocer la interacción existente entre los mismos y consecuentemente abren la posibilidad de adelantar medidas de manejo de acuerdo a los requerimientos según las condiciones propias de cada región.

Para efectos del presente trabajo se ha decidido trabajar sobre el medio acuático, tanto por el manejo inadecuado que actualmente se ha dado a este recurso en la ciudad de Villavicencio en el que se destaca la descarga de aguas residuales mixtas -tanto domésticas como

industriales-, como por el requerimiento local de investigaciones enfocadas en el mismo. Por su parte el río Ocoa, presenta características bastante similares a las de los ríos expuestos en los antecedentes, razón por la que se destacan los mismos, de igual forma, este estudio pretende ser uno de los principales aportes a la necesidad evidente de trabajos que den razón de la actual contaminación por metales pesados a nivel regional –Orinoquia Colombiana-.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Metales pesados.

Se consideran metales pesados a aquellos elementos químicos cuyo número atómico es superior a 20 y la densidad igual o mayor a 5g/cm^3 (Yagnentkovsky, 2011). La presencia de estas sustancias en los sistemas acuáticos está asociada naturalmente a los ciclos biológicos y geoquímicos, no obstante, la concentración es alterada por la intervención antrópica, producto principalmente del desarrollo de actividades productivas como la industria minera, petrolera, agropecuaria, entre otras (Chata, 2015; Cordero, 2015).

Los metales pesados se dividen en dos grupos:

- Los Micronutrientes: En este grupo encontramos As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, V, Zn, en pequeñas cantidades son esenciales en los animales y humanos para su desarrollo, sin embargo, en concentraciones más altas son tóxicos (Marrugo, 2011).
- Metales pesados no esenciales: En este grupo encontramos Be, Cd, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Ti, en bajas concentraciones son altamente tóxicos para el organismo, debido a que tienen la propiedad de bioacumularse y permanecer en el ambiente (Marrugo, 2011).

Para los efectos del presente estudio, se trabajarán estrictamente con los metales Cromo, Níquel y Plomo, por las razones referentes en el capítulo I.

2.2.1.1 Cromo.

El Cromo (Cr) es un metal de amplia utilización industrial y, además, se encuentra en los combustibles fósiles, por lo que se libera en grandes cantidades con su combustión. Sus compuestos se encuentran entre los más tóxicos desde el punto de vista ambiental, provocando efectos carcinógenos y mutagénicos (Lozano, 2010). El cromo (0), cromo (III) y cromo (VI) son las formas más comunes en las que se encuentra este elemento (Molina et al., 2010).

Las altas concentraciones de cromo en el ambiente se deben a las emisiones industriales, las descargas de efluentes industriales, la combustión de combustible fósil y la incineración de los sólidos municipales (Sarmiento Viteri, 2013). Los efectos que tiene en la salud dependen de la concentración al momento de la exposición y la solubilidad del elemento; el Cromo (III) ocasiona irritación en los ojos y en el tracto respiratorio, en cuanto al Cromo (VI) es altamente tóxico para la salud de los humanos, principalmente, para la población que tiene una mayor exposición, como los fumadores de tabaco y los que trabajan en la industria textil y del acero (Molina et al., 2010). Según las guías para la calidad del agua potable de la OMS (2006) el valor de referencia para el Cr es de 0,05 mg/l.

2.2.1.2 Níquel.

El Níquel (Ni) es un elemento metálico que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre. Debido a sus propiedades fisicoquímicas es comúnmente utilizado en la industria moderna (Marrugo, 2011). Dentro de las fuentes más importantes del níquel se encuentran las cenizas producidas en la combustión del carbón, los residuos de la fundición de este elemento y los residuos urbanos. Los riesgos que puede sufrir el hombre al estar expuesto a los compuestos del níquel se dividen en tres categorías: (a) alergias; (b) rinitis, sinusitis y enfermedades respiratorias; (c) cánceres de las cavidades nasales, de pulmón y de otros órganos (Cerón, 2015). Según las guías para la calidad del agua potable de la OMS (2006) el valor de referencia para el Ni es de 0,07 mg/l.

2.2.1.3 Plomo.

El Plomo (Pb) es un metal gris-azulado que se encuentra naturalmente en grandes cantidades en la corteza terrestre (Cordero, 2015), hace parte de los metales pesados con mayor peligro ambiental, ya que se utiliza de forma masiva en procesos industriales y algunas de sus formas químicas poseen una elevada toxicidad (Marrugo, 2011); es un importante veneno que se acumula en el organismo. Las aguas naturales rara vez contienen por encima de 5 µg/l, aunque se ha informado sobre valores mucho más altos (APHA-AWWA-WPCFT, 2013). Según las guías para la calidad del agua potable de la OMS (2006) el valor de referencia para el Pb es de 0.01 mg/l.

Actualmente es un tema prioritario, principalmente en los países industrializados, debido a que su toxicidad puede llegar a afectar los órganos y los sistemas como el sistema nervioso, renal, entre otros (Combariza Bayona, 2009); por otro lado, la exposición constante puede llegar a aumentar los trastornos de conducta y disminuir la función cognitiva (Pájaro & Sánchez, 2016).

2.2.1.4 Toxicidad de los metales pesados.

Este tipo de contaminantes son catalogados como sustancias tóxicas debido a los efectos nocivos que causan en los organismos (Lozano, 2010) y su toxicidad depende de tres factores principales: Biodisponibilidad, que está relacionada directamente con las condiciones físico-químicas del ambiente; persistencia, que se refiere a la duración en el medio; y bioacumulación, el cual consiste en un aumento creciente de la cantidad de sustancia en los tejidos de un organismo, y está determinado por la naturaleza química del contaminante, la temperatura del agua y la salinidad (Coto, 2013; Rubio, Calderón, Gualtero, Acosta, & Rojas, 2015).

2.2.2 Metales pesados en el agua.

La contaminación por metales pesados, por sus bajos niveles de biodegradabilidad se ha considerado como una de las formas más peligrosas para los ecosistemas acuáticos, ya que tienden a acumularse en los tejidos de animales y plantas, generando alteraciones metabólicas, transformaciones anatómicas y mutaciones, que afectan de manera directa al hombre (Rubio et al., 2015).

Existen algunos factores que inciden en el comportamiento de los metales pesados en el medio acuático, dentro de ellos se destacan el pH debido a que en condiciones ácidas estas sustancias aumentan tanto la disponibilidad, como su solubilidad y absorción (Combariza Bayona, 2009); por otra parte, la temperatura y el oxígeno disuelto en el agua son determinantes en la solubilidad, distribución y estado fisiológico de la biota, lo cual se refleja en el grado de toxicidad (Mero, 2010).

En los sistemas acuáticos, la toxicidad de los compuestos de Cromo varía de acuerdo a la temperatura y el pH, así mismo, el Cromo hexavalente se caracteriza por su fácil disolución en el agua y por su reducción a Cromo trivalente en presencia de materia orgánica oxidable, este último posee mayor estabilidad (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), 1996).

Por su parte, el Níquel se destaca por ser insoluble en el agua, sin embargo, la forma en la que pueda encontrarse en este medio está relacionada con el pH, generalmente los valores de esta sustancia detectados en aguas superficiales se presentan como níquel total ya que hasta ahora no existe conocimiento de algún compuesto de Níquel exclusivo en el recurso hídrico (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), 1996).

El Plomo igualmente es insoluble en agua, característica relevante ya que gracias a ella se precipita y es adherido por los sedimentos y partículas en suspensión, la presencia de esta sustancia interfiere en la oxidación bioquímica de las sustancias orgánicas (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), 1996).

2.3 Marco conceptual

A continuación, se muestran algunos conceptos relevantes para el estudio de metales pesados, su disponibilidad, distribución y relación con variables ambientales:

2.3.1 Calidad del agua.

“Es el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia” (Ministerio de La Protección Social, 2007,2).

2.3.2 Toxicidad.

Es una medida que permite identificar lo nocivo que puede ser una sustancia al tener contacto con un organismo vivo, la toxicidad depende del tiempo y cantidad de exposición y por último de la vía de administración (Cordero, 2015).

2.3.3 Contaminación del agua.

Sucede cuando la composición física, química y biológica del agua ha sido alterada por sustancias tóxicas de manera directa o indirecta, teniendo un efecto dañino en los seres vivos (Chata, 2015).

2.3.4 Temperatura.

La temperatura refleja la cantidad de calor que un cuerpo de agua puede llegar a absorber e influye en diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos (Cerón, 2015).

2.3.5 Potencial de hidrógeno (pH).

Mide la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ presentes en el agua y determina la naturaleza ácida o básica de dicha solución; la escala de medición va desde 0,0 siendo el valor más ácido y 14,0 el valor más básico (Cerón, 2015).

2.3.6 Conductividad.

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir la electricidad. Indica la cantidad total de iones presentes en el agua. Se expresa en micro Siemens por centímetro ($\mu S/cm$) (Cerón, 2015).

2.3.7 Oxígeno disuelto.

Es la cantidad de oxígeno que se encuentra en el agua, los valores normales varían entre los 7.0 y 8.0mg/L. El oxígeno procede del aire, el cual se disuelve en el agua por la turbulencia de los ríos (Avecillas, 2014).

2.3.8 Bioacumulación.

Proceso que consiste en la acumulación de algunas sustancias en el tejido vivo, este proceso se relaciona con las características fisiológicas y bioquímicas de los organismos (Pájaro & Sánchez, 2016).

2.3.9 Biodisponibilidad.

Grado de absorción y accesibilidad de ciertas sustancias hacia los seres vivos, este proceso se determina a partir de los factores fisicoquímicos (Coto, 2013).

2.3.10 Espectrofotometría de absorción atómica de llama.

Método que consiste en medir las especies atómicas por su absorción a una longitud de onda, que refleja la concentración de cada metal en la muestra. La sensibilidad de la espectrometría de absorción atómica de llama se define como la concentración de metal que produce una absorción de 1 por 100 (una absorbancia de aproximadamente 0,0044). El límite de detección del instrumento se define como la concentración que produce una absorción equivalente al doble de la magnitud de la fluctuación del fondo. La sensibilidad y los límites de detección varían con el instrumento, el elemento determinado, la complejidad de la matriz y la técnica seleccionada (APHA-AWWA-WPCFT, 2013).

2.4 Marco legal

Para dar contexto legal a la ejecución del proyecto, se exponen las normas nacionales e internacionales que incentivan la realización de proyectos que propendan la generación de información de carácter ambiental en términos de metales pesados para la toma de posteriores decisiones que permitan dar solución a la problemática de contaminación causada por este tipo de sustancias.

2.4.1 Constitución política de 1991.

- Art.79 Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.
- Art.80 El estado deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental.
- Art.95 Son deberes de la persona y del ciudadano proteger los recursos culturales y naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano.

2.4.2 Decreto 2811 de 1974.

Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

- Art.134 Para garantizar la calidad del agua para consumo humano y sus demás usos el estado deberá promover y fomentar la investigación y el análisis permanente de las aguas interiores.
- Art.135 Para comprobar la existencia y efectividad de los sistemas empleados, se someterán a control periódico las industrias o actividades que, por su naturaleza, puedan contaminar las aguas.
- Art.137 Serán objeto de protección y control especial las aguas destinadas al consumo doméstico humano y animal y a la producción de alimentos.
- Art.138 Se fijarán zonas en que quede prohibido descargar, sin tratamiento previo y en concentraciones que sobrepasen los niveles admisibles, aguas negras o residuales de fuentes industriales o domésticas, urbanas o rurales, en las aguas superficiales.

2.4.3 Decreto 1541 de 1978.

Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

- Art.211 Se prohíbe verter, residuos sólidos, líquidos o gaseosos, que puedan contaminar las aguas, causar daño o poner en peligro la salud humana o el desarrollo de la flora o fauna, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos.

2.4.4 Decreto 1594 de 1984.

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

- Art 45. Destinación de preservación de flora y fauna.

Tabla 1.

Criterio de calidad admisible para la destinación del recurso para preservación de flora y fauna.

Cromo (mg/l)	Níquel (mg/l)	Plomo (mg/l)
0,01	0,01	0,01

Nota: Valores máximos para la protección de flora y fauna del decreto 1594 de 1984. Por Ivon Babativa, 2018.

2.4.5 Resolución 2115 de 2007.

Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

- Art 5. Características químicas de sustancias que tienen efecto adverso en la salud humana.

Tabla 2.

Valor máximo aceptable en el agua para consumo humano.

Cromo (mg/l)	Níquel (mg/l)	Plomo (mg/l)
0,05	0,02	0,01

Nota: Valores de referencia de la Resolución 2115 de 2007. Por Ivon Babativa, 2018.

2.4.6 Organización Mundial de la Salud.

Según las guías para la calidad del agua potable de la OMS estos son los valores de referencia para Cromo, Níquel y Plomo.

Tabla 3.

Valor de referencia en el agua OMS.

Cromo (mg/l)	Níquel (mg/l)	Plomo (mg/l)
0,05	0,07	0,01

Nota: Valores máximos para consumo humano de la OMS. Por Ivon Babativa, 2018.

2.4.7 Agencia de Protección Ambiental.

Valores de referencia extraídos de los Reglamentos Nacionales de Agua Potable Primarios de la EPA.

Tabla 4.

Valor de referencia en el agua EPA.

Cromo (mg/l)	Plomo (mg/l)
0,1	0,015

Nota: Valores máximos para consumo humano de la EPA. Por Ivon Babativa, 2018.

Capítulo III

Metodología

La investigación se enmarcó en un estudio no experimental, en el que no se registra ninguna manipulación de las variables a estudiar o las muestras de agua que representan las características del río Ocoa. Como factor de diseño se establece la variación de las concentraciones de metales pesados con las condiciones medio ambientales (temperatura, potencial de Hidrogeno, conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto y precipitación).

3.1 Hipótesis

Las concentraciones y distribución de Cromo, Níquel y Plomo, varían según las condiciones de las variables ambientales -pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura, - en el tramo a evaluar del río Ocoa, sobrepasando los límites máximos permisibles de la normatividad.

3.2 Diagrama metodológico

En la Figura 1 se puede observar el flujograma de proceso que resume la ejecución de la metodología.

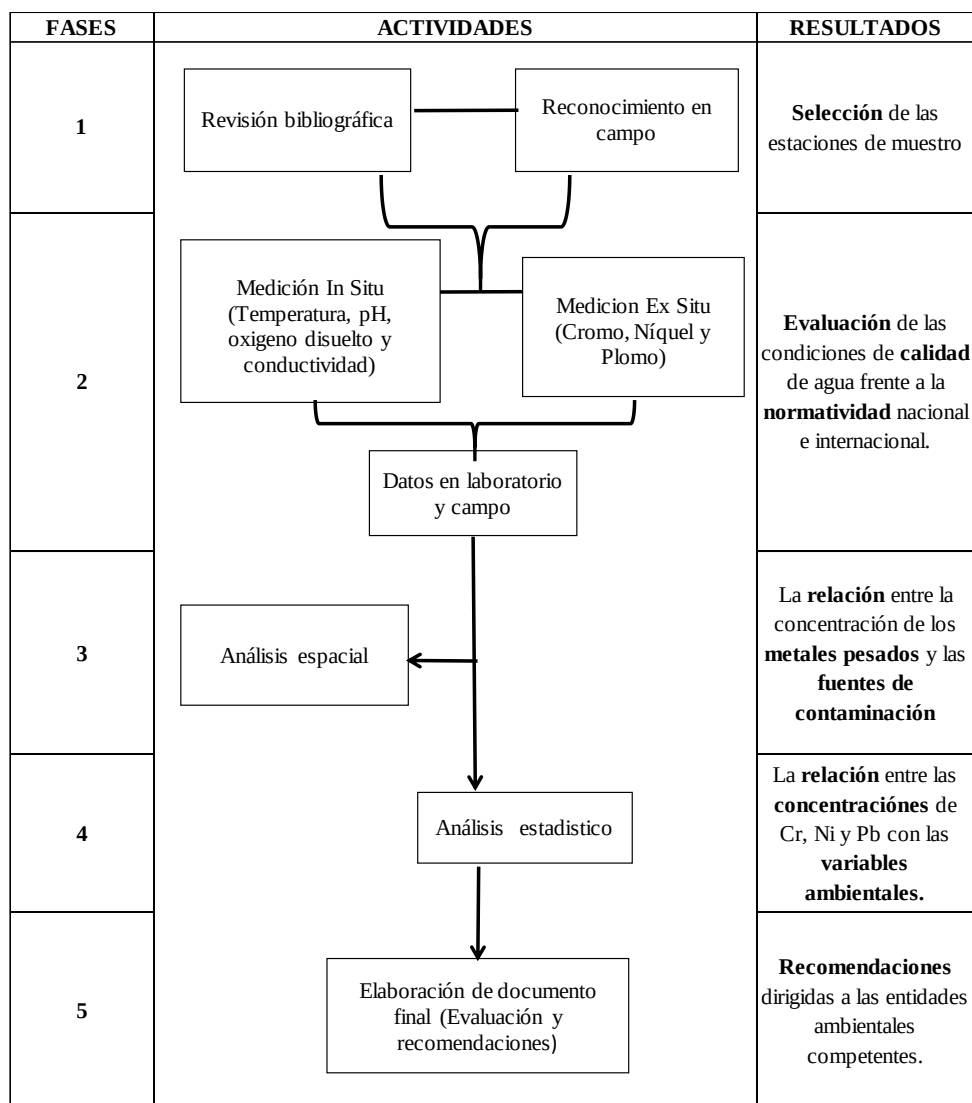


Figura 1. Diagrama metodológico. Por Ivon Babativa, 2018.

3.3 Área de estudio

Como se observa en la Figura 2, el estudio se llevó a cabo sobre el río Ocoa, que se encuentra ubicado en el Norte del departamento del Meta, en la jurisdicción del municipio de Villavicencio. El tramo de estudio cuenta con una longitud de 25 km y se ubica desde la desembocadura del Caño Maizaro hasta el puente Murujuy, comprendido entre las coordenadas 04° 06' y 04° 07' de latitud Norte y entre 73° 30' y 73° 16' de longitud Oeste. Esta zona se encuentra en área rural; se destaca por la actividad extractora de material de

arrastre en su cauce y por ser receptora de vertimientos de origen industrial, producto de la estación petrolera Apiay.

Las condiciones climáticas del área de estudio, en términos de temperatura y precipitación media anual, presentan un promedio de 26°C y de 3715,8 mm/año respectivamente, con niveles inferiores de lluvia en los meses de enero y febrero, en los que existe una mayor demanda agrícola de agua y menores caudales en el cauce, caso contrario en los meses de mayo y junio que presentan mayor volumen de precipitación (CORMACARENA, 2011b). Para efectos del presente estudio se consideran precipitación alta los meses de octubre y noviembre con valores > 400 mm (IDEAM, 2017) y baja precipitación el mes de febrero con valores < 100 mm (IDEAM, 2018), lo anterior con base en lo reportado por el IDEAM para el municipio de Villavicencio.



Figura 2. Ubicación del tramo de estudio - Río Ocoa. Por Juan Caicedo, 2018.

3.4 Estaciones de muestreo

El procedimiento de selección de las estaciones de muestreo se realizó mediante la revisión de información secundaria y el reconocimiento en campo realizado entre los días 23 al 25 de agosto del 2017. Para determinar las estaciones, se tuvieron en cuenta los siguientes principios: puntos más susceptibles de presentar altos niveles de contaminación, facilidad de acceso y distribución que cubriera las zonas más representativas a lo largo del tramo de estudio.

A continuación, se muestran en la Tabla 5 los puntos de muestreo seleccionados para el tramo de estudio del Río Ocoa. Georreferenciados con el GPS Garmin de referencia Map 64s.

Tabla 5.

Estaciones de muestreo.

ESTACIÓN	UBICACIÓN	COORDENADAS	
		N	W
E1	Aguas arriba de la desembocadura de caño Maizaro	946224	1062808
E2	Aguas abajo de la desembocadura de caño Maizaro	946251	1063147
E3	Punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y Vertimiento de estación petrolera Apiay	946854	1069753
E4	Aguas arriba Vertimiento estación petrolera Apiay	946619	1077050
E5	Aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay	946722	1077442
E6	Punto intermedio entre Vertimiento de estación petrolera Apiay y puente Murujuy	946480	1083112
E7	Puente Murujuy	947915	1088998

Nota: Nombre y ubicación de las estaciones de muestreo en el tramo de estudio. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.1 Estación 1: Aguas arriba de la desembocadura de caño Maizaro.

Uno de los puntos de mayor importancia dentro del tramo fue precisamente la desembocadura del caño Maizaro debido a que es receptor de vertimientos domésticos e industriales, por tal razón se hizo fundamental conocer las condiciones en las que se encontraba el río Ocoa aguas arriba de este afluente antes de recibir algún posible aporte de los metales objeto de estudio, para ello se estableció la primera estación de muestro aproximadamente a 30 metros de la intersección. Las observaciones generales de esta estación destacan la presencia de residuos sólidos esparcidos en toda el área, tanto en el cauce del afluente como en la ribera del río (ver Figura 3).



Figura 3. Estación aguas arriba de la desembocadura de caño Maizaro. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.2 Estación 2: Aguas abajo de la desembocadura de caño Maizaro.

La segunda estación de muestreo se ubicó aproximadamente a 300 metros aguas debajo de la desembocadura de la intersección de ambos cuerpos de agua, la zona se caracteriza igualmente por la presencia de residuos sólidos en su cauce. Se planteó esta estación con el fin de determinar si la recepción de las aguas del caño Maizaro podría generar un aumento en las posibles concentraciones de Plomo, Níquel y Cromo, al ser también este afluente receptor de vertimientos de urbanos (ver Figura 4).



Figura 4. Estación aguas abajo de la desembocadura de caño Maizaro. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.3 Estación 3: Punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y vertimiento de estación petrolera Apiay.

Se ubica aproximadamente a 6 kilómetros aguas abajo de la estación 2. Se destaca que en el tramo comprendido entre la segunda y tercera estación desembocan el caño Lapa, que se localiza en parte del límite de expansión urbana y la vereda Caños Negros; y el caño Piñalito que pasa por el centro poblado Barcelona, vereda la Llanerita y Apiay, razón por la que se toman como posible aporte de metales pesados (ver Figura 5).



Figura 5. Estación punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y vertimiento de estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.4 Estación 4: Aguas arriba Vertimiento estación petrolera Apiay.

Otro de los puntos fundamentales dentro del tramo es el vertimiento de la estación Apiay de Ecopetrol ya que en su plan de reconversión a tecnologías limpias existe evidencia de Cr, Ni y Pb sobre el río Ocoa, al igual que en la estación 1 se hacía necesario conocer las condiciones del agua antes de la descarga de aguas residuales para identificar un posible aporte de los contaminantes estudiados; la medición se realizó aproximadamente a 300 metros aguas arriba del vertimiento. Esta zona se caracteriza por el desarrollo de actividad minera -extracción de material de arrastre- (ver Figura 6).



Figura 6. Estación aguas arriba Vertimiento estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.5 Estación 5: Aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay.

Punto de muestreo ubicado aproximadamente a 100 metros aguas abajo del vertimiento de la estación petrolera. Se toma esta estación con el fin de conocer si la descarga genera un aporte significativo a las concentraciones de los metales presentes en el río. Durante el periodo del presente estudio hubo un cambio en la zona de descargue. Inicialmente era superficial (fácilmente visible), a través de tubería, posteriormente se realiza subsuperficialmente. Por otra parte, durante el segundo muestreo se observaron a operadores al parecer funcionarios de la entidad, realizando limpieza al material de arrastre, el cual se caracteriza por tener adherida una sustancia de tonalidad oscura (ver Figura 7).



Figura 7. Estación aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.6 Estación 6: Punto intermedio entre Vertimiento de estación petrolera Apiay y puente Murujuy.

Cubre parte de la zona comprendida entre el vertimiento de Ecopetrol y el puente Murujuy, la medición se realizó a aproximadamente 5 kilómetros de la quinta estación (ver Figura 8).



Figura 8. Estación punto intermedio entre Vertimiento de estación petrolera Apiay y puente Murujuy. Por Ivon Babativa, 2018.

3.4.7 Estación 7: Puente Murujuy.

Finalmente, la estación puente Murujuy cierra el tramo de estudio, se caracteriza por estar aproximadamente a 2 kilómetros aguas arriba de la desembocadura del río Ocoa al río Guatiquía, es un punto de acumulación de la carga recogida a lo largo de toda su trayectoria, el flujo del agua es mucho más lento (ver Figura 9).



Figura 9. Estación puente Murujuy. Por Ivon Babativa, 2018.

3.5 Variables de estudio

En la tabla 6 se observan las variables dependientes e independientes seleccionadas para el presente estudio. el Temperatura, pH, Conductividad, Oxígeno disuelto y Precipitación.

Tabla 6.

Variables de estudio.

Variable independiente		Variable dependiente	
Nombre	Unidad	Nombre	Unidad
Temperatura	°C	Conc. Cromo	mg/l
Potencial de Hidrogeno	unidad	Conc. Níquel	mg/l
Conductividad eléctrica	μS/cm	Conc. Plomo	mg/l
Oxígeno disuelto	mg/l		
Precipitación	mm		

Nota: Variables dependientes e independientes utilizadas para evaluar la calidad del agua. Por Ivon Babativa, 2018.

3.6 Muestras

3.6.1 Tamaño de la muestra.

Se contemplaron dos muestreos en época con niveles de precipitación altos -con valores > 400 mm- y dos más para época con niveles de precipitación bajos -con valores < 100 mm-, cada una de las siete estaciones contó con tres puntos de medición -margen izquierda, derecha y en el centro del cauce-, realizando así un muestreo integrado, totalizando siete muestras representativas para cada época. Finalmente se obtuvo un total de 28 muestras.

3.6.2 Recolección de muestras de agua.

Los muestreos para la época con niveles de precipitaciones altas se realizaron los días 27-28 de octubre del 2017 para el primero y el 8 de noviembre del 2017 para el segundo; por otro lado, para la época con niveles de precipitaciones bajas se hicieron los días 6 y 13 de febrero del 2018.

La recolección de las muestras de agua se realizó según lo establecido por la NTC-ISO 5667-3 (ICONTEC, 2004), -secciones 1, 2, 3 y 6-; se tomaron tres alícuotas a lo ancho del cauce para cada muestra, a una profundidad aproximada del 50%, en cada una de las estaciones, las tres alícuotas fueron integradas. Las muestras se preservaron de acuerdo al procedimiento de muestreo en agua y sedimentos para la determinación de metales pesados (INVEMAR, 2009).

3.6.2.1 Medición *in situ*.

En las siete estaciones establecidas, se midió temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto; durante la época con niveles de precipitaciones altas, las mediciones se hicieron con el Oxímetro portátil HI91446 y el medidor TRACER LaMotte 1766; por su parte, para la época con niveles de precipitaciones bajas se hizo uso del multiparamétrico MultiLine®

Multi 3630 IDS SET G. Los cambios en el uso de los equipos obedecen a la disponibilidad de los laboratorios de la universidad.

3.6.2.2 Medición *ex situ*.

- Metales pesados

Las concentraciones de los metales pesados Cromo, Níquel y Plomo, se determinaron en el laboratorio QUIMICONTROL LTDA acreditado por el IDEAM, mediante el método de espectrofotometría de absorción atómica por llama. Las muestras se entregaron en recipientes polietileno de 2L lavados previamente en ácido y acidificadas a pH 2.0 con HNO₃, de acuerdo a los estándares dictados por la NTC-ISO 5667-3 (ICONTEC, 2004).

- Precipitación

Para efectos del presente trabajo se tomó como una variable categórica que no se tuvo en cuenta dentro del análisis estadístico, se utilizó para diferenciar dos temporadas en el tiempo de ejecución, los meses de octubre y noviembre como época con niveles de precipitación altos y febrero como época con niveles de precipitación bajos; esta variable se aplicó particularmente para el análisis de los resultados.

3.7 Tratamiento de los datos

3.7.1 Evaluación de la calidad del agua.

Se realizó la comparación de los resultados obtenidos para la concentración de los metales pesados con la normatividad nacional: (a) la Resolución 2115 de 2007, artículo 5 - Características químicas de sustancias que tienen efecto adverso en la salud humana-; y (b) Decreto 1594 de 1984 artículo 45 -Destinación de preservación de flora y fauna-. A nivel internacional se trabajó con las guías para la calidad del agua potable de la OMS (2006) y las regulaciones nacionales de agua potable de la EPA (2009). Se verificó cumplimiento y excedencia.

3.7.2 Análisis espacial.

Se realizó la representación espacial de las concentraciones de Cromo, Níquel, Plomo y de los principales focos de contaminación mediante el software ArcGIS, de forma que se visualizó de manera clara la relación existente entre las mismas y la distribución de las concentraciones de los metales a lo largo del tramo de estudio.

3.7.3 Análisis estadístico.

El procesamiento de los datos obtenidos en laboratorio y campo, tanto de metales como de variables ambientales se llevó a cabo mediante un análisis exploratorio con la prueba de Shapiro-wilks para determinar la normalidad de los datos. Por otra parte, se aplicó el coeficiente de Spearman para identificar las correlaciones existentes entre concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo, las variables ambientales; al trabajar con concentraciones por debajo del límite de detección en el análisis estadístico, se utilizó un valor igual a la mitad del mismo, de acuerdo a la metodología utilizada en el trabajo de (Marrugo, 2011). Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa SPSS, con un nivel de significancia de $P \geq 0.05$.

Seguidamente se determinó la desviación estándar de las concentraciones de los tres metales para cada muestreo con el fin de identificar la época en la que presentaron mayor variación los datos obtenidos.

3.7.4 Recomendaciones a entidades ambientales.

Las recomendaciones se establecieron de acuerdo a los análisis de resultados, teniendo en cuenta las áreas en donde se hace necesaria la ampliación de información existente sobre la presencia de estos contaminantes en el río Ocoa, la afectación que puede generar el encontrar este tipo de sustancias y, sobre todo, a quienes podría afectar de manera directa este tipo de contaminación en la zona de estudio. - lo anterior con apoyo bibliográfico-.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1 Evaluación de la calidad del agua

Los valores de temperatura del agua, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y pH se obtuvieron in-situ para cada estación en los 4 muestreos realizados -2 en época con niveles de precipitación alta y 2 en época con niveles de precipitación baja-, de forma paralela se recolectaron las muestras de agua que posteriormente fueron analizadas por el laboratorio acreditado. Los resultados de las variables ambientales mencionadas, así como los valores de concentración de los metales Cromo, Níquel y Plomo previamente tratados de acuerdo al método utilizado por Marrugo (2011) para aquellos valores inferiores al límite de detección se exponen en la tabla 7.

Tabla 7.

Resultados de parámetros in-situ y concentraciones de Cr, Ni y Pb para cada estación de muestreo en las épocas con precipitación alta y baja.

No. estación	Tiempo de muestreo		T. H2O (°C)	O.D.		C.E. (µS/cm)	pH	Cr (mg/l)	Ni (mg/l)	Pb (mg/l)
				(mg/l)	% sat.					
1	Precipitación alta	Muestreo 1	26,9	9,4	116,3	219	7,1	0,0055	0,0055	0,0050
		Muestreo 2	26,5	11,0	136,8	907	6,9	0,0055	0,0055	0,0180
	Precipitación baja	Muestreo 3	27,4	5,9	76,5	221	7,4	0,0055	0,0055	0,0110
		Muestreo 4	28,3	2,4	32,5	283	7,3	0,0055	0,0055	0,0050
2	Precipitación alta	Muestreo 1	27,6	9,6	121,7	216	7,1	0,0055	0,0055	0,0050
		Muestreo 2	27,3	10,3	131,1	909	6,9	0,0055	0,0055	0,0130
	Precipitación baja	Muestreo 3	28,1	6,4	85,4	232	7,5	0,0055	0,0055	0,0210
		Muestreo 4	28,3	2,4	31,6	277	7,3	0,0055	0,0055	0,0050
3	Precipitación alta	Muestreo 1	29,0	9,5	124,5	215	7,1	0,0630	0,019	0,0050
		Muestreo 2	29,4	10,0	131,0	862	7,1	0,0055	0,0055	0,0130
	Precipitación baja	Muestreo 3	26,6	8,7	116,9	223	7,8	0,0055	0,0055	0,0230
		Muestreo 4	27,4	8,3	108,5	239	7,8	0,0055	0,0055	0,0160
4	Precipitación alta	Muestreo 1	30,0	8,8	116,7	216	7,0	0,0055	0,0055	0,0390
		Muestreo 2	31,0	9,7	131,4	840	6,9	0,0055	0,0055	0,0050
	Precipitación baja	Muestreo 3	30,2	7,2	99,2	107	7,4	0,0055	0,0055	0,0130
		Muestreo 4	26,7	5,4	69,8	234	7,3	0,0055	0,0055	0,0230
5	Precipitación alta	Muestreo 1	29,9	8,7	113,9	219	7,0	0,0055	0,0055	0,0310
		Muestreo 2	31,2	9,9	132,4	840	7,0	0,0055	0,012	0,0150
	Precipitación baja	Muestreo 3	30,4	7,3	100,8	206	7,4	0,0055	0,0055	0,0130
		Muestreo 4	26,9	4,6	59,3	262	7,2	0,0055	0,0055	0,0050
6	Precipitación alta	Muestreo 1	31,6	9,0	121,2	220	7,3	0,0055	0,0055	0,0490
		Muestreo 2	31,8	10,2	138,6	831	7,8	0,0055	0,0055	0,0100
	Precipitación baja	Muestreo 3	31,0	7,2	101,1	244	7,7	0,0055	0,0055	0,0160
		Muestreo 4	27,5	8,1	105,8	250	7,6	0,0055	0,0055	0,0050
7	Precipitación alta	Muestreo 1	30,5	11,5	156,9	233	7,1	0,0055	0,0055	0,0360
		Muestreo 2	30,0	10,1	133,1	862	7,0	0,0055	0,0055	0,0100
	Precipitación baja	Muestreo 3	26,6	6,1	68,5	229	7,4	0,0055	0,0055	0,0160
		Muestreo 4	26,6	5,4	69,3	230	7,1	0,0055	0,0055	0,0150

Nota: Resultados obtenidos de los parámetros in-situ y ex-situ, utilizados para evaluar la calidad del agua del río Ocoa. Por Juan Caicedo, 2018.

Con lo anterior se puede observar que en época con niveles de precipitación altos el cuerpo de agua presentó temperaturas comprendidas entre 26,5 – 31,8°C, resultados que se encuentran dentro las condiciones naturales (Beita Sandí, 2008). En cuanto al Oxígeno

disuelto las concentraciones reportadas (8,7 – 11,5 mg/l) se mantienen dentro de las condiciones normales, de igual forma, los valores de saturación (113,9% - 156,9%) indican un estado de supersaturación; Los registros obtenidos de conductividad (215 – 909 $\mu\text{S}/\text{cm}$) están dentro de los valores habituales para aguas dulces y cuencas sedimentarias (Arocena & Conde, 1999). En los valores de pH registrados para esta época predomina la condición básica cercana a la neutralidad, sin embargo, se presentaron mediciones acidas próximas a la neutralidad con valor de 6,9.

Por otra parte, para la época con niveles de precipitación bajos las temperaturas (26,6 – 31°C) se mantuvieron dentro de las características normales (Beita Sandí, 2008). El Oxígeno disuelto ha disminuido tanto en concentración (2,37 – 8,74mg/l) como en porcentaje de saturación (31,6 – 116,9%) considerándose como condición aceptable y adecuado respectivamente; a pesar que la conductividad ha disminuido para esta época, se mantiene en las condiciones habituales para aguas dulces (Arocena & Conde, 1999). Todas las mediciones de pH presentaron naturaleza básica en este periodo.

En relación con los resultados del Observatorio de Políticas Públicas (Mejía, 2014) y el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (CORMACARENA, 2011a), los registros de temperatura, Oxígeno disuelto y conductividad obtenidos en el presente estudio presentan valores similares, sin embargo, estos referentes exponen que el pH en sus tomas de datos se caracterizó por ser ácido.

Para la evaluación de las condiciones de calidad en términos de metales pesados, se graficaron los valores obtenidos de Cr, Ni y Pb en estación y muestreo, sobre las gráficas se representan los niveles máximos permisibles establecidos por el artículo 5 de la resolución 2115 de 2007, el artículo 45 del decreto 1594 de 1984, la OMS y la EPA con el fin de identificar visualmente aquellas concentraciones superiores a los niveles de referencia (ver Figura 10,11 y 12).

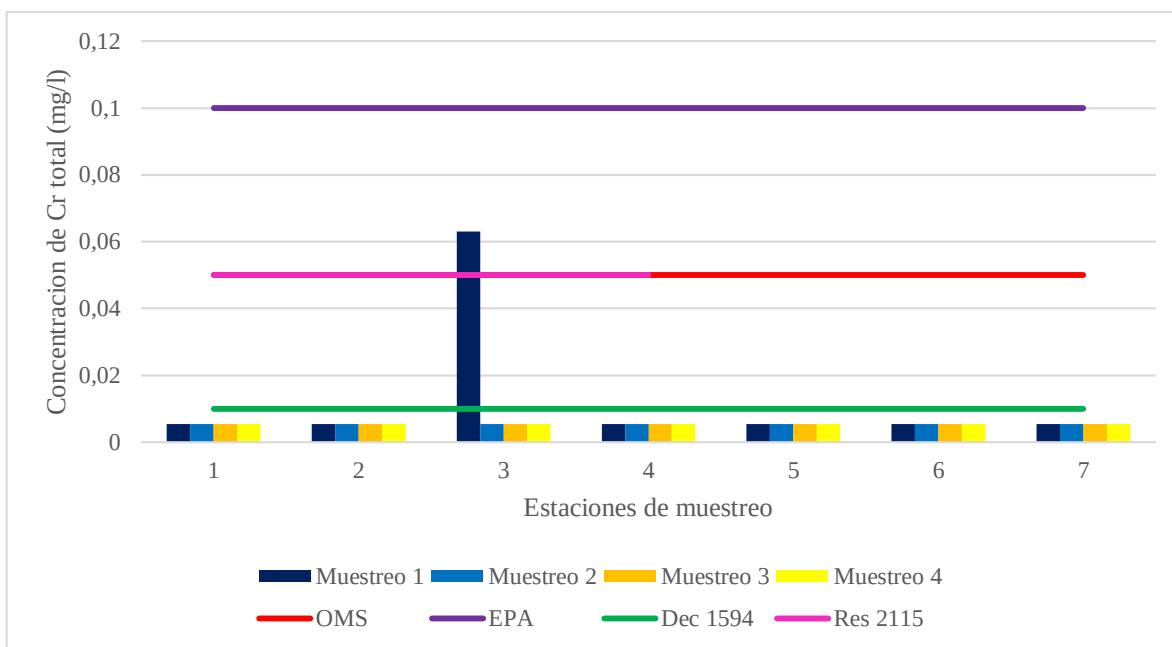


Figura 10. Contraste de Cromo total frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.

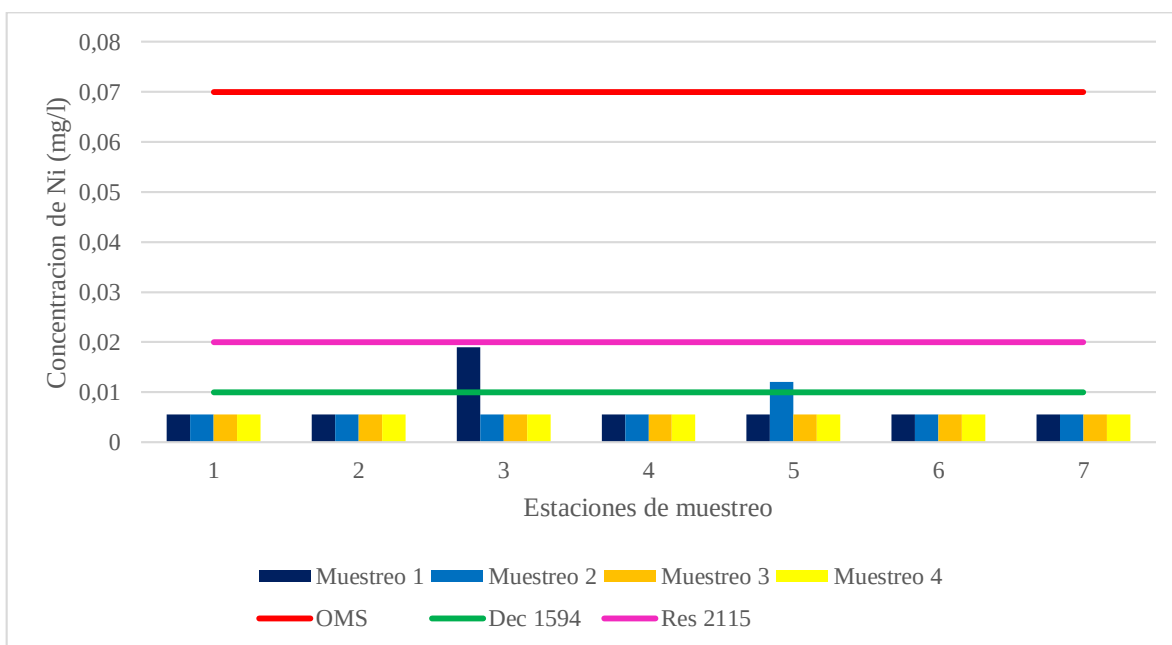


Figura 11. Contraste de Níquel frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.

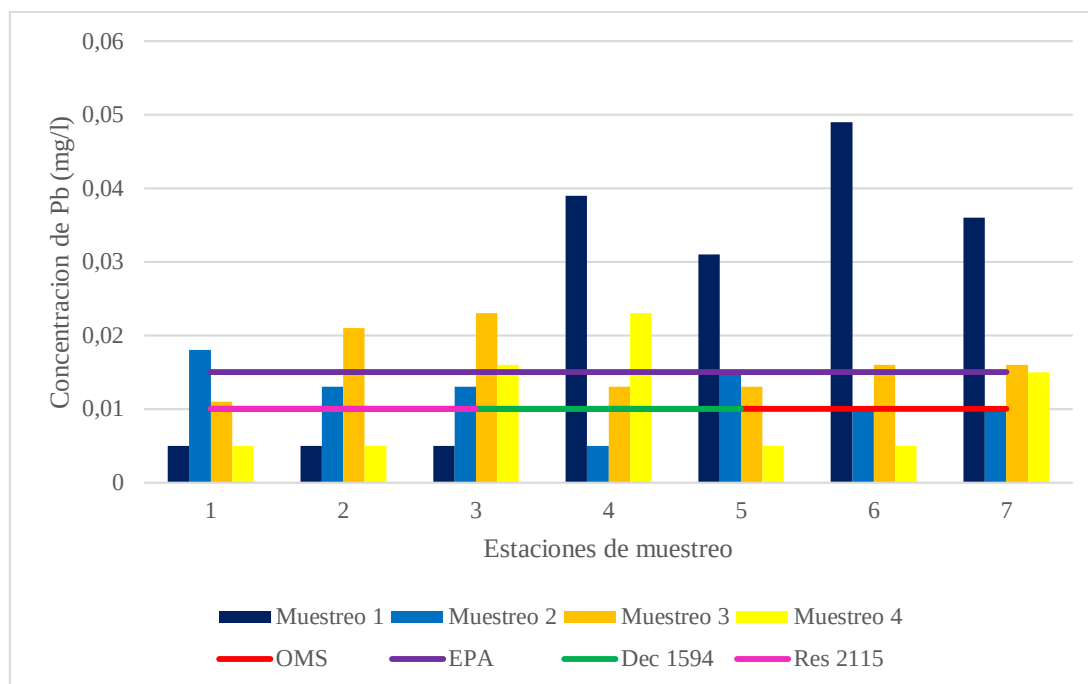


Figura 12. Contraste de Plomo frente a la normatividad nacional e internacional en el tramo de estudio. Por Juan Caicedo, 2018.

En la Tabla 8 se expresa que las condiciones de calidad de agua en términos de Cromo fueron aceptables ya que todas las estaciones de muestreo cumplieron con la normatividad a excepción de la estación 3 (6 km aguas debajo de la desembocadura del caño Maizaro - 2,2 km aguas debajo de caño Lapa – 1,5 km aguas abajo caño Piñalito- donde en el muestreo 1 la concentración superó el valor máximo permitido por el Decreto 1594 de 1984 en más del 100%, de igual manera se encuentra por encima del valor de referencia establecido por la Resolución 2115 de 2007 y la OMS en un 26%.

Tabla 8.

Cumplimiento y nivel de excedencia del Cromo.

No. estación	Tiempo de muestreo		Dec. 1594	Cromo Res. 2115 - OMS	EPA
1	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			
2	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			
3	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 530%	Excede en 26%	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3	Cumple	Cumple	
		Muestreo 4			
4	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			
5	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			
6	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			
7	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple	Cumple
		Muestreo 2			
	Precipitación baja	Muestreo 3			
		Muestreo 4			

Nota: Porcentaje de excedencia de las concentraciones de Cr. Por Juan Caicedo, 2018.

Tabla 9.

Cumplimiento y nivel de excedencia del Níquel.

No. estación	Tiempo de muestreo	Níquel		
		Dec. 1594	Res. 2115 - OMS	
1	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3		
		Muestreo 4		
2	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3		
		Muestreo 4		
3	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 90%	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3	Cumple	
		Muestreo 4		
4	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3		
		Muestreo 4		
5	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2	Excede en 20%	
	Precipitación baja	Muestreo 3	Cumple	
		Muestreo 4		
6	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3		
		Muestreo 4		
7	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2		
	Precipitación baja	Muestreo 3		
		Muestreo 4		

Nota: Porcentaje de excedencia de las concentraciones de Ni. Por Juan Caicedo, 2018.

Tabla 10.

Cumplimiento y nivel de excedencia del Plomo.

No. estación	Tiempo de muestreo	Plomo		
			Dec. 1594 - Res.2115 - OMS	EPA
1	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2	Excede en 80%	Excede en 20%
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 10%	Cumple
		Muestreo 4	Cumple	Cumple
2	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2	Excede en 30%	
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 110%	Excede en 40%
		Muestreo 4	Cumple	Cumple
3	Precipitación alta	Muestreo 1	Cumple	Cumple
		Muestreo 2	Excede en 30%	
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 130%	Excede en 53%
		Muestreo 4	Excede en 60%	Excede en 7%
4	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 290%	Excede en 160%
		Muestreo 2	Cumple	Cumple
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 30%	
		Muestreo 4	Excede en 130%	Excede en 53%
5	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 210%	Excede en 107%
		Muestreo 2	Excede en 50%	
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 30%	Cumple
		Muestreo 4	Cumple	
6	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 390%	Excede en 227%
		Muestreo 2	Cumple	Cumple
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 60%	Excede en 7%
		Muestreo 4	Cumple	Cumple
7	Precipitación alta	Muestreo 1	Excede en 260%	Excede en 140%
		Muestreo 2	Cumple	Cumple
	Precipitación baja	Muestreo 3	Excede en 60%	Excede en 7%
		Muestreo 4	Excede en 50%	Cumple

Nota: Porcentaje de excedencia de las concentraciones de Pb. Por Juan Caicedo, 2018.

La Tabla 9 permite observar que todas las estaciones de muestreo han cumplido con las condiciones de calidad establecidas por la normatividad nacional e internaciones del recurso hídrico en cuanto a Níquel, sin embargo, la concentración registrada en el primer muestreo para la estación 3 excede en un 90% el valor de referencia establecido por la Resolución 1594 de 1984, por otra parte, el valor registrado en el segundo muestro para la estación 5 supera en un 20% el límite permisible de esta misma norma.

La Tabla 10 muestra que en términos de Plomo la calidad de agua presentó condiciones por fuera de la norma debido a que en todas las estaciones de muestreo se exceden los niveles máximos permisibles establecidos por el Decreto 1594 de 1984, la Resolución 2115 de 200 y la OMS quienes manejan el mismo valor para este contaminante, así como el valor señalado por la EPA; en el muestreo 2 la primera estación excedió los limites dados por la normatividad nacional la OMS en un 80% y en 20% los de la EPA; en el tercer muestreo esta estación superó los limites nacionales de la OMS en un 10%.

En la estación de muestreo 2 los valores de referencia nacionales y de la OMS son excedidos en el segundo muestreo en un 30%; para el tercer muestreo la normatividad nacional y la OMS se exceden en un 110% mientras que el valor límite de la EPA se supera en un 40%. En la estación 3 se superaron los límites máximos nacionales y de la OMS en el segundo muestreo en un 30%; por otra parte, en el tercer muestreo los valores de referencia nacionales y la OMS son excedidos en 130% así como en 53% el límite de la EPA; en el cuarto muestreo se superaron las concentraciones máximas permisibles de la normatividad nacional y la OMS en un 60% y como también en un 7% los valores de la EPA.

Para la estación 4 en el primer muestreo se observa un exceso en más del 100% para la normatividad nacional e internacional; en el segundo muestreo los límites de nacionales y de la OMS son superados en un 30%, y para el tercer muestreo sobrepasan en un 130% como en 53% frente a la EPA. La concentración registrada en el primer muestreo de la estación 5 presenta la particularidad de estar por encima de la normatividad nacional e internacional en más del 100%, mientras que en los muestreos 2 y 3 se exceden los límites establecido por la norma nacional y la OMS en 50% y 30% respectivamente.

La estación 6 presentó un exceso de la normatividad nacional internacional por encima del 100% en el primer muestreo, sin embargo, en el tercer muestreo se superó en 60% los niveles de referencia nacionales y de la OMS como también en 7% el valor máximo de la EPA. Igualmente, la estación 7 presentó una concentración que excede en más de 100% la normatividad nacional e internacional, así como en el tercer muestreo un registro superior en 60% los límites nacionales y de la OMS al igual que en 7% el valor máximo de la EPA; el cuarto muestreo en esta estación excedió en un 50% los niveles señalados por la norma nacional y la OMS.

De acuerdo con las condiciones de calidad de agua, se resalta que solamente se registró una única concentración de Cr total que puede generar efectos nocivos para la salud, así como a la preservación de la flora y fauna, dicho valor se encontró en la primera medición -época con niveles de precipitación altos- de la estación 3 con valor de 0,063 mg/l. En cuanto al Ni se obtuvo que las dos concentraciones que representan condiciones adversas para el uso del recurso de preservación de flora y fauna fueron registradas en primer muestreo de la estación 3 con valor de 0,019 mg/l y segundo muestreo de la estación 5 con valor de 0,012 mg/l igualmente en época con precipitaciones altas.

Por su parte el metal de mayor impacto para la destinación del recurso a consumo doméstico y de preservación de biodiversidad es el Pb debido que en las 7 estaciones se presentaron concentraciones que sobrepasaron los límites establecido en la normatividad nacional e internacional. Sin embargo, también se destaca el hecho que las concentraciones más altas presentadas en la estación 4 (0,039 mg/l), en la estación 5 (0,031 mg/l), en la estación 6 (0,049 mg/l), en la estación 7 (0,036 mg/l) se presentaron en época con niveles de precipitación altos para el primer muestreo. Las concentraciones más altas reportadas en época de precipitaciones bajas fueron encontradas en el tercer muestreo de la estación 2 con valor de 0,021 mg/l y de la estación 3 con valor de 0,023 mg/l.

La época en la que se presentaron los niveles de contaminación más altos fue la de mayores niveles de precipitación, puede que las fuertes lluvias hayan incrementado las concentraciones de los contaminantes -principalmente Pb- por efectos de arrastre debido a

que normalmente estas sustancias tienden a acumularse en sedimentos (Buenfil & Flores, 2007), del mismo modo, las estaciones que mayor afectación presentaron fueron la 4, 5, 6 y 7 por la proporción en la que el Pb sobrepasa los niveles máximos permisibles. La única estación que presentó valores por encima de los niveles de referencia para los 3 metales estudiados fue la estación 3 lo cual puede estar asociado a un posible aporte de los contaminantes por parte de los caños Maizaro, Lapa y Piñalito debido a que en su recorrido por el límite urbano de la ciudad son receptores de descargas de aguas residuales, mixtas y lluvia, así como de escorrentía urbana (ver Apéndice D).

Uno de los factores ambientales que es influyente en la disponibilidad de los metales pesados es el pH en condiciones ácidas (Combariza Bayona, 2009); en la tabla 6 se observa que los valores de pH registrados en los cuatro muestreos presentan condiciones básicas cercanas a la neutralidad, lo cual podría explicar las concentraciones bajas para Cr y Ni; así mismo podrían influir en la disponibilidad de estos su naturaleza insoluble (para el caso del Níquel) y la forma química en la que se encuentren (especialmente el Cromo ya que es un metal soluble).

Al igual que con el Níquel, el Plomo es un elemento insoluble, sin embargo, ha sido la sustancia con mayores niveles dentro del tramo estudiado lo cual podría asociarse al aporte generado por los centros de mecánica automotriz rudimentarios, el uso de combustibles, desgaste de neumáticos, lubricantes, pastillas para frenos y grasas, mediante los procesos de escorrentía urbana de acuerdo al estudio de Trujillo y Torres (2015) en tres sectores - comercial, residencial y de tráfico pesado- ubicados en la cuenta del río Ocoa.

Las concentraciones de Pb registradas por el Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias de la estación Apiay de Ecopetrol y el Observatorio de Políticas Públicas -aguas arriba y aguas abajo de dicho vertimiento que evidencian el aporte en cuanto a contaminación por metales pesados- son de 0,085 mg/l. Por su parte, este último expresa concentraciones de Cromo <0,0109; los Niveles de Ni encontrados en el presente trabajo fueron inferiores, no obstante, al igual que en los referentes se detectaron concentraciones superiores al límite permisible para la preservación de fauna y flora (Ministerio de agricultura, 1984). Por otra

parte, los niveles de Cromo del presente trabajo superan en más del 100% los registros de la estación Apiay -aguas arriba de la estación 5-, sin embargo, fueron hallados en la estación 3, lo cual se puede asociar a un posible aporte de los caños Lapa y Piñalito, la presencia de estos dos metales igualmente puede asociarse el desgaste de partes metálicas y los procesos de escorrentía urbana (J. Trujillo & Torres, 2015).

Si bien se encontraron concentraciones de metales pesados en el agua -notoriamente más altas para el caso del Plomo-, se podría esperar que por su condición natural de bioacumulación que les permite alojarse de forma fácil a la materia orgánica los niveles en sedimentos sean mucho más altos (Buenfil & Flores, 2007).

4.2 Variación espacial de las concentraciones de metales pesados en el tramo de estudio

Se realizó la representación espacial de las concentraciones de Cromo, Níquel, Plomo mediante mapas de distribución, mostrando la variación de las concentraciones por estaciones. Con círculos proporcionales se representaron las concentraciones de los metales pesados. En los Apéndices A, B y C se visualiza la distribución de las concentraciones de cada metal en los cuatro muestreos realizados durante las épocas de precipitaciones altas y precipitaciones bajas.

En los cuatro muestreos el Cromo presentó un valor el mismo valor en cada una de las estaciones a excepción de la concentración registrada en el primer muestreo de la estación 3 con valor de 0,063 mg/l (Ver Apéndice A).

Los valores de Níquel fueron repetitivos en cada estación durante los cuatro muestreos a excepción de la estación 3 del muestro 1 y la estación 5 del muestro 2 con concentraciones de 0,019 mg/l y 0,012 mg/l respectivamente (Ver Apéndice B).

El plomo fue el metal que mayores diferencias de concentraciones presento en el tramo de estudio, los niveles en las cuatro estaciones oscilaron entre 0,005 - 0,049 mg/l, los valores

más altos se presentaron en el muestro 1 en la estación 4 con valor de 0,039 mg/l, estación 5 con valor de 0,031 mg/l, estación 6 con valor de 0,049 mg/l y estación 7 con valor de 0,036 mg/l (Ver Apéndice C).

4.2.1 Fuentes de contaminación

Luego de haber observado la variación de las concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo se procedió a identificar las posibles fuentes de contaminación a lo largo del tramo oriental del río Ocoa. Para obtener una perspectiva más amplia se utilizó a la información suministrada por la Geodatabase del plan de ordenamiento territorial (POT) acerca de los puntos de descarga de aguas combinadas, residuales y lluvia de la EAAV (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio), y de EDESA, que es la empresa de servicios públicos del Meta; posterior a la revisión de lo mencionado, articulado con las anotaciones registradas en campo para las zonas aledañas a las 7 estaciones de muestreo se obtienen como resultado las siguientes observaciones (Ver Apéndice D):

- La única descarga puntual registrada en campo es la generada por la estación petrolera Apiay, esta ha pasado de ser superficial a ser subsuperficial.
- La información contenida en la Geodatabase del POT no da razón de presencia de vertimientos en la parte oriental del río Ocoa por parte de EAAV y EDESA.
- Los caños Maizaro y Lapa son aportantes a la contaminación por metales pesados en el tramo oriental del río Ocoa ya que en su recorrido dentro del límite urbano de la ciudad son receptores de descargas de aguas residuales, mixtas y lluvia, lo que se evidencia en los registros de Pb en la estación 4, 5, 6 y 7; el Caño Maizaro particularmente podría estar recibiendo un aporte por parte de los centros de mecánica automotriz rudimentarios localizados en el barrio Porvenir.
- A pesar de que la Geodatabase no presente descargas por parte de EAAV y EDESA en el caño Piñalito puede que este también represente un aporte a la contaminación

por metales pesados en el río Ocoa debido a que parte de su cuerpo de agua pasa por el límite urbano, pudiendo ser receptor de descargas no puntuales (ver apéndice D).

- De los afluentes de la parte oriental del río Ocoa es el caño Maizaro el que mayor cantidad de descargas recibe (ver apéndice D).
- Los residuos sólidos dispersos encontrados a lo largo de las estaciones 1, 2 y 3 podrían significar una fuente de contaminación por las sustancias objeto de estudio.

A pesar que el presente estudio está enfocado en la distribución de Cromo, Níquel y Plomo en la parte oriental de la cuenca, en el apéndice D se exponen igualmente las descargas de aguas residuales, combinadas y lluvia recibidas tanto, en los afluentes que recorren el casco urbano, como, en la parte occidental del río ya que igualmente representan un aporte significativo para la presencia de las concentraciones de los metales en el tramo de estudio. Con lo anterior se corrobora que la mayor parte de los vertimientos recibidos por el río Ocoa son generados desde el perímetro urbano, se destaca la influencia de centros de mecánica automotriz rudimentaria localizados en barrio Porvenir y el tráfico vehicular ya que de acuerdo con el estudio de Trujillo y Torres (2015) representa un aporte de Pb, Ni y Cr en la cuenca del río Ocoa por escorrentía urbana; la presencia de esta actividad industrial podría aumentar previamente de los contaminantes antes de llegar las aguas al tramo objeto del trabajo.

En concordancia con lo mencionado se determinó para efectos del presente trabajo que las principales fuentes de contaminación de las sustancias estudiadas son: tramo occidental del río Ocoa -Entiéndase como la combinación entre descargas realizadas en el límite urbano, aportes de los afluentes urbanos y aguas del cauce en esa parte de la cuenca-, caño Maizaro, caño Lapa, caño Piñalito y vertimiento estación petrolera Apiay.

Para identificar las posibles relaciones entre las concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo y las fuentes mencionadas se analizó la variación de los valores de los metales en los 4 muestreos a lo largo del tramo (Apéndice A, B y C) y la influencia que podrían tener las

fuentes identificadas (Apéndice D). Las concentraciones de Cr (0,063 mg/l) y Ni (0,019 mg/l) registradas en el primer muestreo de la estación 3 se pueden asociar con un probable aporte de los contaminantes por parte de las aguas de los caños Lapa y Piñalito, lo anterior teniendo en cuenta que en las estaciones 1 y 2 no existen cambios en los valores de ambos metales; es en la tercera estación donde se evidencia un incremento en las concentraciones de los dos metales en más del 100%.

Las concentraciones de Pb tomadas en el primer muestreo de las estaciones 1, 2 y 3 mantienen valores bajos constantes lo que podría deberse a fenómenos de flujo constante que generan una decantación de los sedimentos que acumulan el metal, sin embargo, se puede percibir un aumento de más de 100% en la estación 4 justamente en la zona de actividad minera, este aumento en los valores de Pb podría deberse al rompimiento de este flujo constante del agua por efectos de la extracción de material de arrastre, generando turbulencias y consecuentemente resuspensión de los sedimentos a toda la columna de agua (Buenfil & Flores, 2007). Los valores elevados de Pb registrados en las estaciones 5, 6 y 7 de este mismo muestreo podrían asociarse al aporte generado por el vertimiento de la estación petrolera Apiay. Es posible que exista relación entre el valor pico de la estación 6 con la sinuosidad que presenta el cuerpo de agua en ese punto (Ver apéndice C).

En el segundo muestreo de Pb se puede observar que la mayor concentración es aquella que llega de la parte occidental del río, posiblemente sea producto del aporte generado por las descargas realizadas tanto en este como en sus afluentes en el límite urbano; gracias a la dinámica de la parte oriental dichas concentraciones van disminuyendo hasta llegar a la estación 5 donde nuevamente el valor del metal aumenta posiblemente por la descarga generada por parte de la estación petrolera Apiay.

Para el tercer muestreo de Pb se evidencia un aumento de más del 90% en el registro de la segunda estación, lo que podría asociarse al aporte generado por el caño Maizaro, seguidamente en la estación 3 se presenta la mayor concentración de ese muestreo la cual podría estar influenciada por la carga contaminante transportada por los caños Lapa y Piñalito.

Finalmente, en el cuarto muestreo realizado para Plomo se presenta un evidente aumento -de más de 100%- de la concentración en la estación 3 que igualmente podría estar asociado al aporte de los caños Lapa y Piñalito. El incremento del valor de Pb para la estación 4 podría estar influenciado al igual que en los muestreos anteriores por resuspensión de los sedimentos que acumulan este contaminante (Buenfil & Flores, 2007), producto de la turbulencia generada por la actividad de extracción de material.

4.3 Correlación de los metales pesados con las variables ambientales

Para evaluar la relación entre la concentración de los metales pesados y las variables ambientales, se usó el análisis estadístico de Spearman. En las tablas 7, 8 y 9 se muestran los valores de r y su nivel de significación. Los valores encerrados tuvieron una correlación estadísticamente significativa ($P < 0,05$).

El análisis de Spearman muestra que estadísticamente no hay una correlación significativa entre Cromo, Níquel y las variables ambientales de estudio, debido a que el valor de significancia es mayor a 0,05 y las variables a estudiar son constantes por ende el software utilizado (SPSS) las omite. Para el caso del Plomo se observa que existe una correlación positiva significativa con la temperatura ($R = 0,927$, $P = 0,003$) y el pH ($R = 0,813$, $P = 0,026$); mientras que para la Conductividad se observa una correlación negativa significativa ($R = -0,788$, $P = 0,035$). Para efectos del presente estudio no se tomarán en cuenta para un análisis concluyente aquellas correlaciones que presenten una significancia mayor a 0,05.

Tabla 11.

Resultados de la correlación de Spearman entre Cromo y variables ambientales.

		Correlación de Spearman			
		Cromo (Cr) mg/l			
		Precipitación alta		Precipitación baja	
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Temperatura	Coeficiente de correlación	-0,204	c	c	c
	Sig. (bilateral)	0,661	c	c	c
O2 disuelto (ppm)	Coeficiente de correlación	0,204	c	c	c
	Sig. (bilateral)	0,661	c	c	c
O2 disuelto (%)	Coeficiente de correlación	0,408	c	c	c
	Sig. (bilateral)	0,363	c	c	c
Conductividad (µS)	Coeficiente de correlación	-0,624	c	c	c
	Sig. (bilateral)	0,135	c	c	c
pH	Coeficiente de correlación	0,114	c	c	c
	Sig. (bilateral)	0,808	c	c	c

Nota: c. No se puede calcular porque, como mínimo, una de las variables es constante. Por Ivon Babativa, 2018.

Tabla 12.

Resultados de la correlación de Spearman entre Níquel y variables ambientales.

		Correlación de Spearman			
		Níquel (Ni) (mg/l)			
		Precipitación alta		Precipitación baja	
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Temperatura	Coeficiente de correlación	-0,204	0,408	c	c
	Sig. (bilateral)	0,661	0,363	c	c
O2 disuelto (ppm)	Coeficiente de correlación	0,204	-0,408	c	c
	Sig. (bilateral)	0,661	0,363	c	c
O2 disuelto (%)	Coeficiente de correlación	0,408	0	c	c
	Sig. (bilateral)	0,363	1	c	c
Conductividad (µS)	Coeficiente de correlación	-0,624	-0,312	c	c
	Sig. (bilateral)	0,135	0,496	c	c
pH	Coeficiente de correlación	0,114	0,107	c	c
	Sig. (bilateral)	0,808	0,819	c	c

Nota: c. No se puede calcular porque, como mínimo, una de las variables es constante. Por Ivon Babativa, 2018.

Tabla 13.

Resultados de la correlación de Spearman entre Plomo y variables ambientales.

		Correlación de Spearman			
		Plomo (Pb) (mg/l)			
		Precipitación alta		Precipitación baja	
		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4
Temperatura	Coeficiente de correlación	0,927**	-0,509	-0,321	-0,656
	Sig. (bilateral)	0,003	0,243	0,483	0,11
O2 disuelto (ppm)	Coeficiente de correlación	-0,371	0,473	0,422	0,562
	Sig. (bilateral)	0,413	0,284	0,346	0,189
O2 disuelto (%)	Coeficiente de correlación	-0,037	0,018	0,4	0,591
	Sig. (bilateral)	0,937	0,969	0,374	0,162
Conductividad (µS)	Coeficiente de correlación	0,528	0,481	0,6	-0,788*
	Sig. (bilateral)	0,223	0,274	0,154	0,035
pH	Coeficiente de correlación	0,062	-0,162	0,813*	0,123
	Sig. (bilateral)	0,895	0,729	0,026	0,793

Nota: **. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral); *. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral). Por Ivon Babativa, 2018.

Con base en los resultados es posible afirmar que estadísticamente la relación existente entre el Plomo y temperatura-pH es de tendencia directa, lo cual quiere decir que en la medida en que los valores de temperatura y pH aumentan, así mismo incrementan los valores de Pb, no obstante, esta relación estadística se pone en duda debido a que teóricamente la disponibilidad de los metales mayor en pH ácidos (Combariza Bayona, 2009), en otras palabras, podría decirse que es más probable encontrar mayor concentración de metales con pH bajo -tendencia inversa-, sin embargo, dados los rangos de pH observados en el estudio (6.9 – 7,8) no se relaciona toda la curva de pH con respecto a la temperatura, se dice que como regla general las temperaturas altas influyen más en la toxicidad que en la disponibilidad de los mismos.

Por otra parte, los resultados manifiestan que estadísticamente existe una relación de tendencia inversa entre el Plomo y la conductividad eléctrica, lo que quiere decir que en la medida en que los valores de conductividad aumentan, las concentraciones de Pb disminuyen, sin embargo, dicha correlación se pone en duda debido a que la misma

naturaleza de los metales permite que sean excelentes conductores de electricidad, afirmación que se soporta en el estudio de la movilidad de metales pesados (Solano Marín, 2006), donde se correlacionaron valores de conductividad con concentraciones de Pb y otros metales dando como resultado correlaciones directas en todos los casos.

En la tabla 14 se exponen los valores de desviación estándar de las concentraciones de Cromo para cada época, en los resultados se observa que para los muestreos 2, 3 y 4 no existe variación de las concentraciones, lo anterior debido a que se presentaron niveles de 0,0055 mg/l en todas las estaciones, sin embargo, la desviación existente en el primer muestreo se ve afectada por la presencia de un valor extremo de 0,0630 mg/l registrado en la estación 3, este supera en más de 100% los resultados de concentración de Cr obtenidos en las estaciones restantes que de hecho son contantes.

Tabla 14.

Desviación estándar de las concentraciones de Cr.

		Cromo (mg/l)	
		Media	Desviación estándar
Precipitación alta	Muestreo 1	0,013714	0,021733
	Muestreo 2	0,0055	0
Precipitación baja	Muestreo 3	0,0055	0
	Muestreo 4	0,0055	0

Nota: Resultados obtenidos del cálculo de las desviaciones estándar para identificar la variación en las concentraciones de Cr. Juan Caicedo, 2018.

Los valores de desviación estándar obtenidos para las concentraciones de Níquel en las dos épocas se pueden apreciar en la tabla 15, los resultados indican que los muestreos 3 y 4 no presentaron variación en los niveles detectados puesto a que las concentraciones fueron contantes, no obstante, el valor de desviación obtenido para los muestreos 1 y 2 se ve afectado por valores extremos de 0,019 mg/l (estación 3) y 0,012 mg/l (estación 5) respectivamente, ya que los niveles registrados en las estaciones restantes se mantienen constantes.

Tabla 15.

Desviación estándar de las concentraciones de Ni.

		Níquel (mg/l)	
		Media	Desviación estándar
Precipitación alta	Muestreo 1	0,007429	0,0051025
	Muestreo2	0,006429	0,0024568
Precipitación baja	Muestreo 3	0,0055	0
	Muestreo 4	0,0055	0

Nota: Resultados obtenidos del cálculo de las desviaciones estándar para identificar la variación en las concentraciones de Ni. Juan Caicedo, 2018.

Para el caso de las concentraciones de Plomo, en la tabla 16 se exponen los valores de desviación estándar obtenidos en ambas temporadas, la mayor variación de las concentraciones se registró en el primer muestreo, este resultado está influenciado por las concentraciones detectadas en las estaciones 4 (0,039 mg/l), 5 (0,031 mg/l), 6 (0,049 mg/l) y 7 (0,036 mg/l) que hacen referencia a los niveles de Pb más altos encontrados en el estudio. Por otra parte, en el segundo y tercer muestreo se presentaron las menores desviaciones lo cual puede asociarse a que en las diferencias entre los valores máximos y mínimos es reducida en comparación con los resultados del primer muestreo. Finalmente, el muestreo 4 expresa una desviación estándar de término medio en relación con los valores de los otros muestreos, este resultado se ve afectado por los niveles de Pb de las estaciones 3 (0,016 mg/l), 4 (0,023 mg/l) y 7 (0,015 mg/l) que sobrepasan las concentraciones -constantes- de las estaciones restantes en más de 100%.

Tabla 16.

Desviación estándar de las concentraciones de Pb.

		Plomo (mg/l)	
		Media	Desviación estándar
Precipitación alta	Muestreo 1	0,024286	0,0188212
	Muestreo2	0,012	0,0041633
Precipitación baja	Muestreo 3	0,016143	0,0044132
	Muestreo 4	0,010571	0,0073905

Nota: Resultados obtenidos del cálculo de las desviaciones estándar para identificar la variación en las concentraciones de Pb. Juan Caicedo, 2018.

Como resultado de las desviaciones estándar de las concentraciones de Cr, Ni y Pb se obtiene que las mayores variaciones se presentaron en época con niveles de precipitación altos, fenómeno que puede estar asociado con el aumento de arrastre de sedimentos por los procesos de escorrentía -principalmente urbana- (J. Trujillo & Torres, 2015).

Los resultados del coeficiente de Spearman acerca de la relación entre las concentraciones de los metales Cromo, Níquel, Plomo y las variables ambientales temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto no coinciden con la relación teóricamente existente, esto podría deberse a que la cantidad de datos por cada variable fue muy reducida al igual que la variación existente entre los mismos registros -a excepción de la variable concentración de Plomo ya que presentó la mayor variación de valores-.

Finalmente, respondiendo a la hipótesis planteada, para el presente estudio no se ha podido determinar si las concentraciones y distribución de Cromo, Níquel y Plomo varían según las condiciones de pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura en el tramo de estudio puesto a que los valores de estos parámetros no presentaron variación significativa, los muestreos y número de datos no permitieron aplicar una prueba estadística más robusta. Sin embargo, se ha comprobado que las concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo variaron en el tramo de estudio según el factor ambiental precipitación, donde la época con niveles de precipitación altos evidenció los valores más altos para todos los contaminantes, lo cual se asocia al arrastre de sedimentos por escorrentía -principalmente urbana- y la resuspensión de los sedimentos con contenido de metales por flujo turbulento -particularmente Pb-.

Todos los metales estudiados presentaron valores por encima de los límites máximos permisibles establecidos por el decreto 1594 de 1984, el Cromo y el Plomo sobrepasaron los valores de referencia de la resolución 2115 de 2007 y la OMS; solamente el Plomo superó el límite máximo de concentración señalado por la EPA.

4.4 Recomendaciones a entidades ambientales

Luego de haber determinado las concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo y su distribución a lo largo de la parte oriental del río Ocoa, así como la identificación de posibles focos de contaminación, se hace necesario ofrecer recomendaciones dirigidas a las entidades ambientales encargadas de regular cualquier anomalía y situación que genere afectaciones tanto a los componentes ambientales como a la salud pública; con base en lo anterior se plantean las siguientes recomendaciones dirigidas a la corporación para el desarrollo sostenible del área de manejo especial de la macarena -CORMACARENA- y a la secretaria de medio ambiente de la ciudad de Villavicencio:

- Realizar estudios toxicológicos, biológicos y químicos, en columna de agua y en sedimentos anualmente con el fin de mantener una base de datos actualizada de la situación de contaminación en cuanto a este tipo de sustancias tanto en el río Ocoa como en sus afluentes.
- Identificar y abordar la problemática de focos de contaminación generada por descargas difusas, principalmente en la parte oriental de la cuenca, con el fin de generar mayor control en con base en la resolución 0631 de 2015, para ello se propone un proceso de evaluación de problemas, análisis de alternativas y contar con la participación pública.
- Realizar monitoreos frecuentemente con el fin de mantener un registro histórico robusto tanto en el río Ocoa como en sus afluentes, así mismo, socializar los resultados con los usuarios del recurso con el fin de identificar de forma conjunta alternativas de manejo adecuado de acuerdo a los requerimientos de cada actividad.
- Implementar vedas de captura de peces como medida de control de consumo y comercialización de los mismos para la prevenir procesos de bioacumulación y biomagnificación.

- Regular el cumplimiento de las concentraciones de Plomo en descargas de EAAV y EDESA; de igual forma exigir el reemplazo de las tuberías de Plomo en caso que aún se utilicen en sus redes de drenaje.
- Realizar inspecciones no notificadas a los vertimientos que estén concesionados; lo anterior se sugiere debido a que en medio del trabajo de campo se percibió la presencia de personal de la estación petrolera Apiay realizando una limpieza en la zona aledaña a su descarga.
- Realizar alianzas entre la academia y entidades ambientales para incentivar la producción de trabajos de técnico-científico que permitan dar inicio a la identificación y manejo de la problemática de contaminación por metales pesados a nivel regional, de forma paralela generar nuevas estrategias de mitigación, prevención, compensación y programas de seguimiento y control.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

El Plomo fue el metal con mayor presencia en el tramo de estudio. Para época con niveles de precipitación altos y bajos en todas las estaciones se presentaron valores que sobrepasan los niveles de referencia establecidos por el Decreto 1594 de 1984, la Resolución 2115 de 2007, la OMS y la EPA; esas elevadas concentraciones pueden asociarse a los centros de mecánica automotriz rudimentarios, el uso de combustibles, desgaste de neumáticos, lubricantes, pastillas para frenos, grasas y tráfico vehicular mediante los procesos de escorrentía urbana (J. Trujillo & Torres, 2015).

El Níquel presentó dos registros superiores a los valores máximos permisibles señalados por el Decreto 1594 de 1984, ambos en época con niveles de precipitación altos, en las estaciones 3 y 5; las bajas concentraciones de este contaminante podrían explicarse con su naturaleza insoluble. El Cromo presentó una única concentración que excede los valores establecidos por el Decreto 1594 de 1984, la Resolución 2115 de 2007 y la OMS, en época con niveles de precipitación altos para la estación 3; a pesar de la solubilidad que presenta este metal, se concluye que probablemente la forma química en la que se encontraba no contaba con niveles altos de disolución. Se espera encontrar concentraciones mucho mayores de estos contaminantes en sedimentos gracias a la propiedad de acumulación en materia orgánica que caracteriza a los metales pesados (Buenfil & Flores, 2007).

Para el presente trabajo se determinaron como posibles fuentes de contaminación el tramo occidental del río Ocoa (entendiéndose como la combinación entre descargas realizadas en el límite urbano, aportes de los afluentes urbanos y aguas del cauce en esa parte de la cuenca), caño Maizaro, caño Lapa, caño Piñalito -igualmente por el aporte que representan las descargas de la zona urbana y escorrentía urbana a estos cuerpos de agua- y vertimiento estación petrolera Apiay; los resultados obtenidos por el Observatorio de Políticas Públicas con respecto a Ni (0,085 mg/l) aguas arriba y aguas debajo de dicho vertimiento (Mejía, 2014) corroboran el aporte en cuanto a contaminación por metales pesados.

De igual forma las concentraciones de los metales se asociaron a la actividad minera de extracción de material de arrastre, los residuos sólidos dispersos que se presentan en el cauce y la sinuosidad del cuerpo hídrico. Las estaciones con mayor afectación son las estaciones que tienen los niveles de contaminación más altos son 3 (punto intermedio entre desembocadura de caño Maizaro y vertimiento estación petrolera Apiay), 5 (aguas abajo del vertimiento estación petrolera Apiay), 6 (punto intermedio entre vertimiento estación petrolera Apiay y puente Murujuy) y 7 (puente Murujuy).

Las correlaciones resultantes del coeficiente de Spearman arrojaron relación con tendencia directa entre el Plomo y pH-temperatura, así como relación con tendencia inversa con la conductividad, sin embargo, estos resultados se ponen en duda debido a que teóricamente la disponibilidad de los metales es mayor en condiciones ácidas, el rango de pH obtenido en el presente estudio (6.9 – 7,8) presenta condiciones básicas muy cercanas a la neutralidad, la temperatura influye más en la toxicidad que en la disponibilidad de los mismos y la relación entre metales y conductividad eléctrica naturalmente es directa.

Por lo anterior, se concluye que los resultados de coeficiente de Spearman no logran describir correctamente la relación entre los metales Cromo, Níquel y Plomo con las variables ambientales pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, en términos del presente trabajo; la variación no significativa de los datos podría ser un factor influyente en estos resultados.

Se ha comprobado que las concentraciones de Cromo, Níquel y Plomo pudieron variar por la influencia de la variable ambiental de precipitación. Se evidenció en los niveles de precipitación alta se presentaron las mayores concentraciones para todos los contaminantes, lo cual posiblemente se deba a un efecto de escorrentía por las fuertes precipitaciones, aumentando la cantidad de sedimentos en los que se acumulan por naturaleza los metales pesados (Buenfil & Flores, 2007); particularmente se pueden asociar las altas concentraciones de Plomo con los mayores niveles de lluvia puesto a que podrían aumentar la corrosión de tubería del mismo material existentes en la red de alcantarillado de la ciudad

o en otros puntos de vertido ajenos a ella. Así mismo, la variación de las concentraciones puede estar influenciada por las fuentes de contaminación en la parte oriental del río Ocoa.

Para próximos estudios en el río Ocoa se sugiere inicialmente la incorporación de más estaciones, ampliando el área de estudio y número de muestreos tanto en época de precipitaciones altas como bajas con el fin de poder aplicar un método estadístico que permita identificar las relaciones de las concentraciones con las variables ambientales. De igual forma se recomienda realizar estudios en sedimentos y peces, ya que es probable encontrar concentraciones mayores en estos dos componentes por sus características de bioacumulación y biomagnificación. Se sugiere ampliar la información existente acerca de la contaminación por metales pesados a nivel regional ya que estos estudios son la base para la toma de posteriores decisiones para abordar la problemática de manera apropiada, reiterando que este tipo de contaminantes representan afectaciones directas a la salud pública. Es importante la cooperación interinstitucional ya que se facilitan los procesos de ejecución de los estudios ya que requieren de inversiones considerables y personal especializado.

Referencias bibliográficas

- APHA-AWWA-WPCFT. (2013). *Metodos Normalizados Para El Analisis De Aguas Potables Y Residuales. Apha-Awwa-Wpcf. Journal Of Chemical Information And Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/Cbo9781107415324.004>
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña, C., & Cedenilla, O. (2003). Contaminación Por Cromo En El Agua Intersticial, En El Agua Del Cauce Y En Los Sedimentos Del Río Jarama. *Limnetica*, 22(3–4), 85–98. Retrieved From http://www.limnetica.com/limnetica/limne22/L22b085_Contaminacion_Cromo_Rio_Jarama.Pdf
- Arocena, R., & Conde, D. (1999). *Métodos En Ecología De Aguas Continentales : Con Ejemplos De Limnología En Uruguay*. Universidad De La República, Facultad De Ciencias, Instituto De Biología, Sección Limnología. Retrieved From https://books.google.com.co/books/about/Métodos_En_Ecología_De_Aguas_Continent.html?id=Xvomaaacaaj&redir_esc=Y
- Avecillas, L. A. (2014). *Caracterización Físico – Químico Del Estero Salado Entre El Puente De La Avenida Kennedy Y El Puente 5 De Junio Efectuado En El Periodo Agosto – Octubre Del Año 2012*. Retrieved From <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/3502/1/1093.Pdf>
- Beita Sandí, W. (2008). “Caracterización Físicoquímica De Las Aguas Superficiales De La Cuenca Del Río Rincón En La Península De Osa, Puntarenas, Costa Rica.” Retrieved From <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/334>
- Buenfil, M., & Flores, N. (2007). Determinación De Metales Pesados (As, Cd, Hg Y Pb) Presentes En El Río Hondo, Quintana Roo. Retrieved From http://web.uaemex.mx/red_ambientales/docs/congresos/chihuahua/docs/81-100.Pdf
- Cazorla, L. L., Olivares-Rieumont, S., Columbie, I., Mederos, D. De La R., & Castillo, R. G. (2005). Niveles De Plomo, Zinc, Cadmio Y Cobre En El Río Almendares, Ciudad Habana, Cuba. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 21(3), 115–124. Retrieved From <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37021302>
- Cerón, M. G. (2015). *Evaluación De La Concentración Cadmio Y Níquel En Agua, Suelos Y Sedimentos De La Reserva Biológica De Limoncocha Para Establecer La Línea Base, 2015-2016*. Retrieved From http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2439/3/Tesis_Mónica_Gabriela_Cerón_Vásquez.Pdf
- Chata, A. (2015). *Presencia De Metales Pesados (Hg, As, Pb Y Cd) En Agua Y Leche En La Cuenca Del Río Coata 2015*. Universidad Nacional Del Antiplano. Retrieved

From

[Http://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unap/1930/Chata_Quenta_Ayde.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y](http://Repositorio.Unap.Edu.Pe/Bitstream/Handle/Unap/1930/Chata_Quenta_Ayde.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y)

Combariza Bayona, D. A. (2009). *Contaminacion Por Metales Pesados En El Embalse Del Muña Y Su Relacion Con Los Niveles En Sangre De Plomo, Mercurio Y Cadmio Y Alteraciones De Salud En Los Habitantes Del Municipio De Sibaté (Cundinamarca) 2007*. Universidad Nacional De Colombia. Retrieved From [Http://Www.Bdigital.Unal.Edu.Co/2341/1/597588.2009.Pdf](http://Www.Bdigital.Unal.Edu.Co/2341/1/597588.2009.Pdf)

Contreras, J., Mendoza, C., & Gómez, A. (2004). Determinación De Metales Pesados Y Sedimentos Del Río Haina. *Ciencia Y Sociedad*, 29(1), 38–71. Retrieved From [Http://Repositoriobiblioteca.Intec.Edu.Do/Handle/123456789/1055](http://Repositoriobiblioteca.Intec.Edu.Do/Handle/123456789/1055)

Cordero, J. (2015). *Fitorremediación In Situ Para La Recuperación De Suelos Contaminados Por Metales Pesados (Plomo Y Cadmio) Y Evaluación De Selenio En La Finca Furatena Alta En El Municipio De Útica (Cundinamarca)*. Universidad Libre. Retrieved From [Http://Repository.Unilibre.Edu.Co/Bitstream/Handle/10901/7958/Fitorremediación In Situ Para La Remoción De Metales Pesados %28plomo Y Cadmio%29 Y Evaluación De Sel.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y](http://Repository.Unilibre.Edu.Co/Bitstream/Handle/10901/7958/Fitorremediación%20In%20Situ%20Para%20La%20Remoción%20De%20Metales%20Pesados%20%28plomo%20Y%20Cadmio%29%20Y%20Evaluación%20De%20Sel.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y)

CORMACARENA. (2011a). *Ejecutivo General Plan De Ordenamiento Del Recurso Hídrico*.

CORMACARENA. (2011b). *Formulación Del Plan De Ordenamiento De Las Fuentes Hídricas Priorizadas En Jurisdicción De Cormacarena*. Villavicencio.

Coto, O. (2013). *Estudios De Bioacumulación De Un Metal De Interés En Contaminación Ambiental (Plomo) En Larvas De Lubina De Gran Valor Comercial*.

Ecopetrol. (2015). *Plan De Renconversión A Tecnologías Limpias De La Estación De Apiay De Ecopetrol*.

Edith Barba. (2002). *Conceptos Básicos De La Contaminación Del Agua Y Parámetros De Medición*. Universidad Del Valle. Retrieved From [Http://Www.Bvsde.Paho.Org/Bvsaar/E/Fulltext/Gestion/Conceptos.Pdf](http://Www.Bvsde.Paho.Org/Bvsaar/E/Fulltext/Gestion/Conceptos.Pdf)

Eduardo, L., & Triana, S. (2007). Estudio De Antecedentes Sobre La Contaminación Hídrica En Colombia. Retrieved From [Http://Cdim.Esap.Edu.Co/Bancomedios/Documentos Pdf/Estudio De Antecedentes Sobre La Contaminación Hídrica.Pdf](http://Cdim.Esap.Edu.Co/Bancomedios/Documentos Pdf/Estudio De Antecedentes Sobre La Contaminación Hídrica.Pdf)

Espinoza, R., Hernández-Avila, M., Narciso, J., Castañaga, C., Moscoso, S., Ortiz, G., ... Noonan, G. (2003). Determinants Of Blood-Lead Levels In Children In Callao And Lima Metropolitan Area. *Salud Publica De Mexico*, 45(Suppl. 2), 209–219. [Https://Doi.Org/10.1590/S0036-36342003000800007](https://doi.org/10.1590/S0036-36342003000800007)

Félix Rivera, M. (1997). Prevalencia De La Intoxicación Por Plomo En Escuelas Públicas De Tegucigalpa. *Revista Medica Hondureña*, 65(3).

González, J., Landines, M. A., Borbón, J., Correal, M. L., Sánchez, C., & Rodríguez, L. (2014). Evaluación De Algunos Marcadores De Exposición A Contaminantes En Tres Especies De Bagres Colombianos (Pisces: Siluriformes). *Biota Colombiana*, 15(1), 40–51. Retrieved From [Http://Www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?Id=49140739003](http://Www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?Id=49140739003)

González Valdez, E., González Reyes, E., Bedolla Cedeño, C., Lorena Arrollo Ordaz, E., & Manzanares Acuña, E. (2008). Niveles De Plomo En Sangre Y Factores De Riesgo Por Envenenamiento De Plomo En Niños Mexicanos. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 43, 114–119.

Guerra, F. M., Trujillo, F., Herrera, D. C., & Callejas, S. M. (2016). Indicios De Biomagnificación De Mercurio Total (Hg) En Las Especies Del Género Inia (Cetartiodactyla: Iniidae) En Los Ríos Amazonas Y Orinoco (Colombia). *Momentos De Ciencia*, 12(2). Retrieved From [Http://Www.Udla.Edu.Co/Revistas/Index.Php/Momentos-De-Ciencia/Article/View/496](http://Www.Udla.Edu.Co/Revistas/Index.Php/Momentos-De-Ciencia/Article/View/496)

Higueras, P., Oyarzun, R., Oyarzún, J., Marurana, H., Esbrí, J. M., & Lillo, J. (2005). Mercurio En Chile : Problemática Y Trabajos Realizados Por El Gemm Sobre Este Tema 2 El Grupo De Estudios De Minería, 359–362.

Huaranga M, F., Méndez, E., Quilcat, V., & Huaranga A, F. (2012). Contaminación Por Metales Pesados En La Cuenca Del Río Moche, 1980 - 2010, La Libertad - Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3), 235–247. Retrieved From [Https://Dialnet.Unirioja.Es/Servlet/Articulo?Codigo=4027759](https://Dialnet.Unirioja.Es/Servlet/Articulo?Codigo=4027759)

ICONTEC. (2004). Ntc-Iso-5667-3: Calidad Del Agua. Muestreo. Parte 3: Directrices Para La Preservación Y Manejo De Las Muestras., 57.

IDEAM. (2001). *El Medio Ambiente En Colombia*. Ideam (2. Ed.). Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales, Ministerio De Medio Ambiente, República De Colombia. Retrieved From [Http://Documentacion.Ideam.Gov.Co/Openbiblio/Bvirtual/000001/Cap4.Pdf](http://Documentacion.Ideam.Gov.Co/Openbiblio/Bvirtual/000001/Cap4.Pdf)

IDEAM. (2011). Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos.

IDEAM. (2017). Boletín Climatológico. Retrieved April 9, 2018, From [Http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Tiempo-Y-Clima/Climatologico-Mensual/-/Document_Library_Display/Xyvlpc4uxk1y/View/18512937?_110_Instance_Xyvlpc4uxk1y_Redirect=Http%3a%2f%2fwww.Ideam.Gov.Co%2fweb%2ftiempo-Y-Clima%2fclimatologico-Mensual%3fp_P_Id%3d110_Instance](http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Tiempo-Y-Clima/Climatologico-Mensual/-/Document_Library_Display/Xyvlpc4uxk1y/View/18512937?_110_Instance_Xyvlpc4uxk1y_Redirect=Http%3a%2f%2fwww.Ideam.Gov.Co%2fweb%2ftiempo-Y-Clima%2fclimatologico-Mensual%3fp_P_Id%3d110_Instance)

- IDEAM. (2018). Boletín Climatológico. Retrieved April 9, 2018, From [Http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Tiempo-Y-Clima/Climatologico-Mensual/-/Document_Library_Display/Xyvlpc4uxk1y/View/71473013?_110_Instance_Xyvlpc4uxk1y_Redirect=Http%3a%2f%2fwww.Ideam.Gov.Co%2fweb%2ftiempo-Y-Clima%2fclimatologico-Mensual%3fp_P_Id%3d110_Instance](http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Tiempo-Y-Clima/Climatologico-Mensual/-/Document_Library_Display/Xyvlpc4uxk1y/View/71473013?_110_Instance_Xyvlpc4uxk1y_Redirect=Http%3a%2f%2fwww.Ideam.Gov.Co%2fweb%2ftiempo-Y-Clima%2fclimatologico-Mensual%3fp_P_Id%3d110_Instance)
- Instituto De Investigaciones Marinas Y Costeras - INVEMAR. (2009). Procedimiento Para El Muestreo De Aguas Y Sedimentos Para Determinación De Metales, 1–11.
- Londoño Franco, L. F. (2014). *Presencia De Metales Pesados En Hatos Lecheros De Los Municipios De San Pedro Y Entreríos, Antioquia, Colombia*. Universidad De León. Retrieved From [Https://Dialnet.Unirioja.Es/Servlet/Tesis?Codigo=42985](https://Dialnet.Unirioja.Es/Servlet/Tesis?Codigo=42985)
- Lozano, G. (2010). *Metales Pesados: Aportaciones Al Estudio Toxicológico De Especies Y Alimentos Marinos En Las Islas Canarias*. Retrieved From [Ftp://H3.Bbtk.Ull.Es/Ccppytec/Cp334.Pdf](ftp://H3.Bbtk.Ull.Es/Ccppytec/Cp334.Pdf)
- Mancera, N., & Álvarez, R. (2006). Estado Del Conocimiento De Las Concentraciones De Mercurio Y Otros Metales Pesados En Peces Dulceacuícolas De Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3–23. Retrieved From [Http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Abc/V11n1/V11n1a01.Pdf](http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Abc/V11n1/V11n1a01.Pdf)
- Mancera, N., & Álvarez Ricardo. (2006). Current State Of Knowledge Of The Concentration Of Mercury And Other Heavy Metals In Fresh Water Fish In Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 21. [Https://Doi.Org/Doa.Org/Toc/1900-1649/11/0](https://Doi.Org/Doa.Org/Toc/1900-1649/11/0)
- Marrugo, J. L. (2011). Evaluación De La Contaminación Por Metales Pesados En La Ciénaga La Soledad Y Bahía De Cispatá, Cuenca Del Bajo Sinú, Departamento De Córdoba. Retrieved From [Http://Eca-Suelo.Com.Pe/Wp-Content/Uploads/2015/05/Evaluación-De-La-Contaminación-Por-Metales-Pesados-En-La-Cienaga-La-Soledad-Y-Bahía-De-Cispatá-Cuenca-Del-Bajo-Sinú-Cordoba.Pdf](http://Eca-Suelo.Com.Pe/Wp-Content/Uploads/2015/05/Evaluación-De-La-Contaminación-Por-Metales-Pesados-En-La-Cienaga-La-Soledad-Y-Bahía-De-Cispatá-Cuenca-Del-Bajo-Sinú-Cordoba.Pdf)
- Medina, F., Ayala, J., & Perea, D. (2011). Determinación De La Contaminación Mercurial En Personas Vinculadas Con La Minería De Oro En El Distrito Minero Del San Juan, Departamento Del Chocó, Colombia. *Bioetnia*, 8(2), 195–206. Retrieved From [Http://Www.Gomiam.Org/Omhoogladen/2015/11/Mosquera-Et-Al-2011.-Determination-Of-Pollution-In-People-Involved-In-Mercurial-Mining-Gold-In-The-Mining-District-Of-San-Juan-Department-Of-Chocó-Colombia.Pdf](http://Www.Gomiam.Org/Omhoogladen/2015/11/Mosquera-Et-Al-2011.-Determination-Of-Pollution-In-People-Involved-In-Mercurial-Mining-Gold-In-The-Mining-District-Of-San-Juan-Department-Of-Chocó-Colombia.Pdf)
- Mejía, D. (2014). Monitoreo Hidrobiológico Y Físico Químico Del Río Ocoa Del Municipio De Villavicencio, En Zona De Vertimientos Industriales. *Observatorio De Políticas Públicas De Villavicencio*. Retrieved From [Download:Productos Opp/Documentos/Impacto Ambiental Por Actividad Petrolera/Articulos\)](#)
- Mero, M. (2010). Determinación De Metales Pesados (Cd Y Pb) En Moluscos Bivalvos De

Interés Comercial De Cuatro Esteros Del Golfo De Guayaquil.
Repositorio.Ug.Edu.Ec, 63. <https://doi.org/10.1029/2011je003926>

Ministerio De Agricultura. (1984). Decreto 1594 De 1984. Retrieved April 12, 2018, From [Http://Www.Alcaldiabogota.Gov.Co/Sisjur/Normas/Norma1.Jsp?I=18617](http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/norma1.jsp?i=18617)

Ministerio De La Protección Social. (2007). Decreto No. 1575 De 2007. *Diario Oficial*, 2007(Mayo 9), 1–14.

Ministerio Federal De Cooperación Económica Y Desarrollo (Bmz). (1996). Tomo Iii: Catálogo De Estándares Ambientales.

Molina, P., Aguilar, N., & Cordovez, P. (2010). Plomo, Cromo Iii Y Cromo Vi Y Sus Efectos Sobre La Salud Humana. *Ciencia & Tecnología Para La Salud Visual Y Ocular*, 8(1), 77–88.

Nava Ruíz, C., & Méndez Armenta, M. (2011). Efectos Neurotóxicos De Metales Pesados (Cadmio, Plomo, Arsénico Y Talio). *Arch Neurocién*, 16(3), 140–147. Retrieved From [Http://Www.Medigraphic.Com/Pdfs/Arcneu/Ane-2011/Ane113f.Pdf](http://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf)

Organizacion Mundial De La Salud. (2006). *Guías Para La Calidad Del Agua Potable*. Retrieved From [Http://Www.Who.Int/Water_Sanitation_Health/Dwq/Gdwq3_Es_Fulll_Lowsres.Pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)

Orroño, D. I. (2011). *Acumulación De Metales (Cadmio, Zinc, Cobre, Cromo, Níquel Y Plomo) En Especies Del Género Pelargonium: Suministro Desde El Suelo, Ubicación En La Planta Y Toxicidad*. Universidad De Buenos Aires. Retrieved From [Http://Ri.Agro.Uba.Ar/Files/Download/Tesis/Doctorado/2011orronodanielaines.Pdf](http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf)

Ortega, M. (2014). Niveles De Plomo Y Mercurio En Muestras De Carne De Pescado Importado Y Local. *Pediatría*, 47(3), 51–54. [https://doi.org/10.1016/S0120-4912\(15\)30135-X](https://doi.org/10.1016/S0120-4912(15)30135-X)

Pájaro, D. M., & Sánchez, P. A. (2016). *Evaluación De Las Concentraciones De Metales Pesados (Cd Y Pb) En Especies Ícticas Comercializadas En La Plaza Del Pescado De La Ciudad De Barranquilla Y Riesgo Potencial Para La Salud Humana*. Retrieved From [Http://Repositorio.Cuc.Edu.Co/Xmlui/Bitstream/Handle/11323/940/1048214910 Y 1140868956 Trabajo De Grado Evaluación De Metales Pesados.Pdf?Sequence=1](http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/bitstream/handle/11323/940/1048214910Y1140868956TrabajoDeGradoEvaluaciónDeMetalesPesados.Pdf?Sequence=1)

Quesada Moreno, J. A. (2015). Revisión Del Impacto Socio Ambiental Por La Minería En El Departamento Del Chocó. Caso Región Del San Juan. Retrieved From [Http://Repository.Unimilitar.Edu.Co/Handle/10654/6461](http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/6461)

- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación Por Metales Pesados : Implicaciones En Salud , Ambiente Y Seguridad Alimentaria. *Investigacion Y Desarrollo*, 16(2), 66–77.
- Rodriguez, F. A. (2013). Cuantificación De Cadmio, Plomo Y Niquel En Agua Superficial, Sedimento Y Organismo (*Mytella Guayasensis*) En Los Puentes Portete Y 5 De Junio Del Estero Salado (Guayaquil), 70.
- Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Rojas, I. J. S. (2015). Tratamientos Para La Remoción De Metales Pesados Comúnmente Presentes En Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería Y Región*, 13(1), 73–90.
- Sarmiento Viteri, D. V. (2013). *Evaluación De La Contaminación Por Metales Pesados En Muestras De Musgo Recolectadas Durante El Período Febrero – Marzo 2011 En La Estación Antártica Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado*. Retrieved From <Http://Www.Dspace.Uce.Edu.Ec/Bitstream/25000/2114/1/T-Uce-0008-05.Pdf>
- Solano Marín, A. M. (2006). Movilización De Metales Pesados En Residuos Y Suelos Industriales Afectados Por La Hidrometalurgia Del Cinc. *Tdr (Tesis Doctorales En Red)*. Retrieved From <Http://Www.Tdx.Cat/Handle/10803/11036?Show=Full>
- Trujillo, F., Lasso, C. A., Diazgranados, M. C., Farina, O., Pérez, L. E., Barbarino, A., & González, M. (2010). Evaluación De La Contaminación Por Mercurio En Peces De Interés Comercial Y De La Concentración De Organoclorados Y Organofosforados En El Agua Y Sedimentos De La Orinoquia. Retrieved From <Http://Static.Eluniversal.Com/2013/03/02/Amazonas.Pdf>
- Trujillo, J., & Torres, M. (2015). Niveles De Contaminación En Tres Sectores De Villavicencio, A Través Del Índice De Geo-Acumulación(I-Geo). *Orinoquia*, 19(1), 109–117. Retrieved From <Http://Www.Redalyc.Org/Articulo.Oa?Id=89640816010>
- Unidad De Planeación Minero Energética. (2006). Alteraciones Neurocomportamentales En Personas Expuestas A Mercurio En La Actividad Minera Del Oro En El Municipio De Segovia (Antioquia) 2005. Retrieved From <Http://Www.Upme.Gov.Co/Docs/Mineria/1887.Pdf>
- US EPA. (2009). National Primary Drinking Water Regulations. Retrieved March 7, 2018, From <Https://Www.Epa.Gov/Ground-Water-And-Drinking-Water/National-Primary-Drinking-Water-Regulations#Two>
- Yagnentkovsky, N. (2011). *Aplicación De Técnicas De Biorremediación Para El Tratamiento De Residuos Industriales Con Alto Contenido De Metales Pesados*. Universidad Nacional De La Plata. Retrieved From Http://Sedici.Unlp.Edu.Ar/Bitstream/Handle/10915/2706/Documento_Completo.Pdf?Sequence=1

Zaldua Etxabe, I., Cambra Cotín, K., Onaindia Olalde, C., & Varela Alonso, J. (2010). Cesión De Plomo Y Otros Metales Desde Las Tuberías Al Agua De Consumo En La Comunidad Autónoma Del País Vasco. *Gaceta Sanitaria*, 24(6), 460–465. <https://doi.org/10.1016/J.Gaceta.2010.09.008>

Apéndices

Apéndice A. Plano 1. Variación espacial de las concentraciones de Cromo.

Apéndice B. Plano 2. Variación espacial de las concentraciones de Níquel

Apéndice C. Plano 3. Variación espacial de las concentraciones de Plomo

Apéndice D. Plano 4. Fuentes de contaminación por metales pesados