

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA PRESENCIA DE CADMIO Y PLOMO
EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y LA PERCEPCIÓN EN
SALUD DE LA POBLACIÓN PARA EL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE
GUATAVITA**

**DANIELA ANDREA ORTIZ GONZÁLEZ
DANIEL FELIPE PARRADO GALEANO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
2020**

**DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA PRESENCIA DE CADMIO Y
PLOMO EN EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y LA
PERCEPCIÓN EN SALUD DE LA POBLACIÓN PARA EL CASCO URBANO
DEL MUNICIPIO DE GUATAVITA**

**DANIELA ANDREA ORTIZ GONZÁLEZ
DANIEL FELIPE PARRADO GALEANO**

**Proyecto de grado para optar el título de Ingeniería Ambiental
modalidad presencial**

**Director
Ing. Johan Alexander Álvarez Berrio
MSc Toxicología**

**Codirector
Ing. Dayam Calderón**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Línea de investigación Salud ambiental
BOGOTA D.C
2020**

Nota de aceptación

Firma del director

Ing. Johan Alexander Álvarez Berrio

Magíster en toxicología

Firma jurado

Firma jurado

Bogotá D.C enero 31 de 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primera instancia a nuestras familias, ya que con su constante apoyo y paciencia fueron la principal motivación para culminar esta etapa y realizar este proyecto de grado.

También a nuestros directores de tesis el ingeniero Johan Alexander Álvarez y la ingeniera Dayam Calderón Rivera quienes nos orientaron en este trabajo de grado y a todos los docentes de la facultad de ingeniería ambiental que en algún momento nos brindaron sus conocimientos para llevar a cabo de la mejor manera nuestra tesis de grado.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas	8
Lista de graficas	9
Lista de ecuaciones	10
Lista de abreviaturas.....	11
1. Resumen.....	12
2. Abstract	13
3. Introducción	14
4. Objetivos.....	15
4.1 Objetivo General.....	15
4.2 Objetivos Específicos.....	15
5. Marco teórico.....	16
5.1 Área de estudio.....	16
5.1.1 Localización	16
5.1.2 Sistema de abastecimiento de agua potable	17
5.1.3 Economía	17
5.1.4 Población	18
5.1.5 Metales pesados	18
5.1.6 Plomo.....	19
5.1.7 Cadmio	21
5.1.8 Evaluación de riesgo ambiental.....	24
6. Marco normativo	25
7. Metodología.....	26
8. Resultados.....	35
8.1 Determinación de los parámetros in situ	35
8.2 Aforo.....	36
8.3 Determinación de cadmio y plomo	38
8.4 Encuestas.....	40

6 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita

8.5	Análisis de los RIPS	49
8.6	Análisis estadístico	56
8.6.1	Prueba de normalidad.....	56
8.6.2	Análisis y Correlación de Cadmio con el número de casos de enfermedades.....	56
8.6.3	Análisis y Correlación de Plomo con el número de casos de enfermedades.....	57
8.6.4	Análisis y Correlación de las concentraciones de plomo y cadmio con el caudal	58
8.7	Cuantificación de la exposición	59
8.7.1	Caracterización de la exposición.....	60
9.	Medidas sanitarias	62
10.	Impacto social.....	65
11.	Conclusiones y recomendaciones	66
11.1	Conclusiones.....	66
11.2	Recomendaciones.....	67
12.	Discusión.....	68
A.	Anexo: encuesta aplicada en el municipio de Guatavita.	¡Error! Marcador no definido.
B.	Anexo: resultados análisis de laboratorio Conoser LTDA.....	¡Error! Marcador no definido.
13.	Bibliografía.....	70

Lista de figuras

	Pág.
Figura 5-1. Localización municipio de Guatavita.	16
Figura 5-2. Modelo toxicocinético del plomo.	19
Figura 5-3. Modelo toxicocinético del cadmio.....	22
Figura 7-1. Ubicación puntos de muestreo.....	27
Figura 7-2. Predios encuestados.....	32
Figura 8-1. Secciones transversales del río San Francisco.	37
Figura A- 1. Formato encuesta.	¡Error! Marcador no definido.
Figura B- 1. Resultados de laboratorio temporada 1.	¡Error! Marcador no definido.
Figura B- 2. Resultados de laboratorio temporada 2.	¡Error! Marcador no definido.
Figura B- 3. Resultados de laboratorio temporada 3.	¡Error! Marcador no definido.

- 8 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita
-

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 6-1. Normatividad.....	25
Tabla 7-1. Método utilizado por el laboratorio.	29
Tabla 7-2. Resultados del cálculo de muestra para poblaciones finitas.....	31
Tabla 8-1. Caudales de la bocatoma del río San Francisco.	37
Tabla 8-2. Caudales hallados mediante el método volumétrico.	38
Tabla 8-3. Concentraciones de cadmio y plomo presentes muestras de agua.	38
Tabla 8-4. Análisis de los RIPS.	50
Tabla 8-5. Prueba de normalidad de Shapiro wilk.	56
Tabla 8-6. Correlación entre cadmio y enfermedades asociadas.....	57
Tabla 8-7. Correlación entre cadmio y enfermedades asociadas.....	58
Tabla 8-8. Correlación de cadmio, plomo y caudal.....	59
Tabla 8-9. Cálculo de la dosis suministrada para el cadmio en mg/kg/día.	59
Tabla 8-10. Cálculo de la dosis suministrada para el plomo en mg/kg/día.	60

Lista de graficas

	Pág.
Gráfica 5-1. Pirámide poblacional Guatavita 2018.	18
Gráfica 8-1. Resultados medición de parámetros fisicoquímicos.	36
Gráfica 8-2. Concentraciones de cadmio por puntos y fechas de muestreo.	39
Gráfica 8-3. Concentraciones de plomo por puntos y fechas de muestreo.	40
Gráfica 8-4. Resultados de la pregunta ¿cuál es su sexo?	41
Gráfica 8-5. Resultados de la pregunta ¿Con cuáles de los servicios públicos cuenta?	41
Gráfica 8-6. Resultados pregunta ¿El agua que llega a su hogar presenta alguna de estas características?	42
Gráfica 8-7. Resultados a la pregunta ¿Realiza algún tipo de tratamiento al agua antes de beberla del grifo?	43
Gráfica 8-8. Resultados de la pregunta ¿Cuál es la principal fuente de agua que utilizan para beber y preparar los alimentos?	44
Gráfica 8-9. Resultados de la pregunta ¿Hace cuánto tiempo vive en esta casa? ..	45
Gráfica 8-10. Respuesta a la pregunta ¿En general diría que su salud es?	46
Gráfica 8-11. Resultados de la pregunta ¿Usted o alguien de su familia ha presentado estos síntomas recientemente?	47
Gráfica 8-12. Resultados de la pregunta ¿Usted o alguien de su familia ha presentado estos problemas de salud recientemente?	48
Gráfica 8-13. Resultados a la respuesta ¿Usted o alguien de la familia ha sido diagnosticado con algún tipo de cáncer recientemente? ¿Cuál?	49
Gráfica 8-14. Sistema osteomuscular.	51
Gráfica 8-15. Sistema Digestivo.	52
Gráfica 8-16. Sistema Genitourinario.	53

- 10 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita
-

Gráfica 8-17. Sistema Nervioso.....	54
Gráfica 8-18. Sistema Circulatorio.	55
Gráfica 8-19. Tumores malignos órganos genitales masculinos.	55
Gráfica 8-20. Nivel de riesgo asociado a cadmio por grupo etario y estación de muestreo.....	61
Gráfica 8-21. Nivel de riesgo asociado a plomo por grupo etario y estación de muestreo.....	61

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 7-1. Cálculo del caudal 1.....	28
Ecuación 7-2. Cálculo de caudal 2.....	29
Ecuación 7-3. Cálculo del tamaño de muestra para poblaciones finitas.	30
Ecuación 7-4. Dosis Suministrada (Ds).	33
Ecuación 7-5. Nivel de riesgo.....	34

Lista de abreviaturas

PTAP: Planta de tratamiento de agua potable

RIPS: Registros Individuales de Prestación de Servicios de Salud

Cd: Cadmio

Pb: Plomo

Fe: Hierro

Cu: Cobre

Zn: zinc

Ca: Calcio

12 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita

OMS: Organización mundial de la salud

PH: Potencial de hidrógeno

TDS: Sólidos totales disueltos

EMESER: Empresa de servicios públicos domiciliarios de Guatavita

IDEAM: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales

CIE-10: Clasificación internacional de enfermedades

Ds: Dosis suministrada

DsR: Dosis de referencia para exposiciones orales

1. Resumen

En el sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Guatavita se han encontrado trazas de metales pesados como cadmio y plomo, los cuales pueden afectar la salud de la población al ingerir el agua potable contaminada, causando una afectación en el sistema digestivo, nervioso, óseo y reproductor.

Teniendo en cuenta la toxicidad de estos metales se realizó un muestreo simple teniendo como objetivo determinar las concentraciones de ambos metales pesados en las diferentes muestras de agua tomadas en diferentes puntos del sistema de abastecimiento y en diferentes meses para poder determinar la variabilidad de los contaminantes en diferentes temporadas climáticas, por otra parte mediante una encuesta realizada en diferentes predios del casco urbano de Guatavita se caracterizó la población y se tuvo una percepción de la salud de los habitantes en relación a los contaminantes encontrados en las muestras de agua analizadas.

Con los datos analizados en laboratorio de cadmio y plomo y los recolectados en las encuestas, se realizó un análisis estadístico que permitió evidenciar la posible relación entre los metales de estudio y enfermedades de tipo gastrointestinal y osteomuscular.

Palabras clave: cadmio, plomo, sistema de abastecimiento, agua potable, muestreo, salud.

2. Abstract

Traces of heavy metals such as cadmium and lead have been found in the drinking water supply system of the municipality of Guatavita, which can affect the health of the population by ingesting contaminated drinking water, causing an affectation in the digestive system, nervous, bone and reproductive.

Taking into account the toxicity of these metals, a simple sampling was carried out with the objective of determining the concentrations of both heavy metals in the different water samples taken at different points of the supply system, on the other hand by means of a survey carried out in different properties. The population was characterized from the urban area of Guatavita and there was a perception of the health of the inhabitants in relation to the contaminants found in the water samples analyzed in the CONOSER LTDA laboratory.

With the data analyzed in the cadmium and lead laboratory and those collected in the surveys, a statistical analysis was carried out that shows the possible relationship between the study metals and gastrointestinal and musculoskeletal diseases.

Keywords: cadmium, Lead, supply system, drinking water, sampling, health.

3.Introducción

El municipio de Guatavita ubicado en el departamento de Cundinamarca tiene como principal base de su economía la ganadería y la agricultura, seguido de la minería de carbón y la extracción de arena, mientras en la zona urbana el sostenimiento económico de la población es el turismo, la gastronomía y la producción artesanal[1], dichas actividades como toda actividad antropogénica genera diferentes contaminantes ;entre ellos metales pesados como cadmio y plomo provenientes del uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y demás productos utilizados en las diferentes actividades económicas que se desarrollan en el municipio.

Estos contaminantes pueden terminar en el agua producto de la escorrentía, vertimientos a los cuerpos hídricos o por precipitación, en todo caso generan una contaminación en el medio en que se encuentren llegando así a poner en riesgo la salud de la población que se abastece de agua potable contaminada con trazas de cadmio y plomo como se demostró en el estudio realizado por las ingenieras Karen Osma y Luisa León en el año 2017, estudio en el cual se logró evidenciar la presencia de metales pesados como cadmio y plomo en diferentes puntos a lo largo de la quebrada Corales y el río San Francisco que son las principales fuentes abastecedoras de agua potable del municipio e incluso también trazas después de haber pasado por el proceso de potabilización, encontrándose así en la quebrada Corales concentraciones de cadmio y plomo de entre 0,04 mg/l y 0,47 mg/l, mientras que en el Río San Francisco se encontraron concentraciones de entre 0,18 mg/l y 0,38 mg/l y después de salir de la PTAP entre 0,001 y 0,002mg/l [2].

Una vez el cadmio y plomo están presentes en el agua ingresan al sistema por vía gastrointestinal al consumir agua o alimentos contaminados, estos no pueden ser degradados ni destruidos, además pueden ser asimilados, almacenados y acumulados por los organismos vivos. Por esto su peligro reside en la capacidad de bioacumulación en los tejidos y en el proceso de biomagnificación que ocurre a medida que ascienden en la cadena trófica[3][4].Teniendo en cuenta lo anterior en este proyecto de grado se analizaron las concentraciones de cadmio y plomo en 3 puntos de muestreo ubicados en el sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Guatavita durante los meses de Mayo, Julio y septiembre con el fin de analizar la temporalidad. También se evaluó la percepción en salud mediante una serie de preguntas que se realizaron a través de una encuesta en diferentes predios pertenecientes al casco urbano del municipio, con estos datos se encontró una correlación entre los metales pesados de estudio y la percepción de salud evidenciada en las encuestas asociándolos con enfermedades de tipo gastrointestinal y óseas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Establecer la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable, junto con la percepción en la salud de la población del municipio de Guatavita.

4.2 Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones de cadmio y plomo presentes en el sistema de abastecimiento de agua potable.
- Evaluar la percepción en salud de la población de Guatavita frente a la exposición por cadmio y plomo presentes en el agua.
- Formular medidas sanitarias para disminuir la frecuencia de exposición a cadmio y plomo.

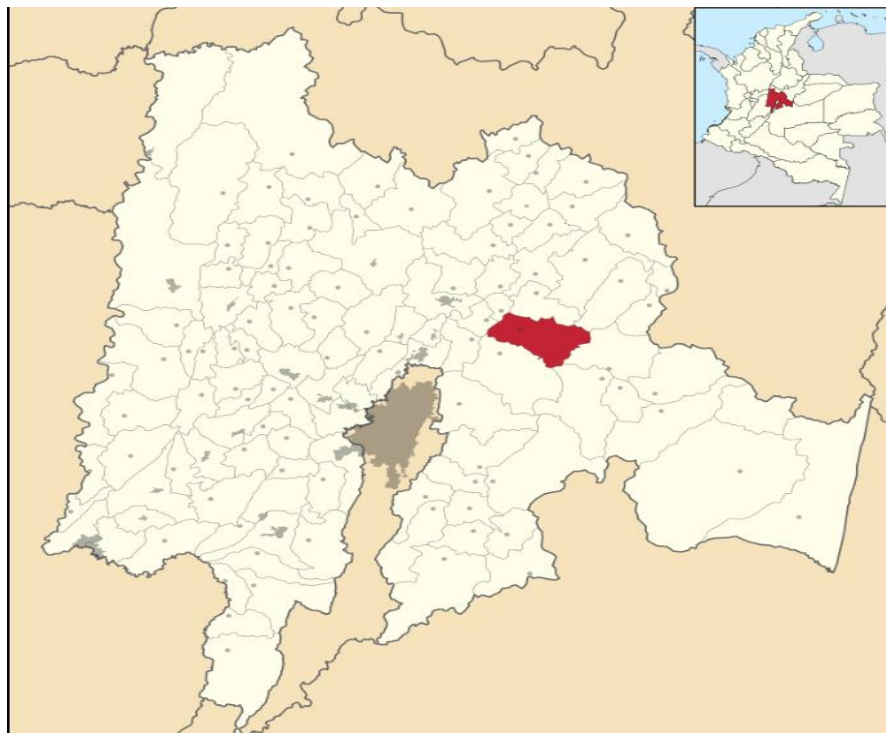
5.Marco teórico

5.1 Área de estudio

5.1.1 Localización

El municipio de Guatavita se encuentra hacia el nor-oriente de Bogotá a 75 kilómetros, por la Autopista Norte, a 4 grados 56 minutos de latitud norte y 73 grados 51 minutos de longitud occidental del meridiano de Greenwich, el municipio de Guatavita limita al norte con los municipios de Sesquilé y Machetá; por el oriente con Gachetá y Junín; por el sur a área urbana de 6,48 km² y una extensión de área rural de 240,6 km², el municipio se encuentra a una altura de 2680 msnm y su temperatura media oscila los 14°C [5].

Figura 5-1. Localización municipio de Guatavita.



Fuente: [19].

5.1.2 Sistema de abastecimiento de agua potable

El servicio de acueducto en el municipio de Guatavita, se presta por gravedad captando las aguas de las quebradas San Francisco y Corales, el municipio se abastece la mayor parte del tiempo de la Quebrada San Francisco, de la cual se capta un caudal medio de 50 L/s, sin embargo, en épocas de sequía entra en funcionamiento el sistema de captación alterno conectado a la quebrada Corales. El municipio cuenta con una PTAP de tipo convencional para abastecer las 830 viviendas ubicadas en la zona urbana del municipio, dentro de la planta de tratamiento el agua cruda ingresa al sistema por una torre de aireación para la determinación de caudal se tiene macromedidor, no cuenta de aquietamiento si sistema de medición de caudales que permita medir la cantidad de agua que ingresa al PTAP.

En ésta planta se realizan los procesos de coagulación, la cual se realiza en un cilindro troncocónico y el agente coagulante empleado es el Policloruro de Aluminio, seguido del proceso de floculación el cual se lleva a cabo en un floculador de flujo ascendente, el cual presenta problemas en las velocidades de los gradientes ya que el floc formado a la salida de éste difiere considerablemente con el obtenido en los ensayos de jarras realizados por la empresa de servicios públicos de Guatavita, posteriormente sedimentación la cual se realiza en un sedimentador de alta tasa, los módulos de sedimentación se encuentran en regular estado el cual se está escapando floc a los filtros, filtración el cual está compuesto por un sistema de siete filtros a presión los cuales se encuentran en regulares condiciones físicas, el agua utilizada para el retrolavado es agua cruda y los lechos filtrantes no se cambian hace más de 5 años y por último el proceso de desinfección se realiza al tanteo con cloro gaseoso con el fin de su posterior distribución a la población logrando una cobertura del 98,9 % durante las 24 horas [6][7].

5.1.3 Economía

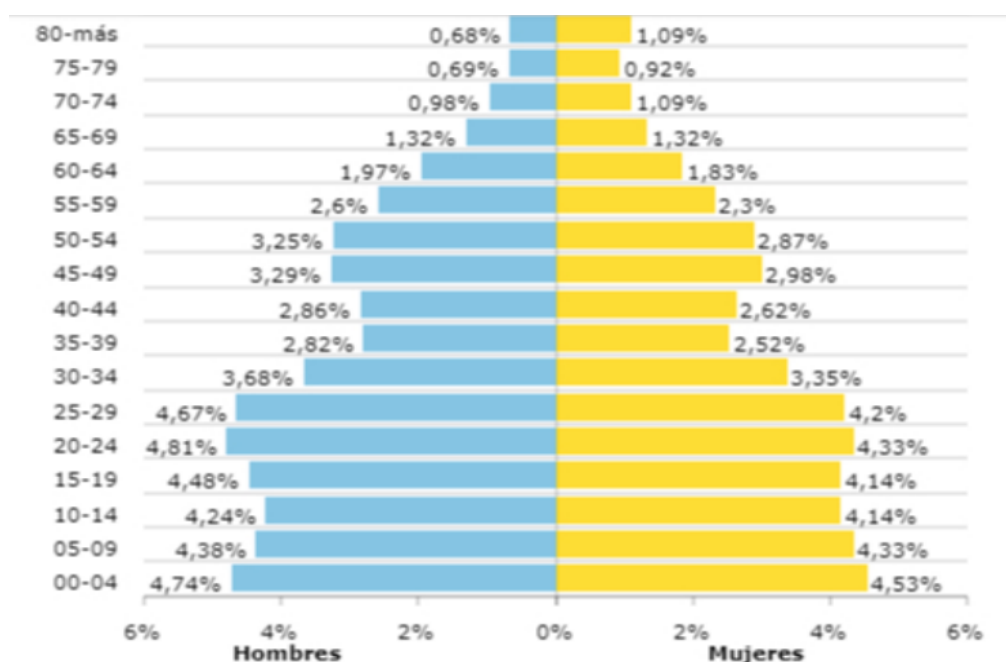
Se basa principalmente en la agricultura, en la cual sobresalen los cultivos de papa, maíz, arveja, cebada, haba, legumbres y la ganadería. Los habitantes de las veredas como medio de sustento en sus parcelas y fincas se dedican al cuidado de ganado vacuno, porcino y ovino, en un tercer renglón económico se encuentra la minería en la vereda Choche y Santa María.

En la vereda Corales cuentan con una truchera, que es la principal fuente de abastecimiento para el municipio por su excelente calidad, principalmente en los fines de semana y días festivos la base fundamental de la economía en la zona urbana del municipio es el comercio en tiendas, misceláneas, almacenes, ferreterías, depósitos de insumos agropecuarios, restaurantes y artesanías, estas últimas elaboradas en el centro artesanal amigos de Guatavita.[5]. Todas estas actividades económicas pueden repercutir en la contaminación del agua potable por metales pesados debido a los vertimientos y emisiones que se generan en las mismas [6].

5.1.4 Población

Según la proyección del DANE del 28 de septiembre de 2018, realizada para el año 2019 el municipio cuenta con una población total de 6.898 habitantes, de los cuales el 28% están ubicados en el área urbana y el restante en el área rural. En cuanto a la densidad poblacional por sexo el 51,5 % de los habitantes corresponden al género masculino y el 48,5% al género femenino.

Gráfica 5-1. Pirámide poblacional Guatavita 2018.



Fuente: [1].

5.1.5 Metales pesados

Estos se encuentran de forma natural en el ambiente en concentraciones bajas que no suelen afectar las diferentes formas de vida, no pueden ser degradados ni destruidos. El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones bajas. Los ejemplos de metales pesados incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd) el arsénico (As), el cromo (Cr), el talio (Tl), y el plomo [8].

El estudio de los metales pesados es importante debido a que estos generan efectos negativos en el ambiente y tienden a bioacumularse en el cuerpo, lo cual quiere decir que se pueden ir acumulando en el organismo hasta alcanzar concentraciones sumamente peligrosas que causan graves daños en el organismo [9].

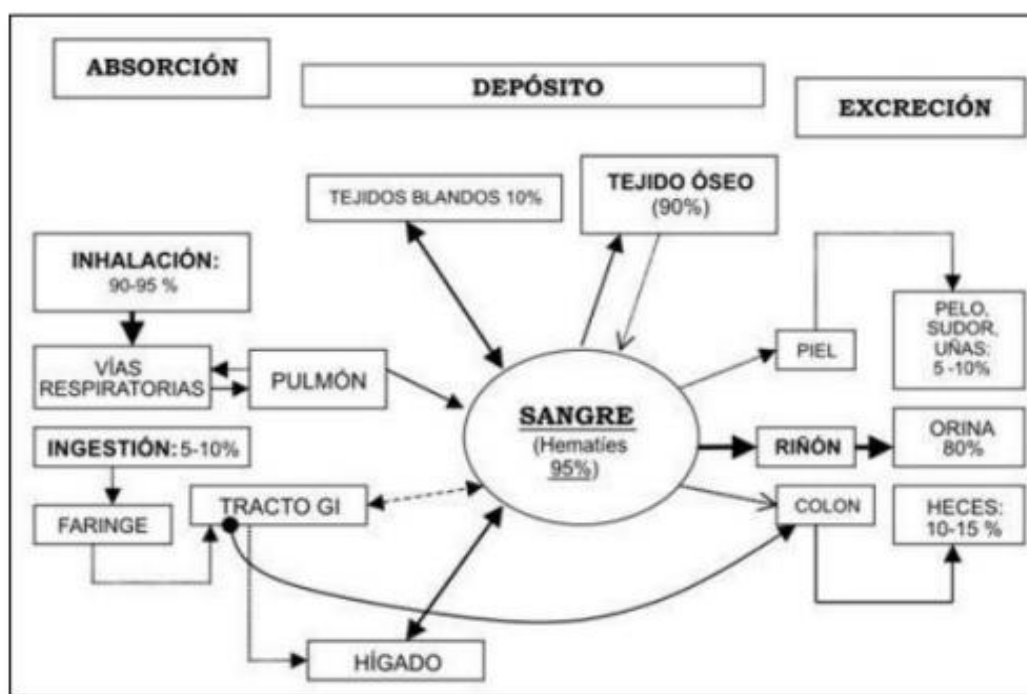
5.1.6 Plomo

Elemento químico, Pb, quinto elemento del grupo IVA en la tabla periódica; número atómico 82 y peso atómico 207.19. El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 s 16°C (61°F)), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate, se funde con facilidad, se funde a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F)[10].

▪ Toxicocinética

La absorción del plomo, como se evidencia en la figura 5-2, puede ser por las tres vías principales: respiratoria, digestiva o cutánea, siendo la vía respiratoria la más importante con un 90 a 95% de absorción en contraste con el 5% por vía gastrointestinal.

Figura 5-2. Modelo toxicocinético del plomo.



Fuente: [10]

Las sales inorgánicas del plomo generalmente se absorben por ingestión o inhalación mientras que las orgánicas pueden absorberse en un mayor porcentaje por la piel, siendo esta vía exclusiva para estos compuestos. La absorción gastrointestinal de los compuestos inorgánicos de plomo alcanza aproximadamente un 10 % de la dosis ingerida eliminando entre un 10% a 15% a través de las heces; este valor puede variar considerablemente según la solubilidad del compuesto y de forma inversamente proporcional a la riqueza del calcio y potasio en la dieta [33].

Por vía respiratoria el metal es inhalado a través de vapores, polvos y humos. Solo las partículas inferiores a una micra penetran hasta el alveolo, dicha absorción dependerá del tamaño de las partículas, la ventilación pulmonar y la solubilidad del compuesto [34]. El sistema óseo puede ser considerado como uno de los compartimientos que contiene la mayor cantidad (80-90%) del plomo almacenado en el organismo.

Su excreción es principalmente por vía renal siendo la de más importancia toxicológica debido a que se hace por filtración glomerular llegando a un 75%, aquella porción que no es absorbida se elimina por heces principalmente, empero, por este medio de la heces también se puede eliminar el Pb que no fue absorbido por el intestino y es excretado por la vía biliar, contrario a la orina mediante la cual es eliminado entre un 40 y 70% de lo absorbido por todas las vías. La eliminación por medio de la saliva y el sudor también es plausible, pero en menor medida que las descritas anteriormente [33,34].

▪ **Toxicodinamia**

El plomo absorbido se distribuye en riñón, hígado, encéfalo y huesos por semejanza con el calcio. El mayor depósito de plomo son los huesos hasta por 20 años; interfiere en la función del calcio, inhibe la síntesis de hemoglobina y causa daño neurológico. Los efectos agudos en sistema nervioso central consisten en parestesia, dolor y debilidad muscular, crisis hemolítica-anemia grave y hemoglobinuria. También afecta riñones con oliguria y albuminuria. Aunque la intoxicación aguda puede causar la muerte, es más frecuente que el paciente se recupere y presente intoxicación crónica con daño gastrointestinal, neuromuscular, nervioso, hematológico, renal y reproductivo. [11]

A nivel gastrointestinal hay anorexia, cefalea, estreñimiento, espasmo intestinal y dolor abdominal, los síntomas neuromusculares presenta debilidad muscular y cansancio seguida de parálisis de músculos del antebrazo, muñeca y dedos de la mano y algunas veces pies, estos síntomas eran característicos de enfermedad de pintores, en la actualidad la sustitución de pigmentos con plomo y las mejoras en las condiciones de seguridad e higiene industrial están propiciado la desaparición de esta Intoxicación. [11]

▪ **Cinética ambiental**

El plomo que se encuentra en los cuerpos de aguas superficiales por vertimientos directos de aguas residuales de industrias que lo contienen como materias primas o insumos, también es posible que a través de los sedimentos se deposite como producto de la precipitación de las trazas encontradas en la atmósfera [12]. Este metal se mantiene adsorbido al sedimento a cualquier pH lo que indicaría, que solo causaría un problema de salud si el agua que lo contiene es consumida [11].

5.1.7 Cadmio

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, segundo elemento del grupo IIB de la tabla periódica; número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado, tiene un peso atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68°F). Su punto de fusión de 320.9°C y de ebullición de 765°C [10].

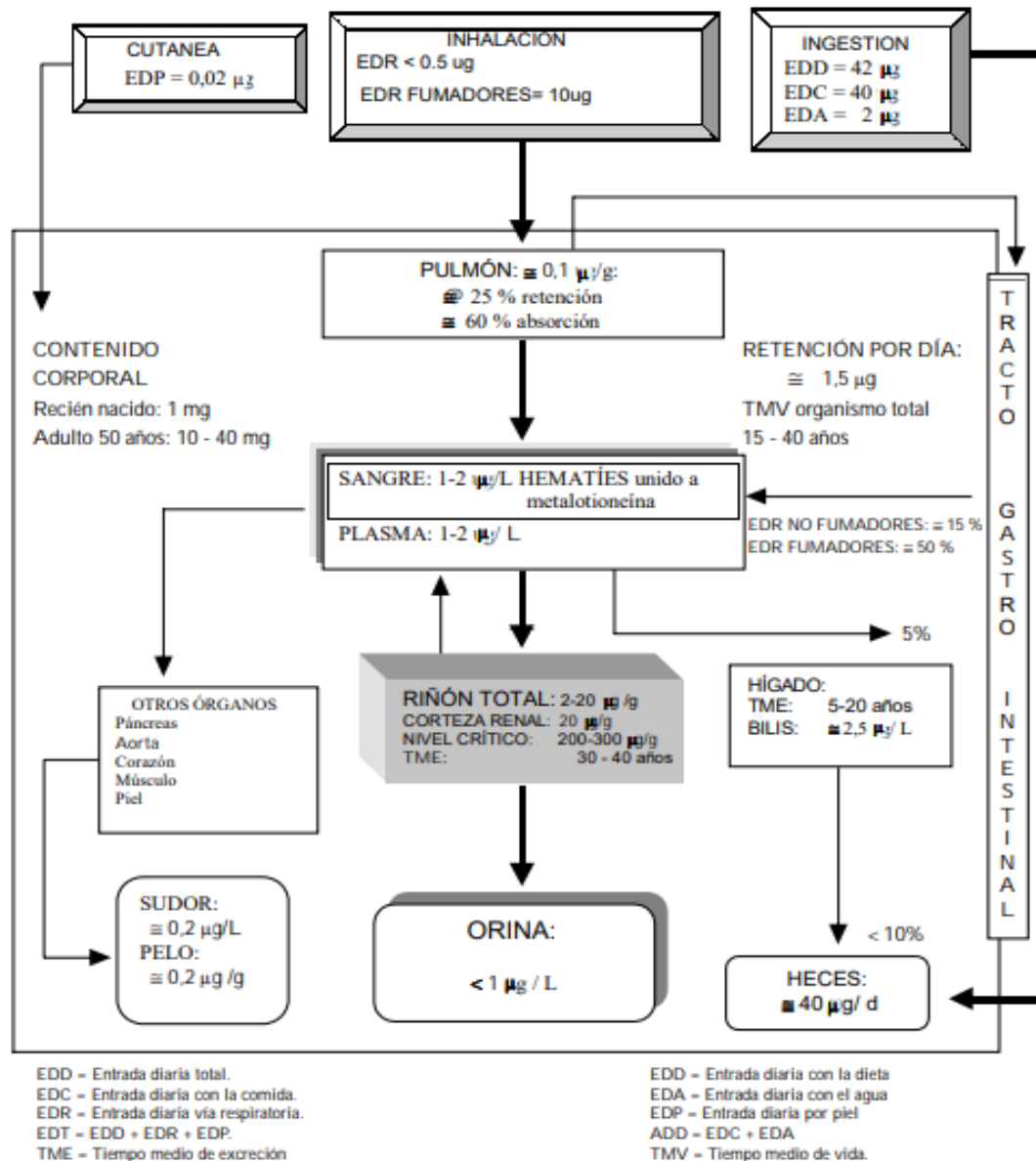
▪ Toxicocinética

Para la mayoría de seres vivos la mayor fuente de exposición son los alimentos y el agua por lo cual la principal vía de absorción del cadmio es la vía gastrointestinal por ingesta de los polvos de óxido de cadmio o de sus compuestos, no obstante, la vía respiratoria en comparación con las demás tiene un 88% menos de ingreso, en esta última, la exposición por inhalación de humos o vapores es una de las formas más frecuentes de ingreso al organismo. La exposición a este xenobiótico es más frecuente en el ámbito laboral, los puestos de trabajo más agresivos se hallan en la industria metalúrgica primaria de cadmio y plomo- zinc, en la producción de estabilizadores de plástico y en la fabricación de baterías de cadmioníquel [13, 14, 29].

La acumulación de Cd en riñón e hígado depende de la intensidad, del tiempo de exposición y del estado óptimo de la función de excreción renal. En ambos casos se ha encontrado incremento con la edad. Después de sobreexposición alcanza concentraciones elevadas en el hígado; pero con el tiempo el metal se localiza en el riñón [30].

La vida media del cadmio en el organismo total es de 30 a 40 años, las principales vías de excreción son orina y heces, por orina, diariamente se elimina 0,007% del contenido corporal y por heces 0,03%. La vida media de excreción urinaria es de hasta 40 años, tan sólo una pequeña fracción del cadmio del compartimento sanguíneo y otra del hígado, a través de la vía biliar, se elimina por heces [30]. En la figura 5-3 se muestra el modelo toxicocinético humano del cadmio en condiciones normales.

Figura 5-3. Modelo toxicocinético del cadmio.



Fuente: [30].

▪ Toxicodinámica

Los efectos de la toxicidad por Cd dependen del tipo de exposición, ya sea a través de la inhalación de aire contaminado, particularmente cerca de fundidoras y las incineradoras o del humo del cigarro, consumo de alimentos y agua contaminados.

Además, la deficiencia de metales esenciales como el hierro (Fe), Cu, Zn y calcio (Ca) en el cuerpo humano facilita la absorción de Cd, por lo tanto, sus órganos blancos son el riñón (especialmente la corteza renal), hígado, pulmón, hueso y placenta [30].

La Organización Mundial de la Salud menciona que la presentación y severidad de los signos, síntomas y alteraciones en el organismo se relaciona con las cantidades, el tiempo de exposición y con la vía de entrada del metal. En exposición crónica se observa anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos (cefalea, vértigo, alteración del sueño, temores, sudoración, paresia, contracciones musculares involuntarias), pérdida de peso y apetito, cáncer de próstata y pulmón mientras que en intoxicación aguda hay neumonitis y edema pulmonar, gastroenteritis, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, fallo renal, y finalmente puede ocurrir aberraciones cromosómicas, efectos teratogénicos y congénitos [30,31,32,11].

▪ **Cinética ambiental**

El sulfato de cadmio y cloruro de cadmio son muy solubles en agua, mientras que el cadmio elemental, óxido de cadmio y sulfuro de cadmio son casi insolubles; de los cuerpos de agua, los océanos son los que tienen las concentraciones más altas, respecto a los de agua dulce. Se cree que el reservorio oceánico del cadmio es más grande en comparación con las actuales contribuciones antropogénicas de cadmio en las aguas superficiales. Los ríos son los medios de transporte más importantes para los metales pesados en una escala nacional y regional [12].

Algunos grandes lagos transfronterizos pueden ser también medios de transporte importante para el cadmio en una escala nacional y regional. Se ha demostrado que la complejidad de cadmio con cloruro en agua de mar influye en gran medida su biodisponibilidad y por lo tanto la toxicidad para los organismos marinos. Es más probable que el cloruro complejo sea el responsable de la acumulación de cadmio y toxicidad reducida en una gran variedad de organismos observados con el aumento de salinidades [12]. La movilidad de cadmio en los ambientes acuáticos se ve reforzada por bajo pH, por baja dureza, por el alto potencial redox y de la baja salinidad. En los sistemas acuáticos, el cadmio se absorbe más fácilmente por organismos directamente desde el agua en su forma iónica libre [15].

En las aguas superficiales el cadmio se presenta como ion libre y en su solubilidad contribuyen la dureza, el pH, los complejos solubles y los sulfuros coloidales; en este medio se une a las partículas en suspensión. Cuando las aguas dulces llegan al mar, el ion cadmio +2, al igual que los iones de otros metales pesados, tiende a depositarse en los sedimentos y así queda acumulado en las aguas de las costas y los estuarios. Esta movilización puede llegar a disolverse de nuevo si disminuye el pH [16].

5.1.8 Evaluación de riesgo ambiental

La evaluación de riesgo ambiental se describe como un proceso mediante el cual se determina si existe una amenaza potencial que comprometa la calidad del agua, aire o suelo, poniendo en peligro la salud del ser humano como consecuencia de la exposición a tóxicos presentes en un sitio, incluyendo aquellos compuestos tóxicos presentes que son producto de actividades industriales ajenas al sitio o cualquier otra fuente de contaminación, y define un rango o magnitud para el riesgo [40,41]. En general la evaluación de riesgos formal incluye cuatro pasos principales que son los siguientes:

- **Identificación del peligro**

Consiste en la recolección de datos para determinar qué contaminantes están presentes, donde y en qué concentraciones, además de los tipos de efectos a la salud puedan provocar [21].

- **Evaluación dosis-respuesta**

El propósito de este paso es calcular la dosis (cantidad de exposición humana) a la que se puede observar un efecto adverso [21].

- **Evaluación de la exposición**

Los potencialmente afectadas o poblaciones vulnerables y las vías de exposición son identificadas con el fin de calcular la cantidad de exposición, en función de la frecuencia, la duración y la cantidad de contacto con el contaminante [21].

- **Caracterización del peligro**

Se integra toda la información obtenida de los componentes anteriores para determinar el riesgo actual de exposición a la sustancia tóxica [21].

6.Marco normativo

En Colombia el agua destinada para fines de consumo humano está regida por diferentes normas que establecen los parámetros y procedimientos para la vigilancia, control e inspección de la misma, con el fin de garantizar la calidad del recurso hídrico. En la tabla 6-1 se muestra la normatividad aplicable a este proyecto de grado, teniendo en cuenta que el decreto 1594 de 1984 se encuentra derogado y solo fue tomado como referencia para comparar los resultados encontrados de cadmio y plomo.

Tabla 6-1. Normatividad.

Norma	Entidad	Descripción
Decreto 1575 de 2007	Ministerio de Protección Social	Establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada
Resolución 2115 de 2007	Ministerio de la Protección Social; Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Decreto 1594 de 1984	Ministerio de la Protección Social; Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Establece los criterios de calidad del agua para consumo humano, uso agrícola e industrial entre otros. También, las normas 16 para el vertimiento en cuerpo de aguas y en el alcantarillado público y reglamenta los sistemas de tratamiento.

Fuente: elaboración propia.

7. Metodología

1. Recopilación información

Para realizar el proyecto fue necesaria información secundaria en libros, revistas y artículos científicos, sobre diferentes estudios sobre la afectación a la salud por exposición a cadmio y plomo en agua. Tomando como base principal la información contenida en el estudio: “Elaboración del mapa de riesgos de calidad del agua potable para la Quebrada Corales y el río San Francisco ubicados en el municipio de Guatavita”.

También se recolectó información en la página del municipio sobre la descripción general del municipio, cartografía, censos prediales, el esquema de ordenamiento territorial. Adicionalmente los datos contenidos en los RIPS los cuales fueron solicitados al Ministerio de salud y protección social, así mismo información sobre el sistema de abastecimiento de agua potable de Guatavita suministrada por la empresa pública de servicios del municipio (EMSER).

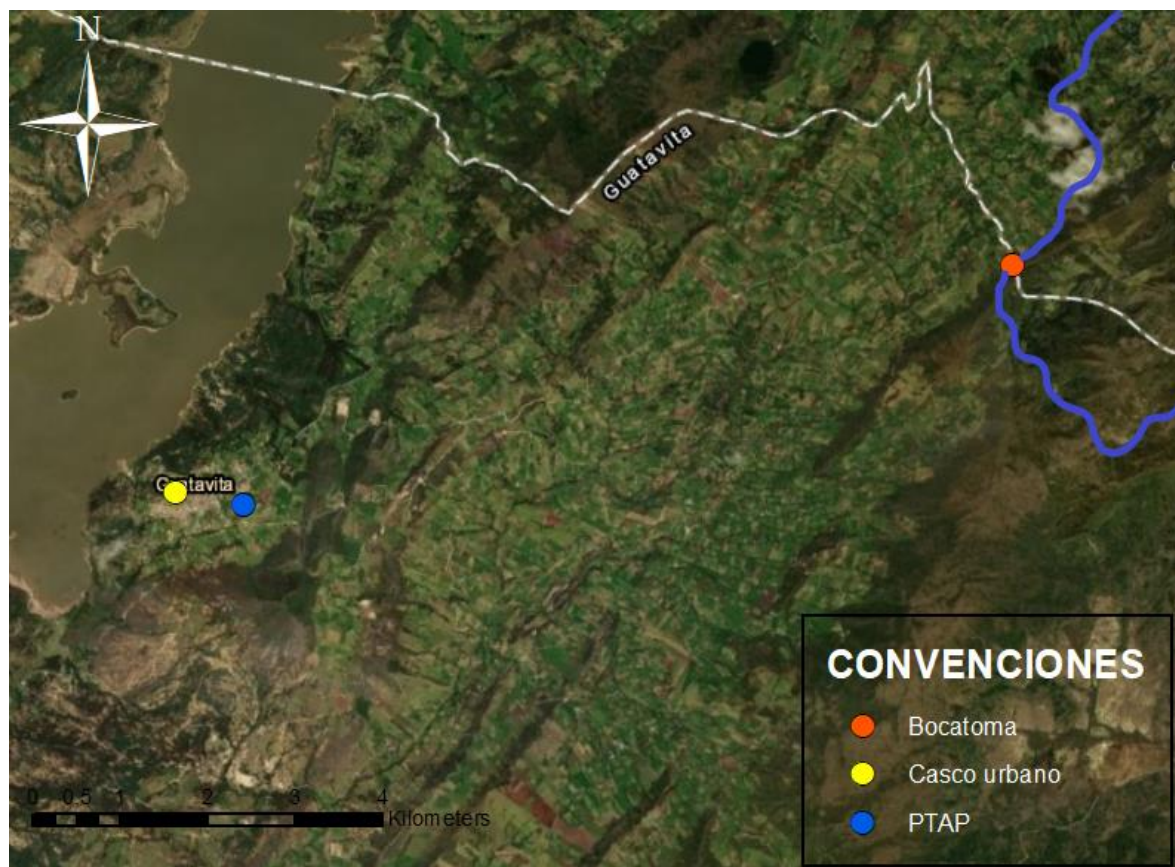
2. Diseño muestral

2.1. Muestreo agua

2.1.1. Identificación puntos de muestreo

Se definieron tres puntos de muestreo a lo largo del sistema de abastecimiento de agua potable del casco urbano de Guatavita, el primero ubicado a la altura de la bocatoma del río San Francisco la cual es la principal fuente abastecedora de agua del municipio, un segundo punto ubicado en la salida de la planta de tratamiento de agua potable y el tercer punto de un grifo perteneciente a una vivienda ubicada en el casco urbano. Estos puntos fueron definidos teniendo en cuenta un estudio previo en el cual se evidenciaron concentraciones de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable del municipio. (Figura 7-1).

Figura 7-1. Ubicación puntos de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Determinación de los parámetros in situ

Se realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos oxígeno disuelto, pH, conductividad, turbiedad, presión y temperatura con el fin de determinar la calidad del recurso según la normativa colombiana, estos parámetros se midieron haciendo uso del multiparámetro (HANNA) 98194 en las diferentes muestras tomadas a lo largo del sistema de abastecimiento de agua potable.

2.1.3. Toma muestra

Se realizó un muestreo simple manual en los puntos mencionados anteriormente durante los meses de mayo, julio y septiembre esto con el fin de analizar el comportamiento de los metales pesados de estudio frente a la variabilidad climática que se presentan en los meses de muestreo y con el fin de que sea un muestreo representativo. La primera muestra fue tomada en un punto ubicado a la altura de la bocatoma, esta fue tomada en la mitad del área de flujo del río con el fin de garantizar la representatividad, la segunda muestra fue tomada a la salida de la PTAP, se realizó un lavado y desinfección del grifo

del cual se tomó la muestra utilizando un paño empapado en una solución de hipoclorito de sodio.

La tercera muestra fue tomada del grifo de una vivienda perteneciente al casco urbano de Guatavita, al ser un muestreo intradomiciliario se realizó la desinfección del grifo y se recolectó la muestra después de dejar fluir el agua durante 3 min según lo establecido en el manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano. Las muestras fueron recolectadas y debidamente rotuladas en recipientes de vidrio de 1 litro de capacidad, los cuales fueron suministrados por el laboratorio Conocer LTDA, posteriormente se diligenciaron los formatos correspondientes para cada una de las muestras y se depositaron en una nevera con refrigerantes a 4 °C para garantizar la cadena de custodia de las mismas de acuerdo con lo establecido en protocolo de muestreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estas muestras fueron transportadas y entregadas en el laboratorio Conocer LTDA donde se llevaron a cabo los análisis de cadmio y plomo presentes en el agua [17][18].

2.1.4. Aforo

Para realizar el aforo en la bocatoma del río San Francisco se estableció un área transversal la cual no presentaba ningún tipo de obstáculo en la corriente que pudiera alterar el paso del agua y que fuera homogénea, inicialmente con la cinta métrica se midió el ancho del río y se calculó el número de secciones en función del ancho del río el cual fue medido con una cinta métrica, para calcular la velocidad de la corriente en cada sección fue necesario un molinete el cual se introduce en dirección aguas arriba de la corriente, a una altura equivalente al 20%, 60% y 80% según sea la profundidad de las secciones calculadas anteriormente [17].

Una vez se calcularon las áreas y las velocidades de cada sección se determinó el valor del caudal en cada sección mediante la ecuación 7-1. Finalmente se determina el caudal total sumando todos los caudales [17].

Ecuación 7-1. Cálculo del caudal 1.

$$Q = V * A$$

Fuente. [23]

Donde:

Q= caudal (m^3/s)

V= velocidad (m/s)

A= Área (m^2)

Para calcular el volumen de agua tanto en la salida de la PTAP como en el predio ubicado en el casco urbano se realizó un aforo volumétrico dado que se trataba de un flujo de agua pequeño proveniente de una tubería. (Ecuación 7-2)

Ecuación 7-2. Cálculo de caudal 2.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Fuente. [23]

2.1.5. Análisis de laboratorio

Las muestras tomadas fueron enviadas al laboratorio CONOSER el cual es acreditado por el IDEAM. La siguiente tabla evidencia la metodología utilizada en el laboratorio CONOSER Ltda., para determinar los parámetros de cadmio y plomo. Para la determinación de cadmio y plomo se utilizó la espectrometría de masas por plasma acoplado siendo un método que posee bastante sensibilidad en comparación a otros y siendo el método establecido por la resolución 1566 de 2016 para realizar este tipo de análisis.

Tabla 7-1. Método utilizado por el laboratorio.

Parámetro	Unidades	Método
Cadmio (Cd)	Mg Cd/L	Espectrofotometría por plasma
Plomo (pb)	Mg Pb/L	Espectrofotometría por plasma

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de laboratorio CONOSER se pueden evidenciar en el **Anexo B**.

2.2. Aplicación del instrumento de salud

2.2.1. Filtración de las preguntas contenidas en el instrumento de salud

Inicialmente se revisaron y analizaron las preguntas contenidas en la encuesta nacional de salud y de estudios previos referentes a la evaluación de la percepción en salud, posteriormente se filtraron y se redactaron las preguntas y la información más relevante que tendría la encuesta, dentro de esta se relacionan variables como edad, sexo, condiciones del agua potable, hábitos, condiciones de morbilidad, sintomatología asociada a la exposición de cadmio y plomo. Esto con el objetivo de evaluar la percepción en salud

en relación a la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable del municipio. **(Anexo A)**

2.2.2. Cálculo del tamaño de la muestra

Se realizó un muestreo aleatorio simple en predios elegidos al azar pertenecientes al casco urbano de Guatavita, basados en la proyección de la población del municipio de Guatavita para el 2019 realizada por el por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) el departamento en su zona urbana cuenta con 1960 habitantes y en promedio cada hogar se encuentra habitado por 4 personas [1].

A partir de esta información se procedió a calcular el número de muestra haciendo uso de la ecuación 7-3, esto con el fin de tener una muestra representativa y disminuir el sesgo en el estudio, los resultados del cálculo se muestran en la tabla 7-2.

Ecuación 7-3. Cálculo del tamaño de muestra para poblaciones finitas.

$$n = \frac{N Z^2 p q}{e^2 (N - 1) + Z^2 p q}$$

Fuente:[22]

Donde:

N= Total población

Z= Valor para el nivel de confianza asignado

p= Porcentaje de la población que tiene el atributo deseado

q= Porcentaje de la población que no tiene el atributo deseado

e= Error de estimación

n= Número de muestras

- 32 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita
-

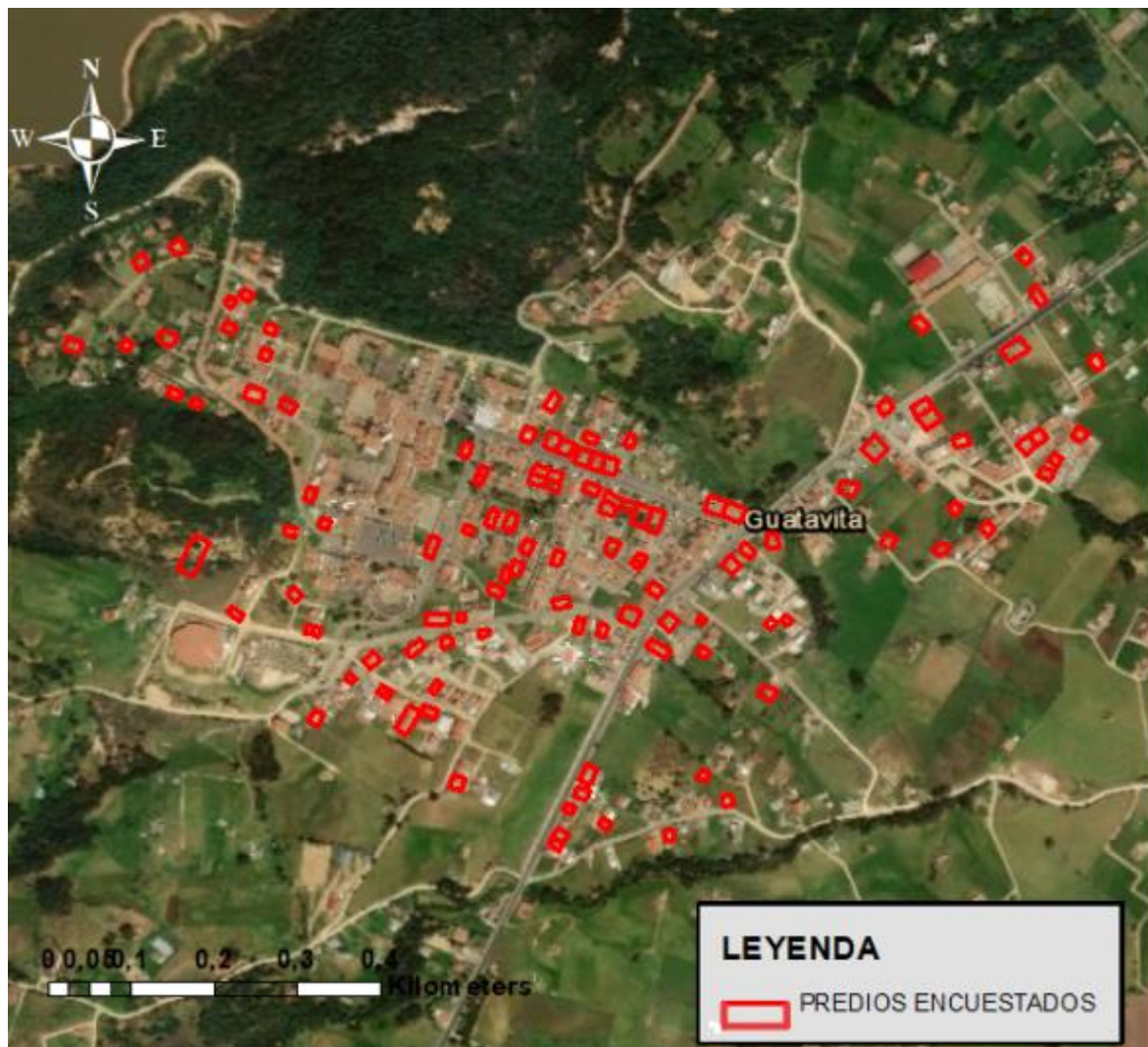
Tabla 7-2. Resultados del cálculo de muestra para poblaciones finitas.

Variable	Valor
N	490
Z	1,96
P	0,9
Q	0,1
e	5%
n	108

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Distribución espacial de las encuestas

Una vez calculado el número de muestras se procedió a realizar el muestreo aleatorio simple en el casco urbano del municipio de Guatavita en el cual se eligieron 108 predios escogidos al azar que se encontraran dentro de la zona urbana del municipio y que tuvieran acceso al sistema de acueducto, para esto lo primero que se hizo fue elaborar un mapa en ArcGIS del casco urbano donde se lograra identificar todos los predios, esto con el fin de lograr aplicarlas en todo el casco urbano de manera que no quedan zonas sin encuestar como se muestra en la figura 7-2

Figura 7-2. Predios encuestados.

Fuente: elaboración propia.

Teniendo ya las zonas ubicadas se procedió a diligenciar las encuestas para esto se llevaron a cabo varias visitas al casco urbano de Guatavita en donde una de las personas de cada hogar respondía las diferentes preguntas contenidas en la encuesta.

3. Análisis de los RIPS

Se realizó una revisión de la información contenida en los Registros individuales de prestación de servicios (RIPS) del municipio de Guatavita, estos fueron suministrados mediante un derecho de petición al ministerio de salud y protección social. Posteriormente se filtró y se analizó la información de los RIPS según la clasificación de las enfermedades

según la CIE-10, periodo de tiempo, número de atenciones entre otras, esto con el objetivo de identificar y analizar qué enfermedades y sintomatología podría estar relacionada con la información contenida en las encuestas.

4. Análisis estadístico

Se realizó un análisis mediante estadística descriptiva e inferencial, con la ayuda del software SPSS se realizó la prueba de normalidad de Shapiro wilk y se procedió a correlacionar mediante la prueba de Pearson el comportamiento de las variables dependientes cadmio y plomo con las variables número de casos por enfermedades asociadas a la exposición de los metales de estudio y con la variable caudal, esto con el fin de determinar si existe algún tipo de relación y la significancia de la misma.

5. Análisis de riesgo

5.1. Dosis suministrada

Para realizar el análisis de riesgo se calculó la Dosis Suministrada (Ds), esta se determinó para los metales pesados Cadmio y plomo teniendo en cuenta que se tomó la vía oral como única vía de exposición, se expresara en términos de cantidad la sustancia (mg) consumida por unidad de masa corporal (Kg) por unidad de tiempo [21].

Ecuación 7-4. Dosis Suministrada (Ds).

$$Ds = \frac{(concentración) * (tas\ de\ contacto) * (frecuencia) * (duración)}{(Masa\ corporal) * (tiempo\ de\ ponderación)}$$

Fuente.[21]

C= Concentración promedio durante el periodo de exposición [mg/l]

T= tasa de contacto, la cantidad de medio contactado por unidad de tiempo [l]

F = frecuencia de exposición [Años]

D = duración [Años]

M = masa corporal [Kg]

P = Promedio de vida [Años]

Concentraciones de exposición: la concentración de exposición C se calcula con base en los datos de concentraciones de un contaminante hallado en un muestreo ambiental.[21]

Tasa de contacto: Representa la cantidad de medio contaminado contactado por unidad de tiempo o por evento. Si se dispone de datos estadísticos de tasas de contacto se debe de seleccionar el límite superior de confianza percentil 90 o 95 del promedio. Si no se cuenta con información estadística, entonces se debe seleccionar por experiencia, un valor similar al del percentil 95[21].

Frecuencia y duración de la exposición: Estas dos variables se utilizan para calcular el tiempo total de exposición. Los valores que pueden tomar dependen del sitio, sin embargo, es muy difícil que existan datos estadísticos sobre un sitio en particular [21].

Masa corporal: Para niños se utiliza como valor de peso corporal el valor estándar encontrado en las tablas de "peso para la edad". La exposición vitalicia se estima por un promedio ponderado por tiempo de exposiciones estimadas para todos los grupos etarios. Cuando los contactos son, más o menos, constantes durante el período vital, como la ingesta de agua, se utiliza el valor de 70 Kg. como valor de la masa corporal [21].

Tiempo de promediación: El tiempo de promediación seleccionado depende del tipo de efecto tóxico que se esté evaluando. Cuando se evalúan exposiciones a sustancias tóxicas para el desarrollo, los insumos se calculan promediando sobre el período del evento de exposición [21].

5.2. Caracterización del riesgo

Por último se realizó el análisis de riesgo, en este se comparó el valor de la dosis suministrada con los valores de la normatividad colombiana e internacional para el consumo de agua contaminada con cadmio y plomo, con el fin de determinar si el riesgo es tolerable y no genera afectación en la salud de la población[21].

Ecuación 7-5. Nivel de riesgo.

$$Riesgo = \frac{Ds}{Ddr}$$

Ds=Dosis suministrada

DsR=dosis de referencia para exposiciones orales

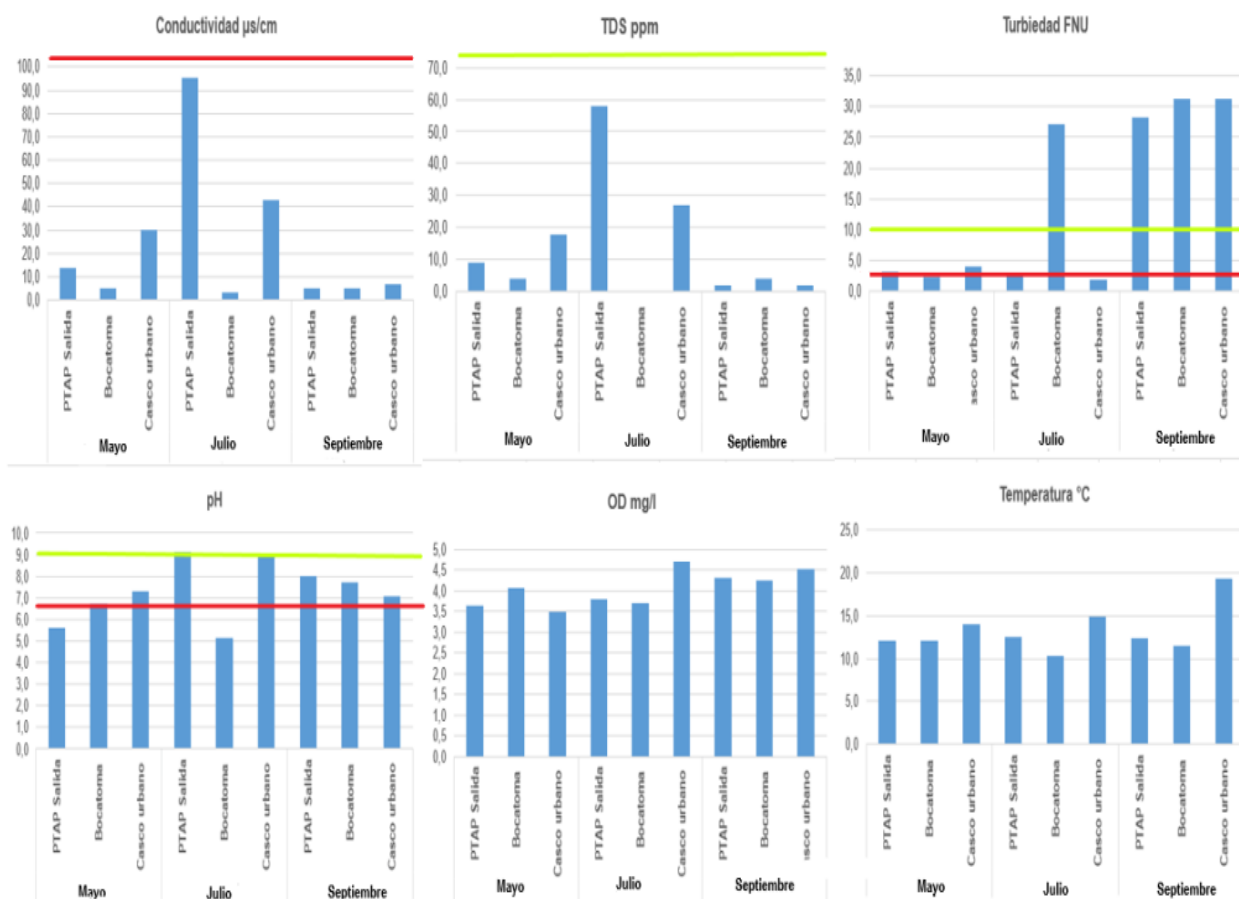
Una vez calculado el nivel de riesgo se establece si el valor es menor a uno el riesgo es aceptable y si se excede el valor del riesgo es inaceptable.

8. Resultados

8.1 Determinación de los parámetros in situ

Los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo en los tres puntos de muestreo definidos durante los meses de Mayo, Julio y Agosto se muestran en la gráfica 8-1, estos parámetros fueron determinados mediante el uso del equipo multiparámetro Hanna Hi 9829. Estos resultados se compararon con la normativa colombiana, representando así lo contemplado en la resolución 2115 de 2007 a través de una línea roja y el decreto 1594 de 1984 a través de una línea verde, debido a que el muestreo se realizó tanto en agua potable como en agua superficial.

En el gráfico 8-1, se observa como casi todos los parámetros están dentro del rango permitido por la normativa colombiana o en su defecto por debajo, lo cual determina que tanto el agua superficial como la tratada en la PTAP poseen una buena calidad, el pH se encuentra en el rango entre 6,5 y 9, la conductividad se mantiene por debajo de los 1000 microsiemens al igual que los sólidos disueltos totales por debajo de los 500 mg/l establecidos. Sin embargo, parámetros como el oxígeno disuelto está por debajo de los valores normales encontrados en diferentes estudios donde su valor oscila entre los 6.0 y 8.0 mg/l y en 80 % respectivamente, la turbiedad se encuentra muy por encima de los valores establecidos llegando a tomar un valor máximo de 31,3 FNU [44].

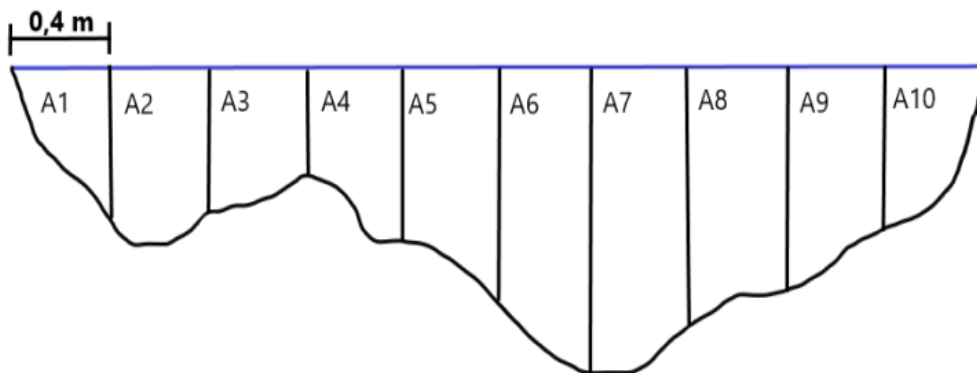
Gráfica 8-1. Resultados medición de parámetros fisicoquímicos.

Fuente: elaboración propia.

8.2 Aforo

Con el fin de calcular el caudal del río San Francisco a la altura de la bocatoma se dividió el ancho del mismo en 10 secciones transversales distanciadas a 0.4m, esto para determinar el área de cada una de las secciones transversales. (Figura 8-1)

Figura 8-1. Secciones transversales del río San Francisco.



Fuente: elaboración propia.

Con las áreas calculadas se calculó la velocidad media de cada sección mediante un micromolinetete y así hallar el caudal a la altura de la bocatoma en cada una de las fechas de muestreo (Tabla 8-1).

Tabla 8-1. Caudales de la bocatoma del río San Francisco.

AFORO			
Caudal m ³ /s	Mayo	Julio	Septiembre
	0,64	0,61	1,6

Fuente: elaboración propia.

El caudal promedio del río San Francisco es de 0,95 m³/s , en la tabla 8-1 se evidencia que el caudal más bajo se presentó en el mes de Agosto seguido del mes de junio y que el mayor caudal se registró en el muestreo realizado en septiembre, lo cual se explica debido a que la segunda temporada de lluvias en Colombia va de Septiembre a Octubre, estos son meses donde más se presentan precipitaciones en Colombia aumentando los niveles de agua en los ríos y por ende su caudal [24][. Adicionalmente se realizó un aforo volumétrico para calcular el caudal en los puntos de muestreo ubicados en la salida de la PTAP y en el predio del casco urbano (tabla 8-2).

Tabla 8-2. Caudales hallados mediante el método volumétrico.

Temporada	Punto de muestreo	caudal (L/s)
1	PTAP salida	0,048
	Predio casco urbano	0,047
2	PTAP salida	0,050
	Predio casco urbano	0,049
3	PTAP salida	0,050
	Predio casco urbano	0,048

Fuente: elaboración propia.

A partir de la información contenida en la tabla mencionada anteriormente se puede observar que el valor promedio de los caudales calculados en los puntos de la PTAP y del predio es de 0,048 l/s y que varían muy poco respecto a la media arrojando así un valor de la desviación estándar de 0,001.

8.3 Determinación de cadmio y plomo

Los resultados de las muestras de agua analizadas por el laboratorio CONOSER LTDA provenientes de los diferentes puntos de muestreo y para las diferentes fechas se muestran en la tabla 8-3.

Tabla 8-3. Concentraciones de cadmio y plomo presentes muestras de agua.

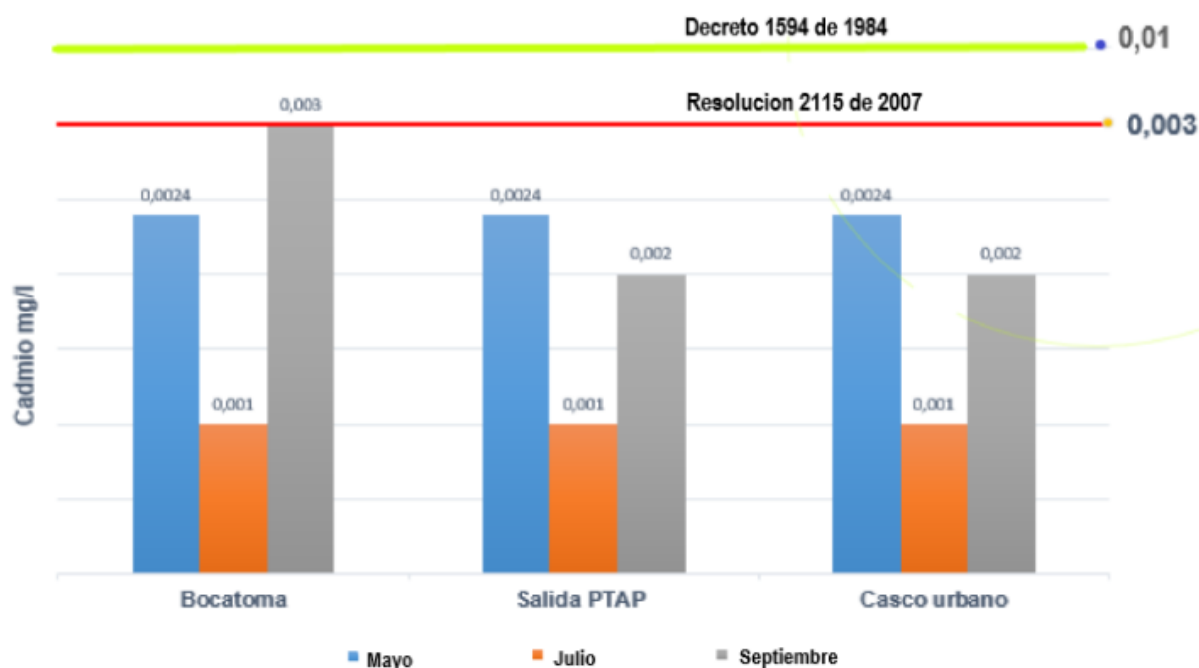
Parametro	Mayo			Julio			Septiembre		
	Bocatoma	Salida PTAP	Casco urbano	Bocatoma	Salida PTAP	Casco urbano	Bocatoma	Salida PTAP	Casco urbano
Cadmio (mg/l)	0,0024	0,0024	0,0024	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002
Plomo (mg/l)	0,001	0,001	0,001	0,004	0,004	0,004	0,001	0,001	0,001

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta la toxicidad de los metales pesados de estudio en este caso cadmio y plomo se compararon las concentraciones presentadas en la anterior tabla con los valores máximos permisibles establecidos en la resolución 2115 de 2007 para las muestras tomadas en los puntos ubicados en la salida de la PTAP y en el predio del casco urbano dado que estas muestras corresponden al agua ya potable, mientras que para las muestras tomadas en el punto de la bocatoma se comparó con el decreto 1594 de 1984 al tratarse de muestras tomadas en agua superficial .

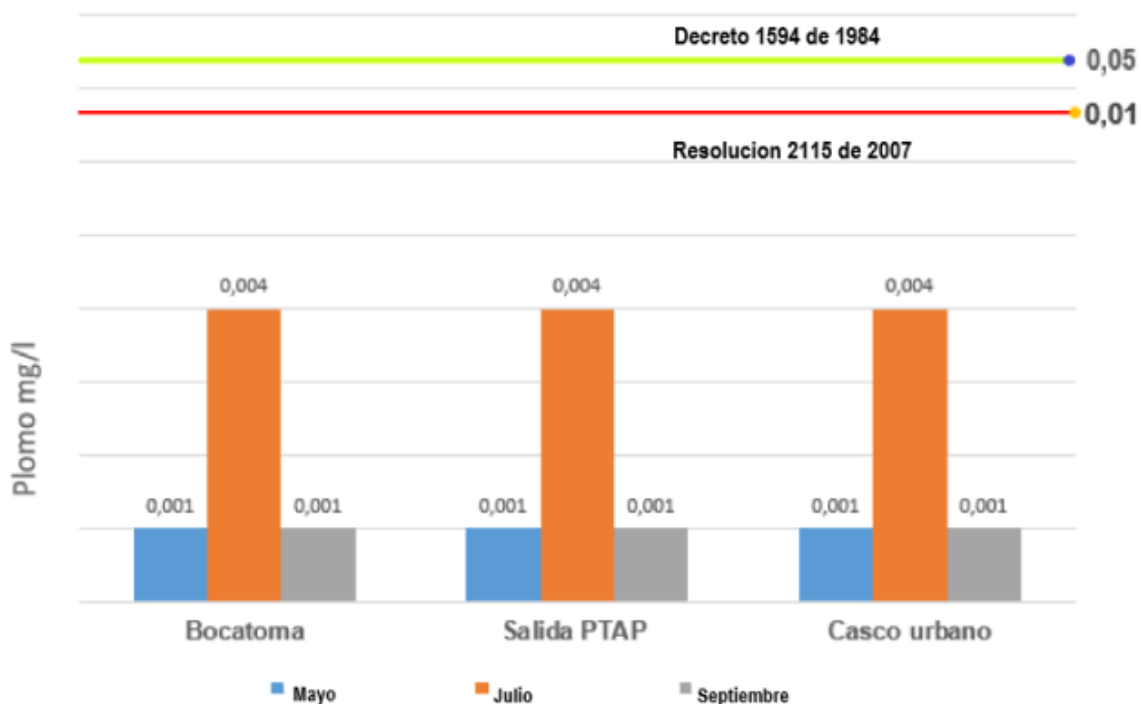
El cadmio no supera las concentraciones máximas permisibles en ninguno de los puntos y tampoco en ninguno de los 3 meses en los que se llevó a cabo el muestreo, la concentración de cadmio más alta se presenta en el mes de Septiembre a la altura de la bocatoma sin embargo luego disminuye al ser tratada en la planta de tratamiento de agua potable posiblemente porque se elimina parte de este en su fase acuosa con el tratamiento de coagulación que se realiza en la PTAP. También se observa que en las muestras tomadas en Julio se presentan las concentraciones más bajas (Gráfica 8-2).

Gráfica 8-2. Concentraciones de cadmio por puntos y fechas de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

De igual forma el plomo es un metal pesado que genera efectos adversos en la salud humana por lo cual se compararon las concentraciones de la tabla 8-3 con los valores permisibles en la normativa. Las concentraciones de plomo en los diferentes puntos y temporadas de muestreo se encuentran por debajo de lo establecido por la normativa colombiana, aun así, se evidencia que las concentraciones son mayores en mes de julio en todos los puntos de muestreo. (Gráfico 8-3)

Gráfica 8-3. Concentraciones de plomo por puntos y fechas de muestreo.

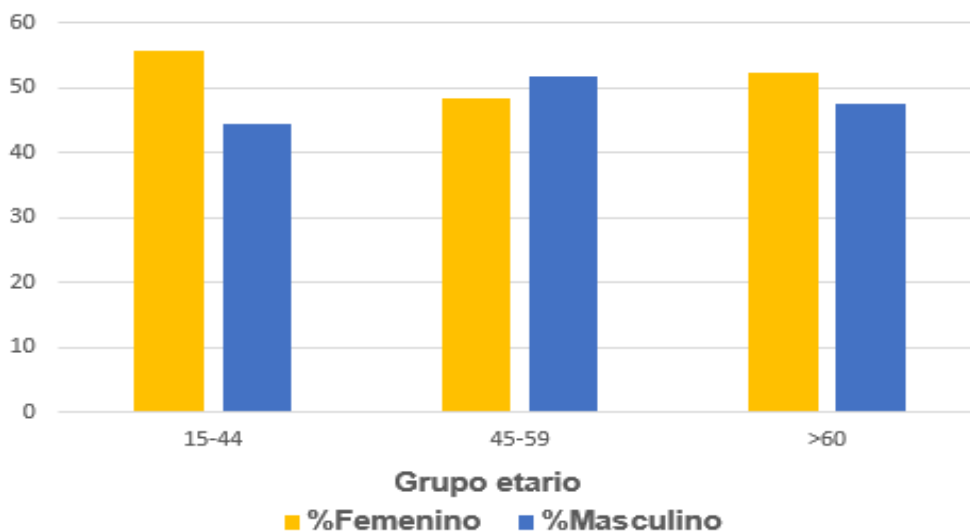
Fuente: elaboración propia.

De la gráfica 8-2 y 8-3, se puede concluir en un principio que tanto las concentraciones de cadmio como de plomo se ven influenciadas por la variabilidad climática de cada uno de los meses en los que se realizó el muestreo [43].

8.4 Encuestas

Se realizaron 108 encuestas en todo el casco urbano de Guatavita, las encuestas contenían preguntas de saneamiento básico, calidad del agua potable y condiciones de salud, se realizó el análisis estadístico y gráfico de las preguntas más relevantes para desarrollar el trabajo de grado y se muestran a continuación.

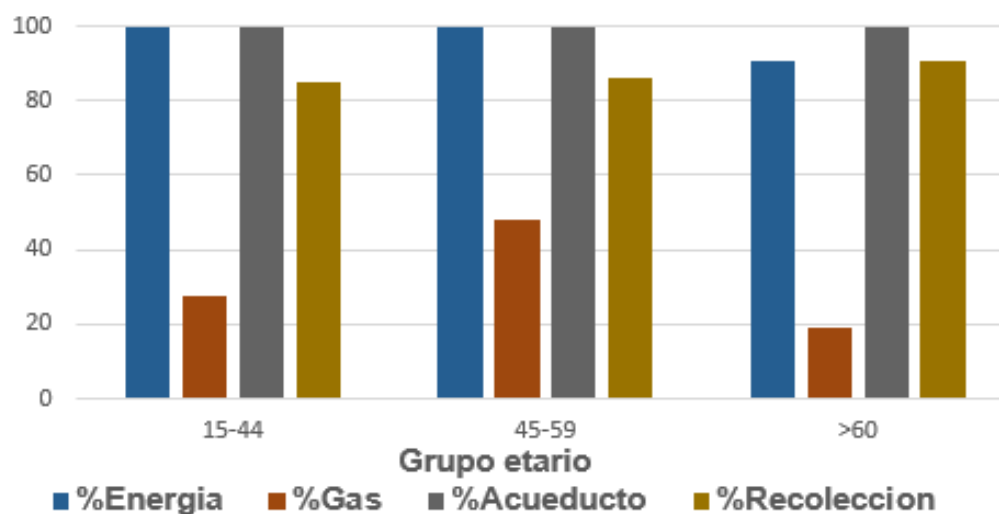
Gráfica 8-4. Resultados de la pregunta ¿cuál es su sexo?



Fuente: elaboración propia.

A partir de esta gráfica se puede evidenciar que la mayoría de las personas encuestadas corresponden al género femenino siendo un 53% del total de encuestados contra un 47% de hombres, así mismo se puede observar que en el único grupo donde se encuestó más hombres que mujeres fue en el grupo de edades entre los 45 y 59 años. En cuanto a la cobertura de servicios encontramos que el 100% de los encuestados en cada grupo etario cuenta con el servicio de acueducto seguido del servicio de energía y recolección de basura y en último lugar el servicio de gas natural (gráfica 8-5).

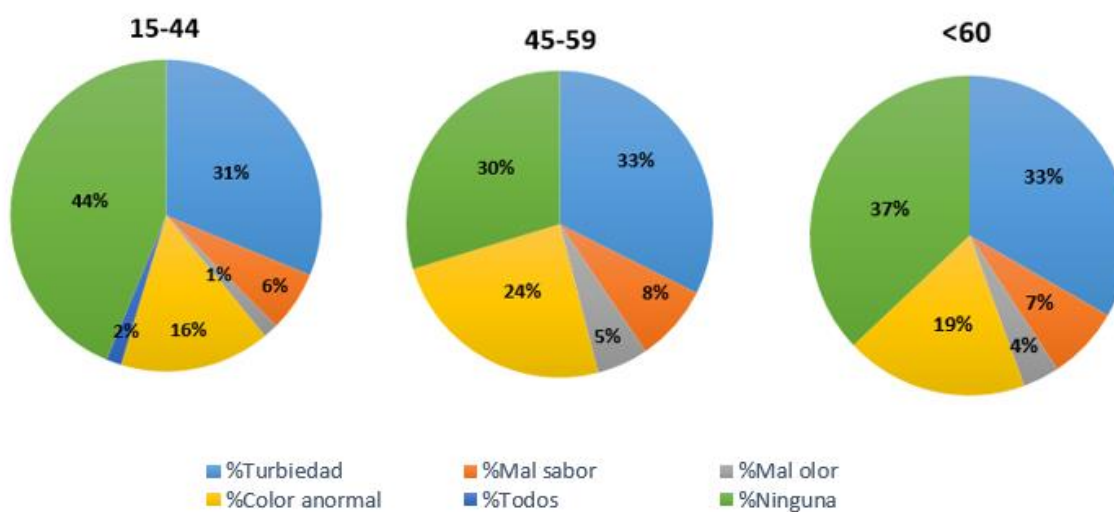
Gráfica 8-5. Resultados de la pregunta ¿Con cuáles de los servicios públicos cuenta?



Fuente: elaboración propia.

Con respecto a las características que presenta el agua potable que llega a la población se puede ver que existe una clara percepción en los tres grupos etarios de que el agua presenta turbiedad, un color anormal y un mal sabor. (Gráfica 8-6).

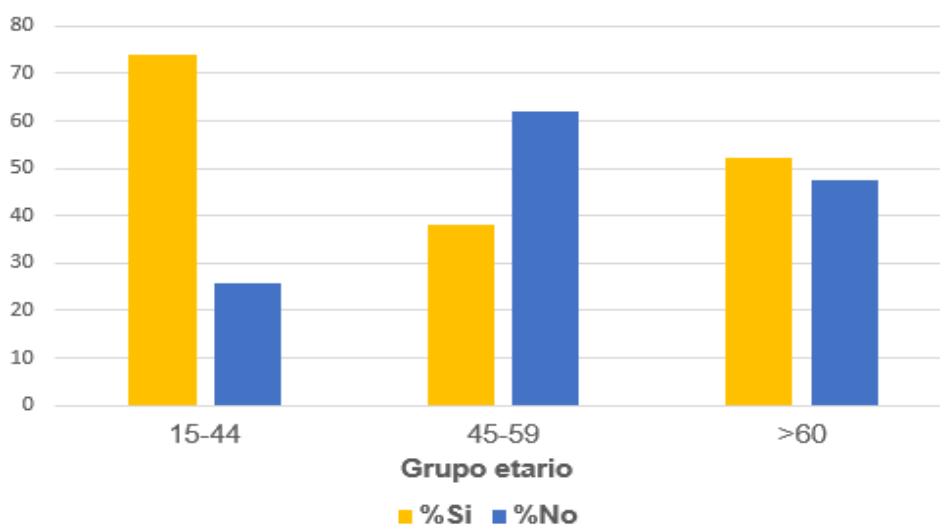
Gráfica 8-6. Resultados pregunta ¿El agua que llega a su hogar presenta alguna de estas características?



Fuente: elaboración propia.

En cuanto al consumo del agua podemos observar que en la población joven de 15-44 años casi el 80% de las personas tiende a hervir el agua antes de tomarla de la llave, por el contrario, en el grupo entre los 45 - 59 años en su mayoría no realizan ningún tipo de tratamiento previo al agua que sale del grifo y finalmente en el grupo de adultos mayores poco más de la mitad de los encuestados tratan el agua previamente antes del consumo. Lo anterior se presenta en el gráfico 8-7.

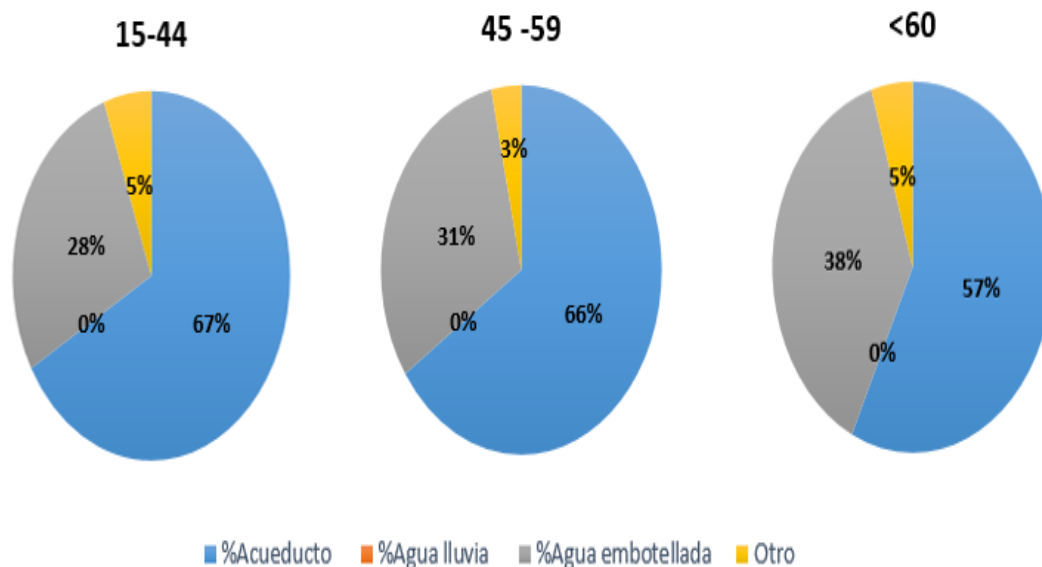
Gráfica 8-7. Resultados a la pregunta ¿Realiza algún tipo de tratamiento al agua antes de beberla del grifo?



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 8-8 se puede observar que la mayor parte de la población tiene como principal fuente de agua aquella proveniente del acueducto, sin embargo, una gran parte de alrededor del 30% de los encuestados pertenecientes a los 3 grupos etarios prefieren comprar agua embotellada para beber y preparar sus alimentos como se muestra en la siguiente gráfica.

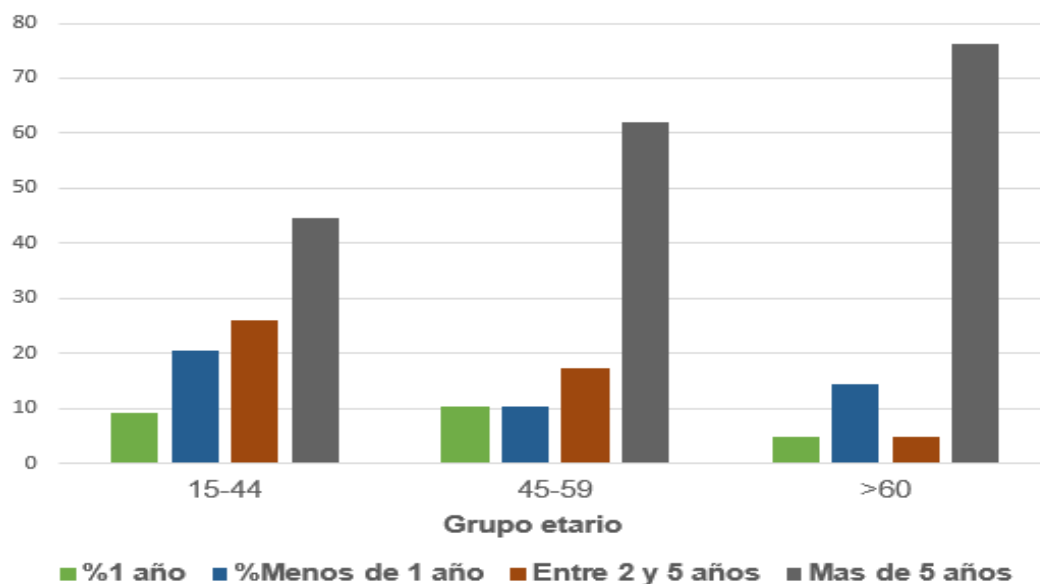
Gráfica 8-8. Resultados de la pregunta ¿Cuál es la principal fuente de agua que utilizan para beber y preparar los alimentos?



Fuente: elaboración propia.

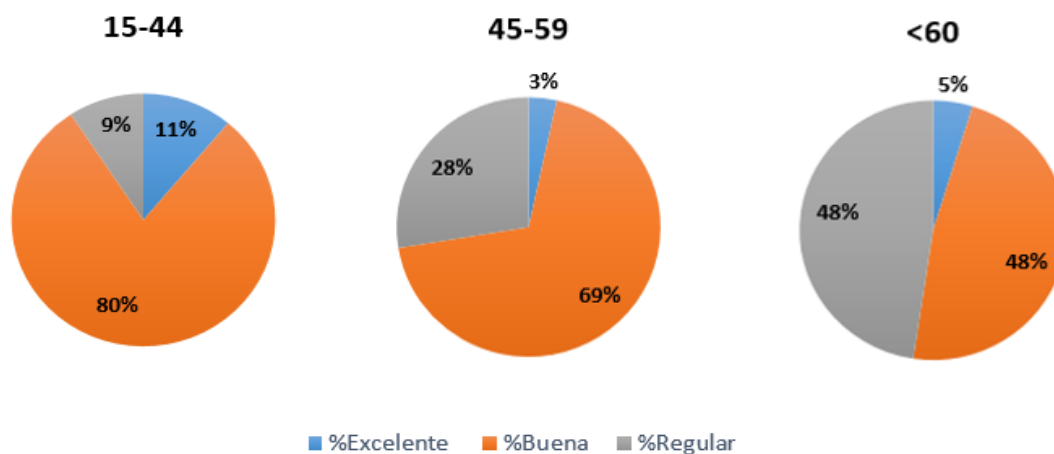
A partir de la gráfica 8-8, también se puede analizar que muchos de sus habitantes desconfían de la calidad del agua que llega a sus hogares, bien sea por la turbiedad que esta posee, su extraño sabor en ocasiones o simplemente porque cree que puede contener algún tipo de contaminante en ella, por lo cual fue una pregunta clave teniendo en cuenta que los análisis de laboratorio arrojaron pequeñas trazas de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable. En cuanto al tiempo de residencia se encontró que la mayoría de la población encuestada reside allí hace más de 5 años siendo este valor es más alto en el grupo etario >60 años y en el de 45-59, esto debido a que la población joven tiende a emigrar hacia las grandes ciudades para trabajar y estudiar mientras que los adultos y adultos mayores prefieren pasar su vejez en un sitio tranquilo como Guatavita (gráfica 8-9).

Gráfica 8-9. Resultados de la pregunta ¿Hace cuánto tiempo vive en esta casa?



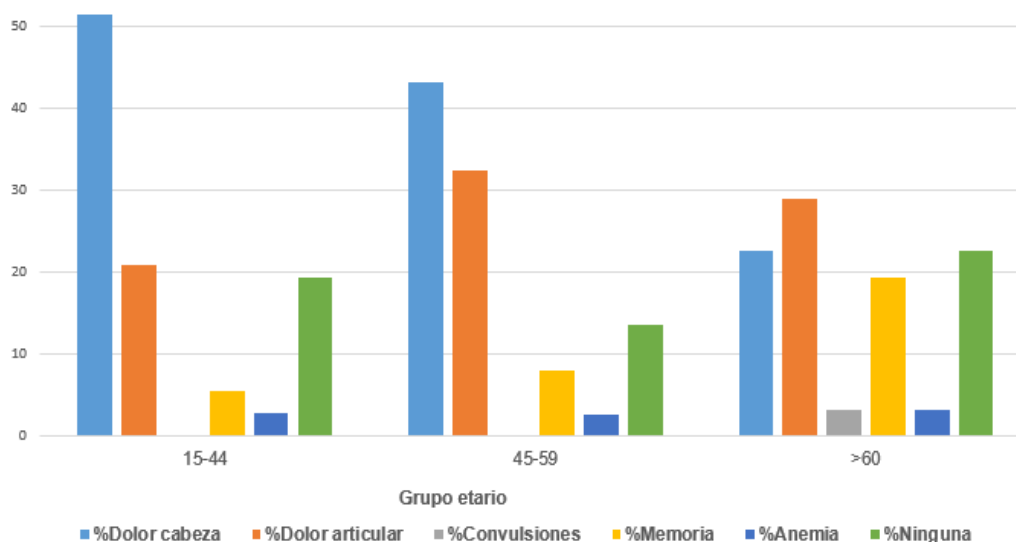
Fuente: elaboración propia.

Esta pregunta fue de las más importantes debido a que la toxicidad de una sustancia como el cadmio y plomo depende de la concentración de dicha sustancia, la vía de exposición y del tiempo al cual se halla expuesto [25], como se evidencia en la gráfica anterior la mayor parte de los habitantes llevan expuestos durante más de 5 años a pequeñas trazas de estos metales tóxicos que podrían estar generando efectos en su salud. La siguiente gráfica nos muestra la percepción que tiene la población de su estado de salud, siendo un comportamiento normal que entre más avanza la edad de las personas mayor es su deterioro en salud y por lo tal en el grupo de mayores de 65 años se evidencia que el 49 por ciento de los encuestados piensan que su salud es regular, mientras que los otros grupos más jóvenes la mayor parte tiene una percepción positiva de su salud (gráfica 8-10).

Gráfica 8-10. Respuesta a la pregunta ¿En general diría que su salud es?

Fuente: elaboración propia.

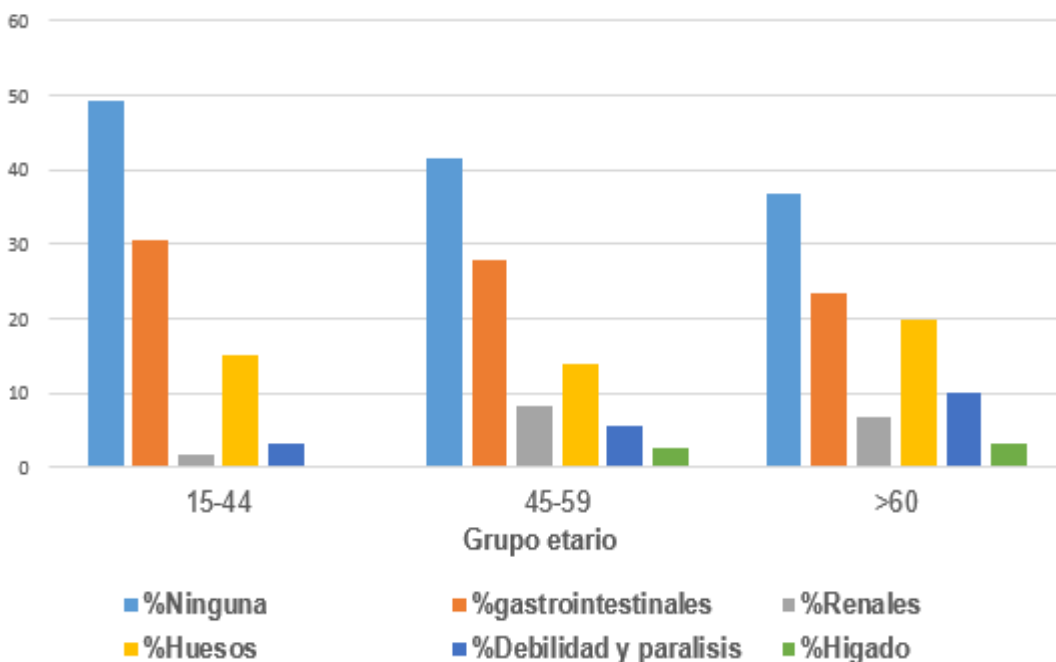
Con respecto a la sintomatología de la población de Guatavita se observa que en los grupos más jóvenes el principal síntoma que se presenta es el dolor de cabeza, seguido del dolor articular y de pérdida de memoria, en el grupo de adulto mayores el mayor síntoma que se presenta son los dolores articulares y con un alto porcentaje los problemas de memoria y además un pequeño porcentaje de convulsiones. También se evidencia que un 3% de los encuestados de cada grupo han presentado anemia (Gráfico 8-11).

Gráfica 8-11. Resultados de la pregunta ¿Usted o alguien de su familia ha presentado estos síntomas recientemente?

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente gráfica se muestra que aunque gran parte de los encuestados no ha sido diagnosticado con ninguno de estos síntomas recientemente existe un porcentaje del casi 30% en cada grupo etario que ha presentado enfermedades gastrointestinales seguido de problemas de los huesos siendo más frecuente en los adultos mayores, se muestran problemas de salud muy específicos como renales y del hígado e incluso del sistema nervioso, estos resultados con respecto a la sintomatología son de importancia en el desarrollo del trabajo debido a que si bien algunos síntomas pueden ser resultado de diversos factores algunos pueden estar posiblemente relacionados con la exposición a plomo y cadmio.

Gráfica 8-12. Resultados de la pregunta ¿Usted o alguien de su familia ha presentado estos problemas de salud recientemente?

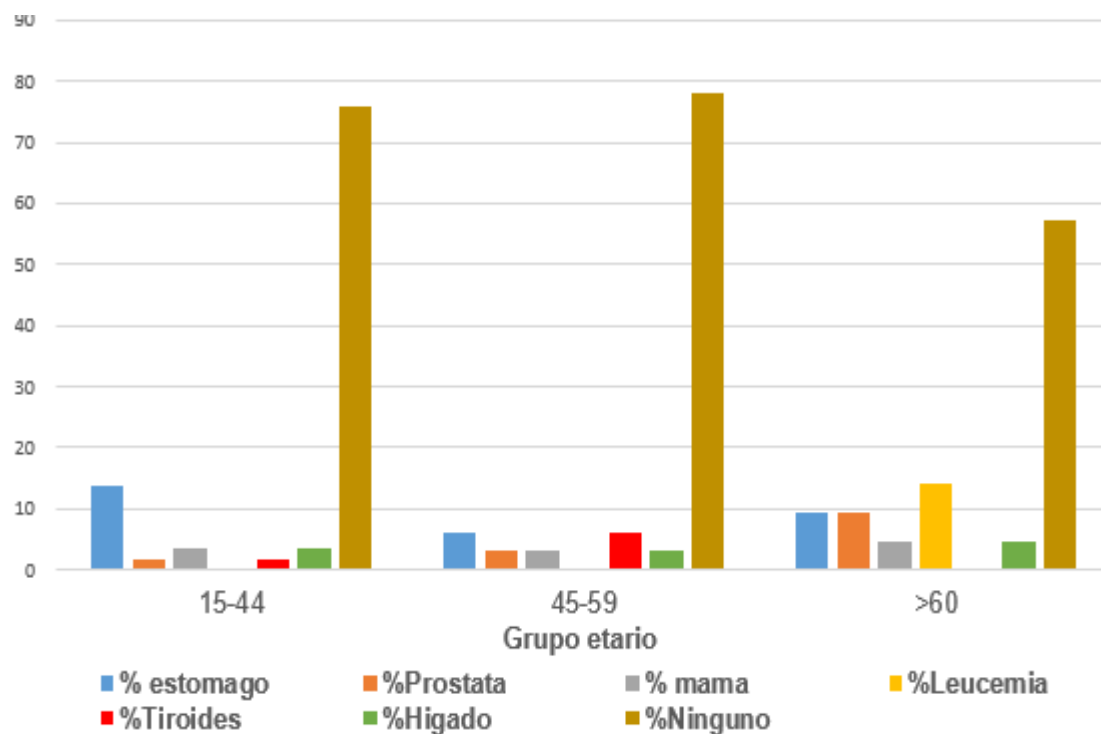


Fuente: elaboración propia.

Debido a que la exposición a cadmio y plomo está relacionada con algunos tipos de cáncer se realizó la última pregunta de la encuesta donde se puede analizar que, aunque la mayor parte de la población encuestada en el casco urbano no presenta ningún tipo de cáncer

los pocos casos identificados corresponden en medida a los tipos de cáncer asociados a exposiciones prolongadas a metales pesados (Grafica 8-13).

Gráfica 8-13. Resultados a la respuesta ¿Usted o alguien de la familia ha sido diagnosticado con algún tipo de cáncer recientemente? ¿Cuál?



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 8-13, se evidencia que el 14% de los encuestados del grupo de 15 a 44 años presentan este cáncer seguido por el cáncer de mama y de hígado, en el segundo grupo etario se ve que el cáncer de estómago sigue siendo el de mayor frecuencia junto con el de tiroides y en menor medida próstata, mama e hígado. Por último se observa como el grupo de personas mayores es el que más ha sido diagnosticado, el 42% de los encuestados presenta algún tipo de cáncer siendo la leucemia el más significativo con un 14% seguido de nuevo por el de estómago y próstata.

8.5 Análisis de los RIPS

Para realizar el análisis de los registros individuales de prestación de servicios de salud (RIPS) del municipio de Guatavita de los años 2017, 2018 y 2019 en el centro poblado y cabecera municipal fue necesario filtrar en la base de datos los diagnósticos pertenecientes a las patologías según la CEI-10 relacionadas con la ingesta de cadmio y plomo, clasificándolos en los diferentes grupos etarios como se muestra en la tabla 8-4.

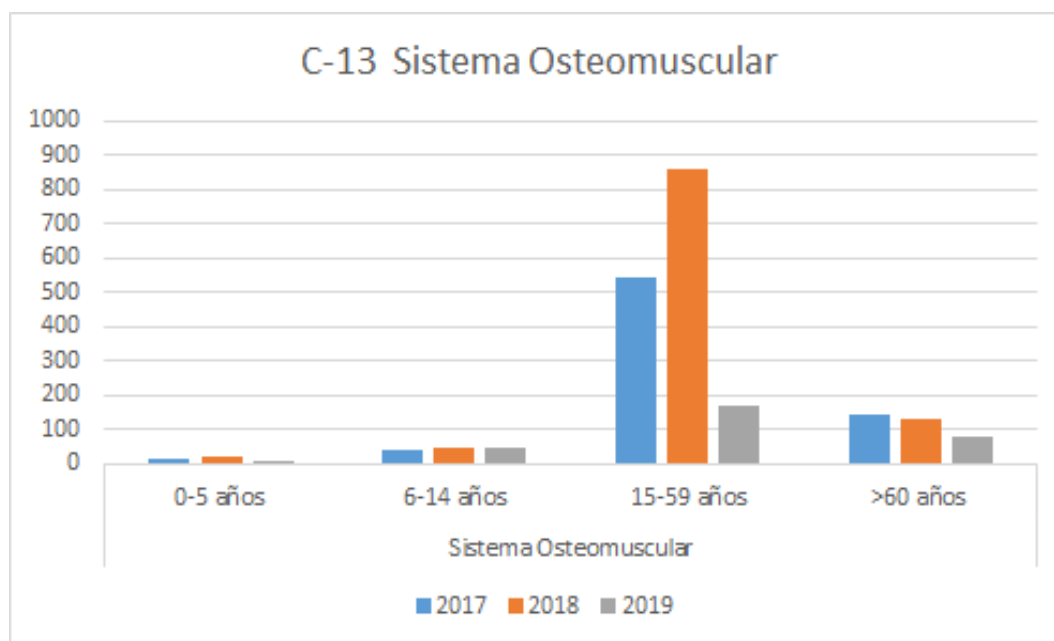
50 Determinación de la relación entre la presencia de cadmio y plomo en el sistema de abastecimiento de agua potable y la percepción en salud de la población para el casco urbano del municipio de Guatavita

Tabla 8-4. Análisis de los RIPS.

CEI-10	Enfermedades Asociadas al Cadmio y plomo	2017				2018				2019			
		0-5 años	6-14 años	15-59 años	>60 años	0-5 años	6-14 años	15-59 años	>60 años	0-5 años	6-14 años	15-59 años	>60 años
C13	Sistema Osteomuscular	12	40	547	146	20	44	861	132	5	45	170	79
C11	Sistema Digestivo	31	261	901	109	334	544	694	241	1	203	515	67
C14	Sistema Genitourinario	3	35	320	166	184	74	717	128	18	74	160	64
C06	Sistema Nervioso	0	33	220	21	11	25	293	41	7	5	98	16
C09	Sistema Circulatorio	194	4	313	569	66	12	426	554	1	9	127	91
C60	Tumores malignos organos genitales masculinos	0	0	5	19	0	0	3	11	0	0	2	2
C15	Tumores malignos organos digestivos	0	0	63	43	0	0	142	0	0	0	10	0
C50	Tumores malignos de la Mama	0	0	0	1	0	0	9	5	0	0	7	0
	Total	4056				5571				1776			

Fuente: elaboración propia.

Esta tabla muestra el número de personas por grupo etario que fueron diagnosticadas con enfermedades asociadas al cadmio y el plomo ya que estos metales dependiendo de la dosis, la duración y el tipo de exposición pueden dar lugar a efectos adversos en la salud durante el curso de la vida (Meyer, Brown & Falk, 2008).

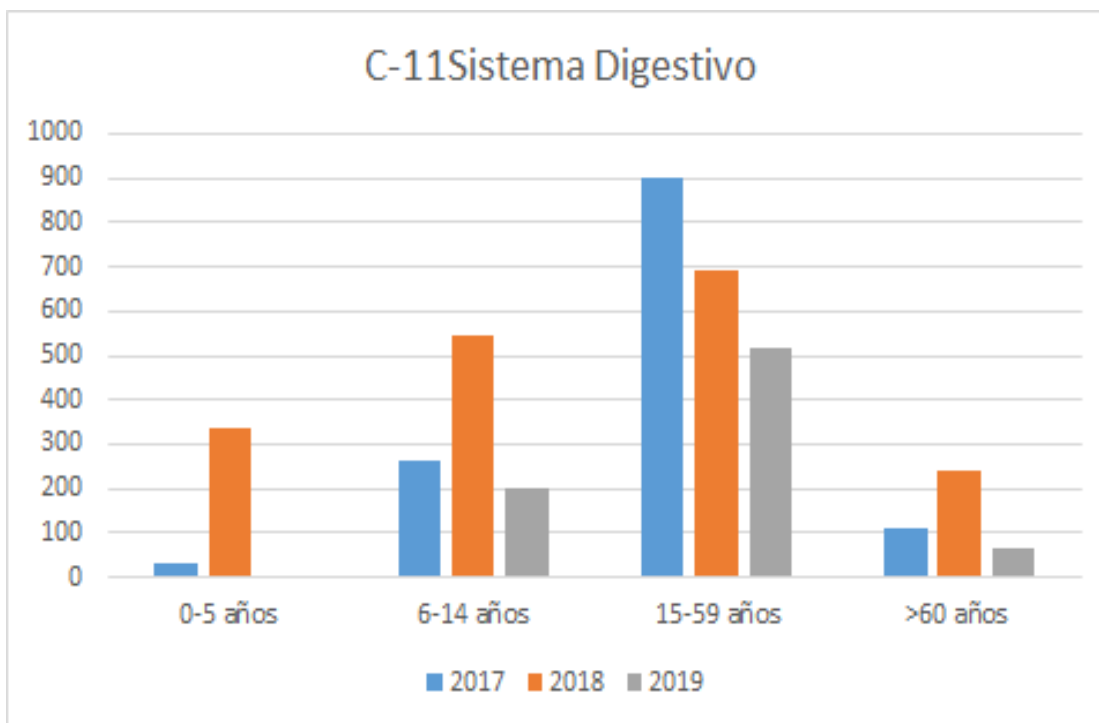
Gráfica 8-14. Sistema osteomuscular.

Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se evidencia que el año que más diagnósticos de enfermedades asociadas al sistema osteomuscular presentó fue el 2018 y el grupo etario donde se presentaron más casos fueron las personas de 15 -59 años con 861 seguido de las personas mayores de 60 años sin embargo también se prestan diagnósticos de niños de 0-5 años y de 6 a 15 años.

Haciendo una relación con las encuestas aplicadas en la zona el 43 % de las personas de 45-59 presentan debilidad y parálisis muscular y el 15% presentan enfermedades relacionadas con los huesos. Estas enfermedades que presenta la población podrían estar asociadas con la ingesta de estos metales ya que la población está expuesta a estos, y la severidad de los signos, síntomas y alteraciones en el organismo se relaciona con las cantidades y el tiempo de exposición de estos metales. El plomo al asemejarse tanto con el calcio, los huesos son el mayor depósito de este en el cuerpo y puede durar más de 20 años en el organismo por otra parte la ingesta de cadmio genera síntomas neuromusculares asociados a parálisis, debilidad muscular. [26]

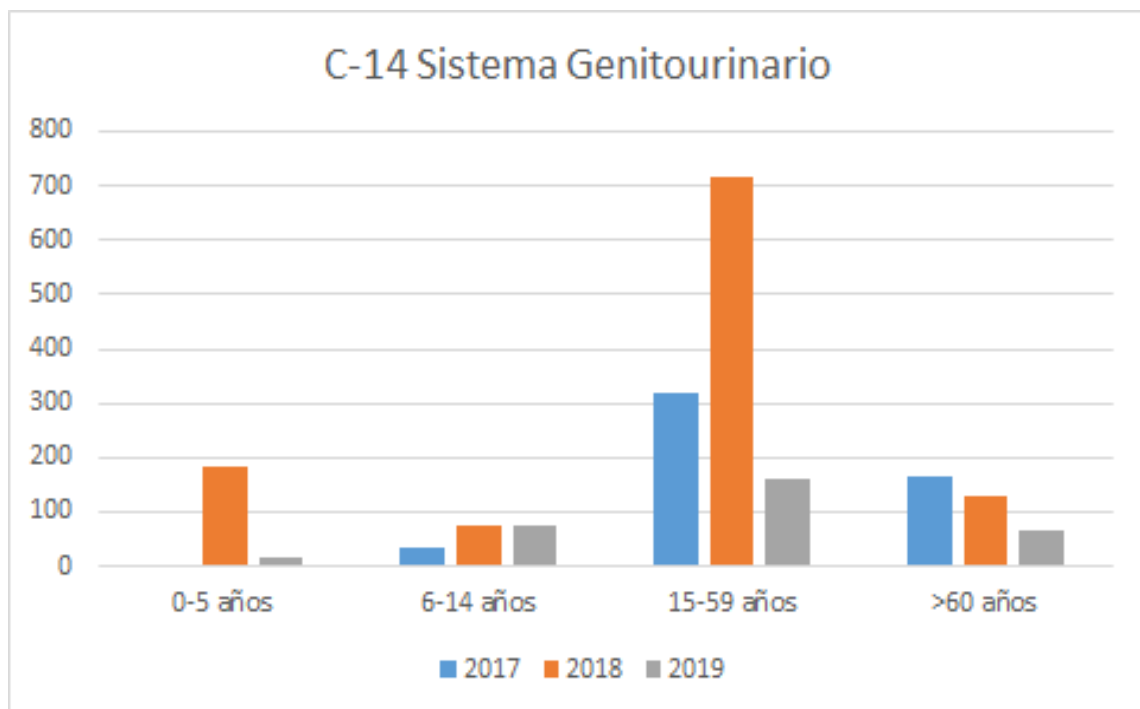
Gráfica 8-15. Sistema Digestivo.



Fuente: elaboración propia.

En esta gráfica se evidencia que en el 2017 se presta el mayor número de diagnósticos en el grupo etario de 15-59 años con 901 diagnósticos para el grupo etario de 6-14 en el 2018 se prestaron 544 diagnósticos asociadas a enfermedades del sistema digestivo y las personas mayores de 60 años en el 2018 presentaron 241, relacionando estos resultados con la encuesta aplicada anteriormente se evidencia que efectivamente casi el 30 % en cada grupo etario ha presentado enfermedades gastrointestinales lo que podría ser causado por la ingesta de cadmio y plomo, el plomo a nivel gastrointestinal provoca anorexia, cefalea, estreñimiento, espasmo intestinal y dolor abdominal a su vez las Manifestaciones clínicas por ingestión de cadmio son: náuseas, vómitos, dolores abdominales y cefalea.

En muchos casos hay diarrea intensa con colapso, estos síntomas aparecen cuando se ingiere agua o alimentos con cadmio en concentraciones de alrededor de 15 ppm [27].

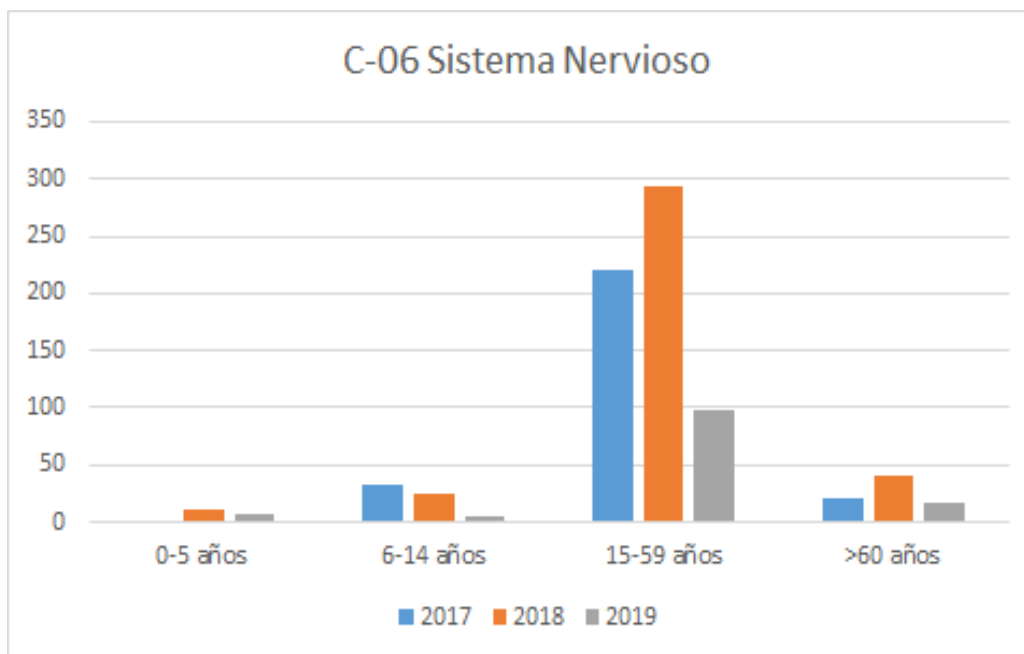
Gráfica 8-16. Sistema Genitourinario.

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 8-16 se observan los diagnósticos de las personas que padecen enfermedades relacionada con el sistema genitourinario, se evidencia que el grupo etario de 15-59 años en el 2018 obtuvo la mayor cantidad de diagnósticos seguido de los niños de 0-5 años, los adultos mayores de 60 años con 166 diagnósticos en el 2017 y por último de 6-14 años, según el instrumento aplicado anteriormente el 15 % de las personas > de 60 y 10% del grupo etario de 45-59 tenían problemas renales.

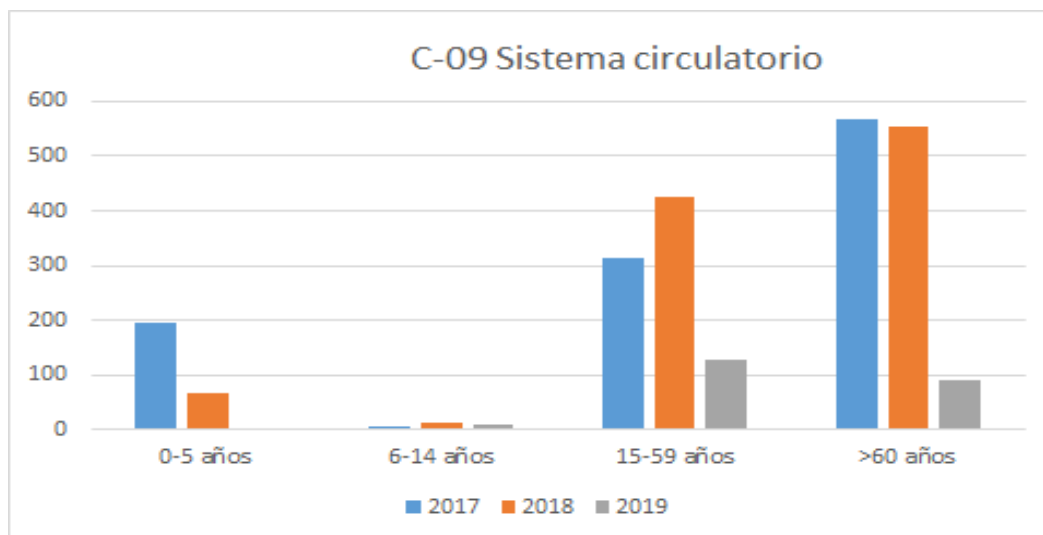
Las enfermedades de estas personas posiblemente están relacionadas con estos metales pues al estar expuestas a diario ya que la ingesta de estos ocasiona intoxicaciones manifestando primordialmente en los riñones ocasionado daños renales y del sistema genitourinario [28].

Gráfica 8-17. Sistema Nervioso.



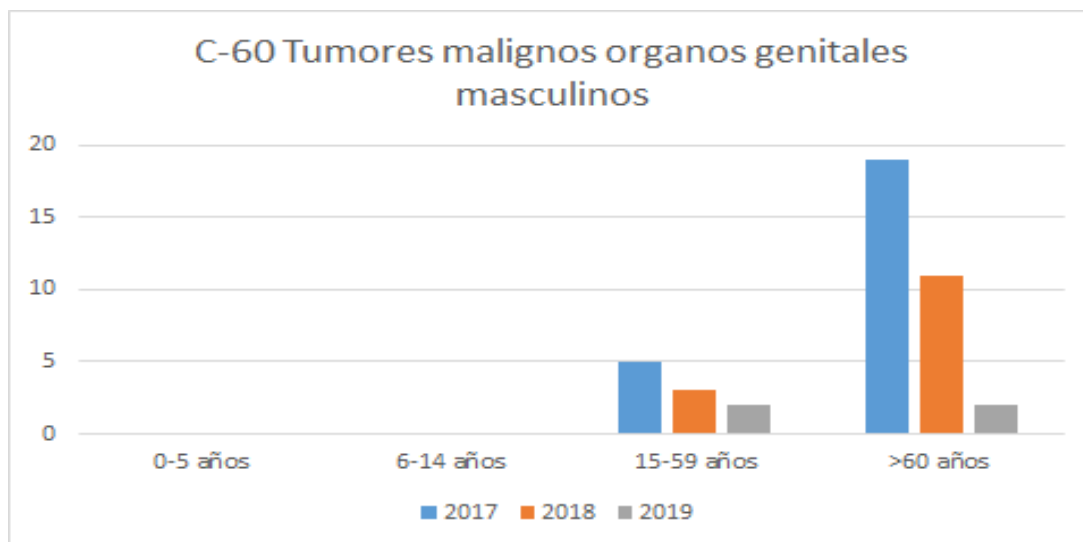
Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 8-17 se evidencia que en el grupo etario de 15-59 años es donde más se presentan enfermedades asociadas al sistema nervioso con 293 diagnósticos en el año 2018 seguido del año 2017 donde se presentaron 220 diagnósticos y en el transcurso del año 2019 98, según la encuesta aplicada en la zona de estudio el 20 % de los adultos > de 60 años tiene problemas de memoria y el 8 % presenta convulsiones estas enfermedades podrían estar relacionados con el cadmio y el plomo ya que La Organización Mundial de la Salud menciona que la presentación y severidad de los signos, síntomas y alteraciones al ingerir metales pesados en el organismo se relaciona con las cantidades, el tiempo de exposición y con la vía de entrada del metal, la intoxicación por plomo genera problemas en el encéfalo, trastornos nerviosos, daños neuromusculares[46].

Gráfica 8-18. Sistema Circulatorio.

Fuente: elaboración propia.

La gráfica 8-18, evidencia que el año en el que más se presentan enfermedades del sistema circulatorio es el 2018, el grupo etario que más presenta estas enfermedades son los mayores de 60 años y los que menos presentan estas enfermedades son los de 6-14. Según los resultados de las encuestas según los grupos etarios el 50 % de las personas de 15-44 años, el 42 % de las personas de 45-59 y el 22 % de las personas mayores de 60 sufren de anemia estas enfermedades podrían ser causadas por la ingestión de metales pesados como cadmio y plomo ya que estos causan afecciones cardiovasculares como: crisis hemolítica-anemia grave y hemoglobinuria, hipertensión [26].

Gráfica 8-19. Tumores malignos órganos genitales masculinos.

Fuente: elaboración propia.

8.6 Análisis estadístico

8.6.1 Prueba de normalidad

Se realizó una prueba de normalidad para las variables cadmio y plomo mediante la prueba de Shapiro wilk, esto debido a que se tiene un tamaño de muestra <30 datos, el resultado de la prueba arrojó un valor de 0,095 ($p>0,05$) demostrando que los datos siguen una distribución normal, por lo cual se procedió a utilizar la estadística paramétrica mediante el coeficiente de Pearson (Ver tabla 8-5).

Tabla 8-5. Prueba de normalidad de Shapiro wilk.

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Concentración de Cadmio (mg/l)	,223	9	,200 [*]	,860	9	,095
Concentración de Plomo (mg/l)	,414	9	,200	,617	9	,078

Fuente: elaboración propia.

8.6.2 Análisis y Correlación de Cadmio con el número de casos de enfermedades

Se determinó la correlación entre las concentraciones de cadmio analizadas en el laboratorio CONOSER LTDA con el número de casos de enfermedades asociadas a este contaminante, los cuales están registrados en las encuestas y en los RIPS pertenecientes al casco urbano de Guatavita durante el periodo de muestreo.

En la tabla 8-6, se muestra la correlación de Pearson en la cual se puede observar que existe una correlación fuerte y bastante significativa $p<0,05$ entre las concentraciones de cadmio encontradas en el agua y el número de casos reportados por enfermedades gastrointestinales, aceptando así la hipótesis alternativa según la cual la concentración de cadmio está relacionada con la percepción en salud del casco urbano de Guatavita más específicamente con las enfermedades asociadas al sistema digestivo y que por el contrario las concentraciones de cadmio no se encuentran correlacionadas con enfermedades del sistema osteomuscular, genitourinario, circulatorio ni con tumores malignos.

Tabla 8-6. Correlación entre cadmio y enfermedades asociadas.

Casos reportados	Concentracion de cadmio mg/l	
	Coefficiente de correacion pearson	Significancia
C13. Sistema osteomuscular	0,956	0,189
C11. Sistema digestivo	0,999	0,022
C14. Sistema genitourinario	0,798	0,412
C06. Sistema nervioso	0,903	0,283
C09. Sistema circulatorio	0,786	0,424
C60. Tumores malignos organos genitales masculinos	0,55	0,629
C15 . Tumores malignos organos digestivos	-0,225	0,856

Fuente: elaboración propia.

8.6.3 Análisis y Correlación de Plomo con el número de casos de enfermedades

Los resultados de la tabla 8-7, muestran una correlación positiva de una alta significancia entre la concentración de plomo determinada en las muestras de agua con el número de casos asociados a enfermedades osteomusculares, siendo el valor bastante menor a 0,05 y por lo tanto se aprueba la hipótesis alternativa la cual determina que las concentraciones de plomo están relacionadas con la percepción en salud de la población del casco urbano más específicamente con las enfermedades de tipo óseo y muscular, por otra parte se puede observar que las enfermedades digestivo, nervioso, circulatorio, genitourinario y los tumores malignos no están asociados a la presencia de los metales pesados de estudio determinados en el muestreo.

Tabla 8-7. Correlación entre cadmio y enfermedades asociadas.

Casos reportados	Concentracion de plomo mg/l	
	Coefficiente de correacion pearson	Significancia
C13. Sistema osteomuscular	1	0,0001
C11. Sistema digestivo	-0,996	0,167
C14. Sistema genitourinario	-0,939	0,223
C06. Sistema nervioso	-0,989	0,094
C09. Sistema circulatorio	-0,932	0,235
C60. Tumores malignos organos genitales masculinos	-0,77	0,44
C15 . Tumores malignos organos digestivos	0,5	0,667

Fuente: elaboración propia.

8.6.4 Análisis y Correlación de las concentraciones de plomo y cadmio con el caudal

Adicionalmente se realizó una correlación entre los metales pesados de estudio con el parámetro fisicoquímico caudal, esto debido a que el caudal varía dependiendo de diferentes factores climáticos y puede llegar a disminuir la carga de un contaminante por dilución del mismo [42]. Sin embargo, se evidencia en la tabla 8-8, que los metales pesados cadmio y plomo no están correlacionados con la variable caudal, a pesar de que en la última fecha de muestreo correspondiente a temporada de lluvias se calculó un caudal muy por encima a los de la temporada seca e intermedia.

Tabla 8-8. Correlación de cadmio, plomo y caudal.

Concentracion metales	Caudal m ³ /s	
	Coefficiente de correlacion	Significancia
Cadmio mg/l	0,749	0,461
Plomo mg/l	-0,523	0,65

Fuente: elaboración propia.

8.7 Cuantificación de la exposición

Se realizó el cálculo de la dosis suministrada mediante la ecuación 5, la cual es utilizada para sustancias no cancerígenas teniendo como única vía de exposición la vía oral. En las tablas 8-9 y 8-10, se puede observar la dosis suministrada para el cadmio y plomo por grupos etarios, género y punto de muestreo.

Tabla 8-9. Cálculo de la dosis suministrada para el cadmio en mg/kg/día.

Grupo etario	Cadmio					
	Bocatoma		Salida PTAP		Casco Urbano	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
0-5 años	0,0000049	0,0000053	0,0000042	0,0000045	0,0000042	0,0000045
6-14 años	0,0000179	0,0000176	0,0000151	0,0000148	0,0000151	0,0000148
15-59 años	0,0000335	0,0000394	0,0000283	0,0000332	0,0000283	0,0000332
>60 años	0,0000633	0,0000744	0,0000534	0,0000627	0,0000534	0,0000627

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8-10. Cálculo de la dosis suministrada para el plomo en mg/kg/día.

Plomo						
	Bocatoma		Salida PTAP		Casco Urbano	
Grupo etario	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
0-5 años	0,0000046	0,0000050	0,0000167	0,0000050	0,0000046	0,0000050
6-14 años	0,0000167	0,0000165	0,0000167	0,0000165	0,0000167	0,0000165
15-59 años	0,0000314	0,0000369	0,0000314	0,0000369	0,0000314	0,0000369
>60 años	0,0000594	0,0000697	0,0000594	0,0000697	0,0000594	0,0000697

Fuente: elaboración propia.

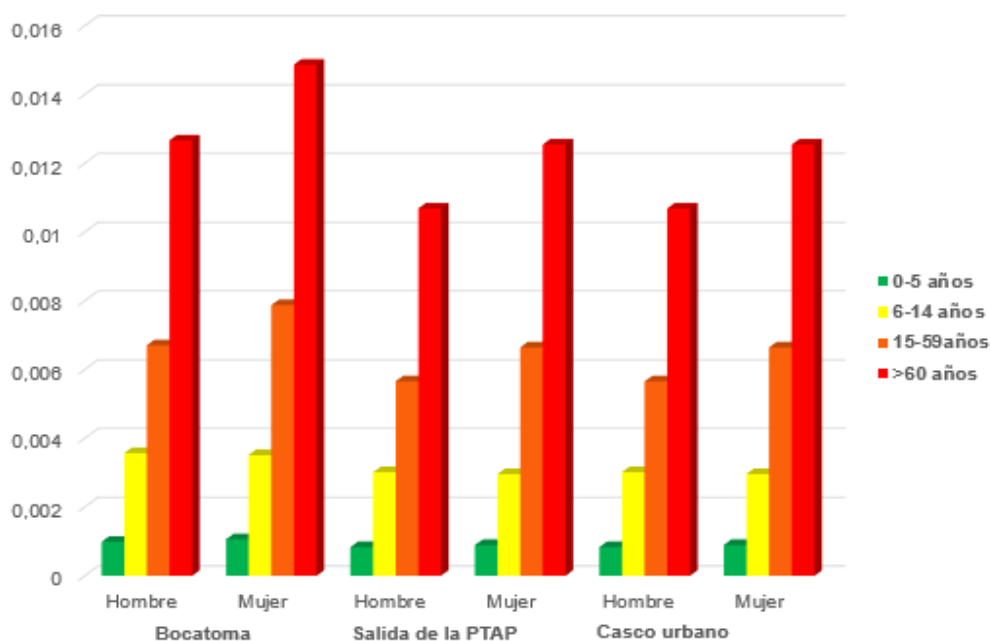
De acuerdo con lo presentado en las anteriores tablas podemos analizar que la dosis suministrada para ambos contaminantes es mayor en el grupo etario de personas mayores a 60 años siendo el género femenino el que presenta los valores más altos, esto se debe al largo tiempo que han estado expuestos a estos contaminantes en comparación a los otros grupos y específicamente en las mujeres debido a que en promedio tienen un menor peso corporal que los hombres. También se evidencia como una población susceptible como lo son los niños de 0 a 5 años no están realmente expuestos a una dosis alta en relación a los demás grupos de estudio.

8.7.1 Caracterización de la exposición

Para determinar el peligro existente por la exposición a cadmio y plomo en el agua mediante el uso de la ecuación 7-5, donde la dosis suministrada corresponde a la calculada anteriormente y la dosis de referencia (Ddr) para exposiciones por vía oral es de 0,005 mg/kg/día para el caso de cadmio y 0,0001 mg/kg/día para el plomo [41,42].

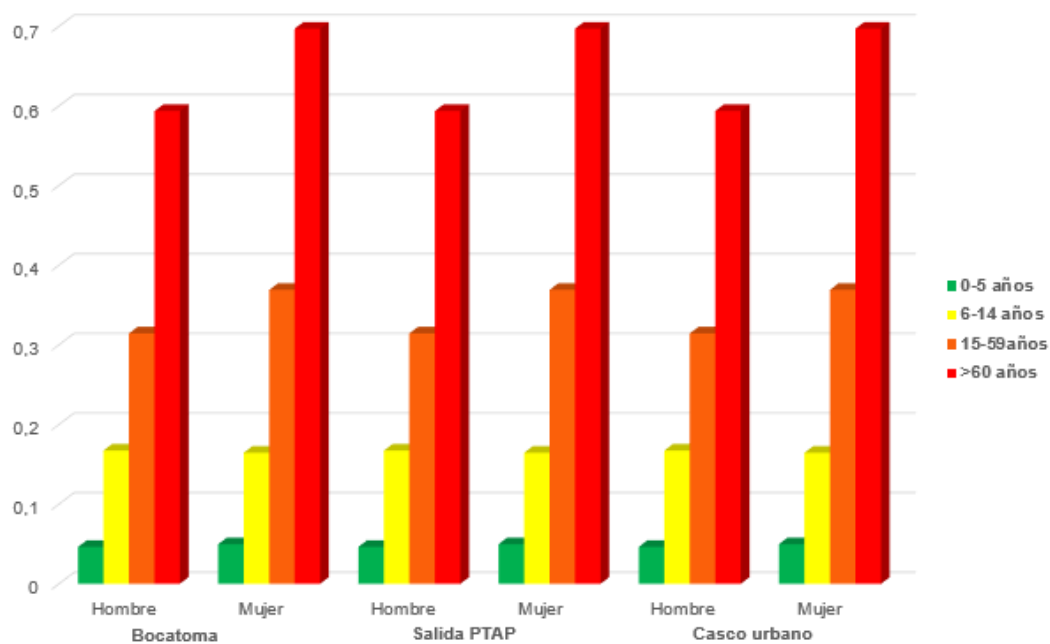
De acuerdo a lo mostrado en la gráfica 8-20 y 8-21, ningún valor supera el valor de 1 por lo cual indica que el riesgo por cadmio y plomo es aceptable, sin embargo, en el caso del plomo el índice de peligro al igual que ocurrió con la dosis suministrada para el grupo personas mayores a 60 años es bastante alto lo cual puede ser motivo de preocupación en un futuro para la población de Guatavita [41]. De igual manera se puede observar de nuevo que un grupo sensible como lo es la población de 0 a 5 años no se encuentra en un aparente riesgo por la exposición a los metales de estudio.

Gráfica 8-20. Nivel de riesgo asociado a cadmio por grupo etario y estación de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 8-21. Nivel de riesgo asociado a plomo por grupo etario y estación de muestreo.



Fuente: elaboración propia

9. Medidas sanitarias

Bocatoma

Teniendo en cuenta que la actividad económica predominante en los predios aledaños aguas arriba de la Bocatoma es la agricultura y que dicha actividad económica promueve el uso de sustancias químicas como los plaguicidas, los cuales llegan a contaminar el agua mediante la infiltración o escorrentía [45].

Por tal motivo se hace necesario garantizar la calidad del agua del río San Francisco, puesto que es la principal fuente de abastecimiento de agua del municipio, debido a que los agricultores suelen usar de manera incorrecta herbicidas, plaguicidas y demás sustancias químicas para proteger sus cultivos, además de esto se evidenció por medio de las encuestas aplicadas que gran parte de la población aledaña no cuenta con el servicio de recolección de basura lo cual implica que algunos queman sus residuos o simplemente arrojan algunos desechos al río y pueden ser causantes de las trazas de cadmio y plomo que se determinaron en el estudio realizado [46].

- Debido a que la población no cuenta con el servicio de recolección de basuras y que por lo mismo se realiza un mal manejo de los residuos sólidos generados en los hogares, se podría implementar un PGIRS para evitar que los residuos en su mayoría provenientes de la agricultura lleguen a contaminar las aguas del río San Francisco [45].
- Dado que en el estudio realizado se han encontrado concentraciones de cadmio y plomo a la altura de la bocatoma de la quebrada San Francisco se debe de formular un plan de seguimiento y monitoreo constante para garantizar el buen estado del río San Francisco puesto que de allí se abastece la zona urbana del municipio de Guatavita .

PTAP

Debido a que la planta de tratamiento del municipio de Guatavita presenta algunas irregularidades y deficiencias en su proceso de tratamiento y que esto se refleja en un agua ya tratada que presenta turbiedad, mal sabor y que contiene trazas de cadmio y plomo, los cuales son compuestos tóxicos para el ser humano se hace necesario plantear una serie de medidas con el fin de optimizar el funcionamiento de la PTAP en la remoción de metales pesados.

- En cuanto al proceso de filtración en la PTAP se utilizan filtros de arena, antracita y grava los cuales se han demostrado tienen una buena efectividad sin embargo la vida útil de estos es no mayor a 4 años por lo cual sería una alternativa implementar métodos de adsorción no convencionales como cascara de arroz debido a su bajo costo y facilidad para adquirirla, además se ha demostrado que puede remover hasta un 93,08% de cadmio [45].
- Implementar lechos de secado para el manejo de lodos que se libera en el proceso de tratamiento ya que en la actualidad se están disponiendo de manera directa a la fuente superficial, ya que este método de deshidratación de lodos es de bajo costo, escaso mantenimiento y se puede utilizar como acondicionador de suelos, de mismo modo se puede recurrir a cuatro tipos de lechos de secado convencionales de arena, pavimentadas, de medio artificial y por vacío, puesto que sus usos son los más recomendados en poblaciones de tamaño medio.
- Implementación de tecnologías dirigidas a la biosorción, ya que un estudio realizado con el bagazo de caña de azúcar como biosorbente en la eliminación de plomo y cadmio en aguas residuales mineras tuvo un porcentaje de remoción del 77,81% de cadmio y 99,76% de plomo y frente a las tecnologías tradicionales la biosorción se utiliza como una alternativa eficiente y de bajo costo, especialmente en bajas concentraciones de metales. [47]

Vivienda Segura

Para garantizar la inocuidad del agua de consumo y garantizar una vivienda saludable libre de plomo, cadmio y demás contaminantes que puedan presentarse en el agua distribuida por la red de acueducto del municipio de Guatavita se plantean una serie de medidas que pueden minimizar el riesgo a la salud que puede tenerse por exposición a estos metales pesados.

- Teniendo en cuenta que la mayoría de tuberías correspondientes a la red de distribución son antiguas se debe revisar que sean impermeables y duraderas, que no existen conexiones cruzadas entre la instalación de agua de consumo y la de eliminación de aguas residuales ya que los metales pesados pueden ser procedentes de materiales como tuberías, soldaduras o juntas, grifos y sustancias químicas utilizadas en la limpieza y desinfección de los sistemas de distribución.
- Implementar en las viviendas filtros de carbón activado ya que se ha demostrado en diferentes estudios (Jusoh et al., 2007; Kang et al., 2008) que es un absorbente eficiente para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos teniendo una eficiencia para de remoción de hasta el 50 % de cadmio y plomo, eliminando a su vez partículas en suspensión y reduce la cantidad de metales pesados presentes del medio a causa de las actividades humanas, vertimientos o procedentes de la corrosión de las tuberías.

10. Impacto social

La contaminación hídrica es uno de los grandes problemas ambientales que afectan a la sociedad debido a que el aumento de actividades productivas y extractivas genera vertimientos de agentes contaminantes y desechos los cuales deterioran la calidad de los recursos hídricos, es así como vertimientos formales e informales, pasivos ambientales y otros focos de contaminación vierten al ambiente elementos tóxicos como el plomo, mercurio, cadmio, arsénico, aluminio, bario, cromo, cobre, hierro, los cuales se dispersan en el ambiente y llegan a los cuerpos de agua superficiales y subterráneas directa o indirectamente.

En septiembre de 2015, la Asamblea general de la ONU, acordó como objetivo: “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, otorgándole al agua un carácter prioritario para todos los países miembro. Cabe destacar que el año 2015 fue crítico para la agenda en materia de agua y saneamiento. Por esto la importancia de este proyecto el cual pretende determinar las concentraciones de cadmio y plomo presentes en el sistema de abastecimiento y así mismo establecer una relación entre las concentraciones de estos metales y las enfermedades que presenta la población del municipio de Guatavita y así formular medidas sanitarias en pro de la salud, el bienestar de la población y la preservación del recurso hídrico.

11. Conclusiones y recomendaciones

11.1 Conclusiones

- La población del casco urbano de Guatavita tiene como fuente principal de abastecimiento el agua que proviene del acueducto del municipio, aunque su percepción de salud en general es buena algunos presentan síntomas y enfermedades específicas asociadas a la exposición de cadmio y plomo, esto se debe posiblemente a las trazas de estos metales que se encontraron en el agua potable y a que dicha población se encuentra expuesta en su mayoría por más de 5 años debido al consumo de la misma. Aunque las concentraciones de estos no sobrepasan los niveles de la normativa colombiana estos metales están correlacionados con las enfermedades gastrointestinales y osteomusculares, sin embargo, no es una relación de causalidad debido a que las enfermedades pueden ser multicausales y se necesitaría un estudio más específico para poder encontrar una relación de este tipo.
- La temporalidad del muestreo no se logró asociar con el cadmio y plomo presente en las muestras debido a la falta de datos ya que solo se realizó un muestreo por mes y este dato no refleja el comportamiento de toda la temporada.
- Los datos recolectados a través de la encuesta concuerdan con los RIPS en los cuales se observa que los problemas gastrointestinales y osteomusculares son los más comunes en los últimos 3 años, además de algunas enfermedades y sintomatologías muy específicas por exposición a cadmio y plomo, lo cual podría significar que la población de Guatavita se encuentra expuesta a estos metales desde un largo tiempo.
- La evaluación de riesgo realizada evidencio que el grupo que presenta mayor riesgo por la exposición a metales pesados son los mayores de 60 años especialmente del género femenino, esto debido a que llevan mayor tiempo expuestos y a la diferencia de peso en relación a los hombres.

11.2 Recomendaciones

- Para la realización de futuros estudios se recomienda ampliar el periodo de muestreo y el número de muestras tomadas en campo, esto con el fin de que el estudio sea más robusto y preciso.
- También con el fin de realizar futuras investigaciones se recomienda determinar las concentraciones de metales pesados directamente en sangre para encontrar una relación de causalidad entre el deterioro de salud en la población con la presencia de metales pesados en el organismo.
- En cuanto a la PTAP del municipio se le recomienda realizar un continuo seguimiento y monitoreo a todos sus procesos y a su capacidad misma debido a que el agua ya tratada presenta trazas de cadmio y plomo y presenta alta turbiedad.
- Se recomienda realizar un muestreo de sedimentos debido a que gran parte de los metales pesados en ríos tienden a sedimentarse y podrían estar presentes en el fondo del río y no solo en el agua que posteriormente se trata en la PTAP.

12. Discusión

La relación de la calidad de agua con la salud es evidente y es una prioridad sanitaria por lo cual es importante garantizar el buen estado de este recurso, el cual en los últimos años se ha venido deteriorando debido a diferentes factores como la sobrepoblación y la industrialización. En Colombia el 92% de los habitantes tienen acceso a agua potable, sin embargo las zonas rurales solo cuentan con una cobertura del 70% y las condiciones del agua no son las mejores, en el municipio de Guatavita se tiene una cobertura por parte del acueducto del 99% para la zona urbana, aun así se ha evidenciado que la calidad del agua potable no es la mejor, puesto que según informes de la empresa de servicios públicos de Guatavita el IRCA para las muestras de agua tomadas en los últimos años ha sido desfavorable y esto se puede evidenciar debido a que esta agua presenta turbiedad, tiene mal aspecto y a veces con mal olor [49].

La contaminación del agua tiene un impacto sobre la salud pública, esto debido a que diferentes contaminantes pueden viajar a través de los sistemas de abastecimiento de agua potable y pueden alterar las características físicas, químicas y biológicas del agua. En este estudio se evidencia que a lo largo del sistema de abastecimiento de agua potable del municipio de Guatavita se encuentran concentraciones de cadmio y plomo que aunque no exceden la normatividad Colombiana existe una comunidad que se encuentra constantemente expuesta durante un largo periodo de tiempo, tanto por el consumo de agua contaminada como por el de alimentos regados con la misma, esto se pudo evidenciar en los muestreos y en las encuestas realizadas en el casco urbano del municipio. Según La Organización Mundial de la Salud (OMS) la presentación y severidad de los signos, síntomas y alteraciones en el organismo se relaciona con las cantidades, el tiempo de exposición y con la vía de entrada del metal [49, 50].

Estudios realizados a lo largo del mundo respaldan los resultados obtenidos en este proyecto de grado, en el cual se ha determinado que existe una relación entre la presencia de cadmio y plomo con la percepción en salud de la población de Guatavita. Un estudio realizado en España en el año 2016 a un grupo de soldados expuestos de manera ocupacional a cadmio, demostró mediante pruebas de sangre y orina que la exposición a este metal pesado durante un largo periodo de exposición puede provocar insuficiencias y daños renales, esto se logró analizar y demostrar mediante la medición de bioindicadores como la cistatina, microglobulina, fosfatasa, albúmina y metalotioneína [51].

De igual forma un estudio realizado en el 2015 en la ciudad de Cali logró evidenciar que a lo largo del sistema de abastecimiento de agua potable se encontraba cadmio y plomo en concentraciones de 0,36 µg/l y 0,43 µg/l respectivamente, posterior mediante una valoración del riesgo se determinó que al igual que en el presente trabajo de grado existe riesgo a la salud aunque no es un riesgo potencial esto debido a la exposición de metales pesados presentes en el agua de consumo. Este estudio es importante porque al igual que en nuestro trabajo de grado no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones halladas en los diferentes puntos de muestreo ni en las diferentes épocas en las que se realizó el muestreo [52].

En otra investigación realizada en Colombia en el 2013 en la región de la Mojana, se escogieron individuos entre los 18 y 50 años de edad, en este estudio se determinaron los niveles de cadmio y plomo en sangre para cada uno de los individuos, encontrándose así concentraciones de estos metales de hasta 52,46 µg/l, posteriormente mediante una correlación de spearman lograron asociar la presencia de cadmio y plomo en sangre con la capacidad que tienen estos metales para afectar y dañar la estructura del ADN humano siendo un problema de salud pública[53].

Aunque varios estudios respaldan nuestra hipótesis de investigación en la cual las concentraciones de cadmio y plomo están asociadas con la percepción en salud de la población del municipio de Guatavita, cabe aclarar que la asociación encontrada no es de tipo causal sino descriptiva teniendo en cuenta que se tiene como limitación costos y equipos.

13. Bibliografía

- [1] Alcaldía Municipal de Guatavita en Cundinamarca. (s.f.). Recuperado 5 octubre, 2019, de <http://www.guatavita-cundinamarca.gov.co/datos-abiertos/economia-del-municipio>
- [2] k. Osma and L. León," Elaboración del mapa de riesgos de la calidad de agua potable de la quebrada corales y el río San Francisco ubicados en el municipio de Guatavita", p. 89-91, 2017.
- [3]"Metales pesados - Facsa", Facsa, 2018. [Online]. Available: <https://www.facsa.com/metales-pesados/>. [Accessed: 17- Mar- 2018]
- [4] "Revista HSEC - TRABAJO CON METALES PESADOS: Riesgos y medidas de control", Emb.cl, 2018. [Online]. Available: <http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=671>. [Accessed: 10- Mar- 2018].
- [5] "Nuestro municipio", Guatavita-cundinamarca.gov.co, 2018. [Online]. Available: <http://www.guatavita-cundinamarca.gov.co/>. [Accessed: 24- Mar- 2018].
- [6] Categor, G., Regi, H., Entorno, C. O., Superficie, I., & Poblacional, D. (2018). *Guatavita, Cundinamarca*. 796, 1–23.
- [7] F. Jay and D. Martínez, "Evaluación del impacto ambiental asociado a los sistemas de agua potable y saneamiento básico sobre los recursos suelo, aire y agua en los municipios de Sesquilé y Guatavita, pertenecientes a la cuenca alta del río Bogotá", 2010.
- [8] P. Méndez, G. Ramírez, A. César, R. Gutiérrez, D. Alma, and P. García, "Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua," Trop. Subtrop. Agroecosystems, vol. 10, p. 17, 2009.
- [9] Eróstegui, C. (2009). contaminación por metales pesados. Recuperado 5 octubre, 2019, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013
- [10] "Plomo (Pb) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente", Lenntech.es, 2018. [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>. [Accessed: 25- Mar- 2018].

[11] L. F. Londoño Franco, P. T. Londoño Muñoz, and F. G. Muñoz García, "Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal," *Biotechnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145, 2016.

[12] L. Mártires, B. D. C. Johan, and A. Álvarez Berrio, "Modelo para la evaluación de la concentración de plomo, cadmio y cromo contenidos en material particulado respirable en la localidad," 2016.

[13] D. Centro Provincial de Información de Ciencias Médicas (Cuba), "Medisan.," *Medisan*, vol. 21, no. 12, pp. 3372–3385, 2017.

[14] J. Astete, C. Gastañaga María del, and D. Pérez, "Niveles de metales pesados en el ambiente y su exposición en la población luego de cinco años de exploración minera en Las Bambas, Perú 2010," *Levels of heavy metals in the environment and population exposure after five years of mineral exploration in,* vol. 31, no. 4, pp. 695–701, 2014.

[15] J. M. Polo Osorio, "Efecto combinado de cambio de salinidad y exposición al cadmio sobre las respuestas fisiológicas de *Isognomon alatus* Bivalvia: *Isognomonidae*," vol. 40, no. 157, p. 61, 2014.

[16] J. Herrera, J. Rodríguez, J. Coto, V. Salgado, and A. Borbón, "Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro," *Tecnol. en Marcha*, vol. 26, no. 1, pp. 27–36, 2013.

[17] [Ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428), 2018. [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428. [Accessed: 23- Oct- 2018].

[18] Juan Gonzalo López Casas, J. (2011). Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua para el consumo humano para el análisis de laboratorio. Recuperado 23 octubre, 2018, de <https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf>

[19] C. E. C. H. (s.f.). Información general Municipio - Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá. Recuperado 24 octubre, 2018, de <http://orarbo.gov.co/es/el-observatorio-y-los-municipios/informacion-general-municipio?cd=8dc0c6c3762a43d3ba3067a3330bd819>

[20] RESOLUCIÓN NÚMERO 2115. (2007, 22 junio). Recuperado 15 septiembre, 2019, de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Legisla%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf.

[21] M.L. Morales, M. Loh, & D. Moreno "Transferable Training Module for Promoters on Risk Assessment in the Environment," 2013. [En línea]. Disponible en:

<http://superfund.pharmacy.arizona.edu/learning-modules/promotormodules/spanish/riesgo>. [Último acceso: 22 08 2018].

[22] Aguilar, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. Recuperado 15 septiembre, 2019, de Fórmulas para el cálculo. <https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf> de la muestra en investigaciones de salud

[23] Caudal. (s.f.). Recuperado 15 septiembre, 2019, de <http://www.fao.org/3/T0848S/t0848s06.htm>

[24] ¡Prepárese! Comenzó la segunda temporada de lluvias en Colombia. (2019, 16 septiembre). Recuperado 10 septiembre, 2019, de <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/comenzo-segunda-temporada-de-lluvias-en-colombia-412974>

[25] Repetto, M., & Repetto, G. (2009). Toxicología Fundamental. Recuperado 17 agosto, 2019, de <https://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788988.pdfpdf>

[26] Londoño, L., Muñoz, P., & Muños, F. (2016b). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Recuperado 17 agosto, 2019, de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

[27] Pérez, P., & Azcona, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. Recuperado 17 agosto, 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/379/37963107.pdf>

[28] Ramírez, A. (2015). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Recuperado 19 agosto, 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/379/37963107.pdf>.

[29] ROGERS, J.M., STEWART, M., PETRIE, J.G. and HAYNES, B.S. Deportment and management of metals produced during combustion of CCAtreated timbers. Hazard Material, 2(4), 2012, p. 500-505.

[30] Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos

[31] Echeverry, G., Zapata, A., Paez, M., & Méndez, F. (2015). Valoración del riesgo en salud en un grupo de población de Cali, Colombia, por exposición a plomo, cadmio, mercurio, ácido 2,4-diclorofenoxiacético y diuron, asociada al consumo de agua potable y alimentos. Recuperado 20 agosto, 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/843/84340725012.pdf>

[32] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Cadmium. Environmental health criteria. Geneva (Italy): 2008, p.119-137.

- [33] A. Padilla Magunazelaia, A. Martínez Castillo y N. Rodríguez, Protocolos de vigilancia sanitaria específica: Plomo, País Vasco: Solana e Hijos Artes Gráficas, S.A., 1999.
- [34] A. Padilla, N. Rodríguez y A. Martínez, Protocolos de vigilancia sanitaria específica: Plomo, País Vasco: Ministerio de Sanidad y Consumo, 1999.
- [35] Medidor multiparámetro. (2019, 8 noviembre). Recuperado 20 agosto, 2019, de <https://www.hannacolombia.com/products/product/885/pdf>.
- [36] IRIS | US EPA. (2019, 8 noviembre). Recuperado 20 agosto, 2019, de <https://www.epa.gov/iris>
- [37] Estupiñán, J. (2016). Evaluación del riesgo en la salud humana por consumo de vegetales irrigados con aguas que contienen metales pesados en un sector de la cuenca del río Tunjuelo. Recuperado 15 agosto, 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co/52849/1/80101405.2016.pdf>.
- [38] Tello, M. (2015). Evaluación del riesgo toxicológico de plomo y cadmio en suelos del entorno del parque industrial de la ciudad de Cuenca. Recuperado 11 octubre, 2019, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22973/1/TESIS%20TOXICOLOG%C3%83%2012.pdf>
- [39] E. P. C. (2016, 16 diciembre). Empresas Públicas de Cundinamarca S.A. ESP (EPC) visita el municipio de Guatavita | Empresas Públicas de Cundinamarca S.A. ESP. Recuperado 12 septiembre, 2019, de <https://www.epc.com.co/2016/12/16/empresas-publicas-de-cundinamarca-s-a-esp-epc-visita-el-municipio-de-guatavita/>
- [40] Ize Lema. (2003). La evaluación de riesgo por sustancias tóxicas. Recuperado 25 septiembre, 2019, de <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906903.pdf>
- [41] Hernández, M. Y. (2014). Riesgo toxicológico en personas expuestas, a suelos y vegetales, con posibles concentraciones de metales pesados, en el sur del Atlántico, Colombia. Recuperado 24 septiembre, 2019, de <http://bdigital.unal.edu.co/12822/1/201125286.2014.pdf>
- [42] A. Menéndez, "Transporte de contaminantes en el medio acuático," universidad tecnológica Nacional, 2010.
- [43] Gaete, H., Araquiz, F., & Cienfuegos, G. (2007, 4 julio). SciELO - Scientific Electronic Library Online. Recuperado 14 noviembre, 2019, de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext
- [44] G. Roldan Perez and J. Ramirez Restrepo, *Fundamentos de limnología neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquia, 2008.
- [45] Öztürk, M., Özözen, G., Minareci, O., & Minareci, E. (2009). Determination of heavy metals in fish, water and sediments of avsar dam lake in Turkey. Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering, 6(2), 73–80.

- [46] Cavedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- [47] Cabezas, L., Uguña, M., Alvear, N., Flores, M. and Freire, V. (2020). *Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente*. [online] Dialnet. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5467346> [Accessed 31 Jan. 2020].
- [48] "PREDICCIÓN CLIMÁTICA - IDEAM", *Ideam.gov.co*, 2020. [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/prediccion-climatica?p_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Ftiempo-y-clima%2Fprediccion-climatica%2F%2Fdocument_library_display%2F1jPLJWRaQzCm%2Fview%2F79336843&_110_INSTANCE_ljPLJWRaQzCm_fileEntryId=93514213. [Accessed: 15- Sep- 2019].
- [49] Rene, M. M. (2005). Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria , en la microcuenca El Limón , San Jerónimo , Honduras . *Research and Higher Education Center*, 123. <http://orton.catie.ac.cr/REPDOCA/A0602E/A0602E.PDF>
- [50] Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales Del Sistema Sanitario de Navarra*, 26(SUPPL. 1), 141–153. <https://doi.org/10.4321/s1137-66272003000200008>.
- [51] María, C., Esparza, P., Herranz, S. H., Jesús, M. De, Freitas, G. De, & Valero, I. Á. (2016). Biomarcadores de nefrotoxicidad en trabajadores expuestos a cadmio. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 62(244), 263–281.
- [52] Echeverry, G., Zapata, A. M., Paéz, M. I., Méndez, F., & Peña, M. R. (2015). Valoración del riesgo en salud para un grupo poblacional de la ciudad de Cali-Colombia por exposición a Pb, Cd, Hg, 2-4D y Diuron debido al consumo de agua potable y alimentos. *Biomédica*, 35(0). <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2464>
- [53] Calao, R., & Marrugo, J. L. (2015). Genotoxicidad humana asociada a metales pesados ARTÍCULO ORIGINAL. *Biomédica*, 35(2), 139–151. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2392>.