UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN EL INSTITUTO NACIONAL DE MEDICINA LEGAL Y CIENCIAS FORENSES EN UNA PTAR AEROBIA DE LA SEDE BOGOTÁ Y UNA PTAR ANAEROBIA DE VILLAVICENCIO

Daniela Estefania Agudelo Duque

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería

Bogotá D.C, Colombia

2024

Evaluación del tratamiento de las aguas residuales generadas en el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses en una PTAR aerobia de la sede Bogotá y una PTAR anaerobia de Villavicencio

Daniela Estefania Agudelo Duque

Tesis como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Recursos Hidráulicos

Director:

M.Sc Daniel Antonio Agudelo Quigua

Línea de Investigación:

Tratamiento de Aguas Residuales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C, Colombia

2024

A mis hijos, mis padres, mi esposo y a Dios.

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera especial a la contribución de mis hijos en la presente tesis de maestría, por ser la inspiración de crecer profesionalmente y ser pacientes en la ausencia de mis días de investigación y escritura; a mi esposo por ser el apoyo en casa y el soporte para seguir construyéndonos; a mis padres por su inigualable ánimo en cada paso a mis triunfos personales; a mi director de tesis por su dedicación, disposición, conocimientos y guía en el desarrollo de la tesis; y a Dios por darme las fuerzas, salud y entusiasmo de ser mejor cada día.

Finalmente, agradezco a los siguientes servidores públicos del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, al ingeniero Hugo Colmenares Merchan Profesional Especializado con funciones de coordinador del Grupo Nacional de Gestión de Servicios Técnicos Especializados y de Medio Ambiente por darme sus aportes y visto bueno en la realización de la presente investigación, al doctor Carlos Antonio Murillo Subdirector de Servicios Forenses por su entusiasmo en la contribución de la presente investigación al desarrollo ambiental en las ciencias forenses y su aval para poder acceder a la información del Instituto, a la Subdirección de Investigación Científica por aprobar mi proyecto de investigación y a todos los servidores que con su profesionalismo compartieron sus conocimientos en mis entrevistas para conocer los procesos del uso del agua en cumplimiento de la misión del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses y su valiosa contribución a la administración de justicia colombiana.

Resumen

Evaluación del tratamiento de las aguas residuales generadas en el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses en una PTAR aerobia de la sede Bogotá y una PTAR anaerobia de Villavicencio

El Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses es un establecimiento de orden público que presta servicios forenses a la administración de justicia y a la comunidad colombiana. Cuenta con laboratorios y organismos de inspección acreditados en donde se procesan muestras de Elementos Material Probatorio para esclarecer crímenes y aportar a la justicia en Colombia bajo criterios de investigación científica, idoneidad, calidad, imparcialidad y respeto por la dignidad humana.

En la prestación de los servicios se generan aspectos ambientales significativos como lo es los vertimientos de aguas residuales con altas cargas orgánicas por la naturaleza de las muestras que se procesan, es por esto que con el fin de minimizar la contaminación al recurso hídrico por la generación de este aspecto ambiental que se tienen Plantas de Tratamiento de Agua Residual hasta un nivel terciario, y cumplen con la eficiencia de remoción de ciertos parámetros de interés sanitario que son regulados por la normatividad actual en Colombia. El poder realizar la recirculación del vertimiento tratado con la adopción de otras tecnologías como la osmosis inversa y la desinfección con luz ultravioleta, permite la disminución del recurso hídrico en el Instituto y le apunta a los objetivos de sostenibilidad del país y a nivel mundial ante la crisis del agotamiento de los recursos que se viven actualmente.

Palabras clave: Agua residual, tratamiento de aguas residuales, calidad del agua, medicina forense

Abstract

Evaluation of the treatment of wastewater generated at the National Institute of Legal Medicine and Forensic Sciences in an aerobic PTAR in Bogotá and an anaerobic PTAR in Villavicencio

The National Institute of Legal Medicine and Forensic Sciences is a law enforcement institution that provides forensic services to the administration of justice and the Colombian community. It has accredited laboratories and inspection organisms where samples of Probative Material are processed to clarify crimes and provide justice in Colombia under criteria of scientific research, suitability, quality, impartiality and respect for human dignity.

In the provision of services, significant environmental aspects are generated such as the discharge of wastewater with high organic loads due to the nature of the samples that are processed, is for this reason that in order to minimize the contamination to the water resource by the generation of this environmental aspect that have Wastewater Treatment Plants to a tertiary level, and comply with the efficiency of removing certain parameters of health sanitary that are regulated by the current norms in Colombia. The ability to recirculate treated dumping with the adoption of other technologies such as reverse osmosis and disinfection with ultraviolet light, allows the decrease of the water resource in the Institute and aims at the sustainability objectives of the country and at a global level in the face of the crisis of the exhaustion of the resources that are currently lived.

Keywords: Waste water, waste water treatment, water quality, forensic medicine

Contenido

Pág.

Resumen 5
Lista de figuras 9
Lista de tablas 11
Lista de Símbolos y abreviaturas 12
Introducción 1
1. Tratamiento del agua residual 4
1.1 Tratamiento del agua residual hospitalaria 8
1.2 Tratamiento del agua residual del servicio forense 11
2. Actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses 16
2.1 Análisis de las actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de las sedes Bogotá y Villavicencio 23
2.1.1 Laboratorio de Genética Forense - Bogotá 25
2.1.2 Laboratorio de Genética Forense - Villavicencio 27
2.1.3 Organismo de inspección Lofoscopia - Bogotá 28
2.1.4 Organismo de inspección Lofoscopia - Villavicencio 28
2.1.5 Laboratorio de Balística - Bogotá 29
2.1.6 Laboratorio de Balística - Villavicencio 30
2.1.7 Organismo de inspección de Patología y Antropología - Bogotá 31
2.1.8 Organismo de inspección de Patología y Antropología - Villavicencio 32
2.1.9 Laboratorio de Biología - Bogotá 34
2.1.10 Laboratorio de Biología - Villavicencio 34
2.1.11 Laboratorio de Estupefacientes - Bogotá 35
2.1.12 Laboratorio de Toxicología- Bogotá 36

2.1.13 Laboratorio de Evidencia Traza- Bogotá 37
2.2 Diagramas de flujo de las actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de las sedes Bogotá y Villavicencio 38
3. Plantas de Tratamiento de Agua Residual de las sedes de Bogotá y Villavicencio.. 40
3.1 Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá..... 41
3.2 Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio..... 46
3.3 Comparación de las caracterizaciones de la PTAR de Bogotá y de Villavicencio 50
3.4 Cálculo de cargas contaminantes en la PTAR de Bogotá y de Villavicencio 64
4. Análisis de los resultados obtenidos para las PTAR de la sede Bogotá y Villavicencio 67
5. Conclusiones y recomendaciones 71
5.1 Conclusiones..... 71
5.2 Recomendaciones..... 72
A. Anexo: Plano de localización de la sede Villavicencio 73
B. Anexo: Plano de localización de la sede Bogotá 74
Bibliografía 75

Lista de figuras

Figura 1-1. Documentos académicos sobre el tratamiento del agua residual clasificados por año y fuente 4
Figura 1-2. Clasificación de tratamiento del agua residual 6
Figura 1-3. Documentos académicos sobre el tratamiento del agua residual hospitalaria clasificados por año y fuente 9
Figura 2-1. Imagen satelital (Google Maps) de la ubicación del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses sede Bogotá 21
Figura 2-2. Imagen satelital (Google Maps) de la ubicación del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses sede Villavicencio 22
Figura 2-3. Diagrama de flujo con entradas y salidas del agua en los laboratorios y organismos de inspección de las sedes Bogotá y Villavicencio 39
Figura 3-1. Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá 43
Figura 3-2. Vista 3D de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá 44
Figura 3-3. Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio 48
Figura 3-4. Vista 3D de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio 49
Figura 3-5. Comparación de comportamiento del pH en la sede Bogotá y Villavicencio 52
Figura 3-6. Comparación de comportamiento de la temperatura en la sede Bogotá y Villavicencio 53
Figura 3-7. Comparación de comportamiento de los sólidos suspendidos totales en la sede Bogotá y Villavicencio 54
Figura 3-8. Comparación de comportamiento de las grasas y aceites en la sede Bogotá y Villavicencio 55
Figura 3-9. Comparación de comportamiento de los tensoactivos en la sede Bogotá y Villavicencio 56
Figura 3-10. Comparación de comportamiento del fósforo total en la sede Bogotá y Villavicencio 57
Figura 3-11. Comparación de comportamiento del fósforo reactivo en la sede Bogotá y Villavicencio 58

Figura 3-12. Comparación de comportamiento del nitrógeno amoniacal en la sede Bogotá y Villavicencio..... 59
Figura 3-13. Comparación de comportamiento del nitrógeno total en la sede Bogotá y Villavicencio 60
Figura 3-14. Comparación de comportamiento de los nitratos en la sede Bogotá y Villavicencio 60
Figura 3-15. Comparación de comportamiento de la DBO en la sede Bogotá y Villavicencio 62
Figura 3-16. Comparación de comportamiento de la DQO en la sede Bogotá y Villavicencio 63

Lista de tablas

Tabla 1-1. Comparación del tratamiento aerobio y anaerobio 7
Tabla 1-2. Recopilación bibliográfica de tratamientos de agua residual hospitalaria 11
Tabla 1-3. Parámetros y límites máximos permisibles acorde a la Resolución 631 de 2015 13
Tabla 1-4. Parámetros y límites máximos permisibles acorde a la Resolución 3957 de 2009 14
Tabla 2-1. Caracterización de los laboratorios y organismos de inspección de estudio en la sede Bogotá 24
Tabla 2-2. Caracterización de los laboratorios y organismos de inspección de estudio en la sede Villavicencio 25
Tabla 3-1. Cálculo de cargas contaminantes de la PTAR sede Bogotá con datos del año 2023 65
Tabla 3-2. Cálculo de cargas contaminantes de la PTAR sede Villavicencio con datos del año 2023 65

Lista de Símbolos y abreviaturas

Superíndices

Superíndice	Término
“	Pulgada

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CO_2	Dióxido de carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EF	Evidencia Física
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
H_2O	Agua
EMP	Elemento Material Probatorio
L	Litro
m	Metro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
mg	Miligramo
NH_3	Amoníaco
N	Nitrógeno
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
P	Fósforo
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
s	Segundo
SSED	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales

Introducción

En la medida en que el mundo va adentrándose en el siglo XXI, la comunidad se encuentra buscando nuevas alternativas para el abastecimiento y gestión del agua. Es así como las comunidades enfrentan desafíos en el abastecimiento del agua en medio del continuo crecimiento de la población, la industrialización, las prácticas agrícolas, la urbanización y el cambio climático, lo cual aumenta el volumen de generación de aguas residuales. Es tradicional el tratamiento de estas aguas para reducir la contaminación, proteger la salud pública y la del medio ambiente (Meneses et al., 2010).

El principal objetivo del tratamiento de las aguas residuales es transformarlas en un vertimiento final tolerable a las condiciones del medio ambiente en términos estéticos, organolépticos y de salud pública. Este concepto permite reflejar la necesidad de determinar, en primera instancia, las características de los vertimientos líquidos sin tratamiento y en segundo lugar, definir las características que debe tener el vertimiento tratado para que el mismo no afecte el medio ambiente en general (Villanueva et al., 2013). En la actualidad las operaciones y procesos unitarios se combinan en una completa planta de tratamiento de agua para proporcionar lo que es llamado tratamiento primario, secundario y terciario (Gupta et al., 2012).

En la disciplina de las ciencias forenses, más específicamente en la disciplina de la Toxicología se tiene que países como Estados Unidos, Australia, Bélgica, Italia, Inglaterra, Reino Unido, Países Bajos, Polonia, Suiza, Dinamarca, España, Bélgica y Alemania han desarrollado estudios para monitorear en las aguas residuales la presencia de drogas ilícitas, opioides y cannabinoides, nicotina, cocaína, anfetaminas, alcohol entre otros, con el fin de identificar actividades ilícitas o anómalas, y así establecer un procedimiento judicial (análisis científico) para usar esta información (pruebas) y establecer la correlación entre el crimen y el culpable. Otra razón, es porque las sustancias mencionadas anteriormente, han sido reconocidas como contaminantes ambientales emergentes debido a su potencial

impacto ambiental dada su frecuente ocurrencia, persistencia y riesgo para la vida acuática y los humanos (Marek WIERGOWSKI et al., 2009)(Kasprzyk-Hordern et al., 2009)(Boles & Wells, 2014)(Bannwarth et al., 2019)(Pacheco Ferreira, 2019)(EMCDDA, 2016)(EMCDDA, 2021)(Bilge et al., 2022)(Hong et al., 2023)(Truta et al., 2023)(Centazzo et al., 2019)(Daglioglu et al., 2019)(Balducci et al., 2016).

A pesar de que se han realizado y documentado investigaciones desde las ciencias forenses a nivel mundial sobre el seguimiento de aguas residuales, no se tienen publicaciones académicas enfocadas a los impactos ambientales que generan las aguas residuales por la prestación del servicio forense en actividades como procesamiento de muestras y realización de necropsias medicolegales, por lo que evaluar el tratamiento del agua residual generada por el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Colombia, es una oportunidad para establecer buenas prácticas en la gestión integral del vertimiento para este tipo de actividad y contribuir con la reducción de la contaminación hídrica con acciones tendientes a la sostenibilidad ambiental.

El Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses es un establecimiento público de naturaleza técnico científica que realiza necropsias médico legales y algunos servicios derivados por su misión institucional, consumen una considerable cantidad de recurso hídrico y generan vertimientos en su mayoría de características infecciosas – biológicas con una alta carga orgánica, esta agua residual generada es tratada antes de ser vertida al alcantarillado público a través de Plantas de Tratamiento de Agua Residual hasta nivel de tratamiento terciario, cumpliendo con los parámetros máximos permisibles acorde con la normatividad ambiental colombiana actual (Resolución 631 de 2015, artículos 5, 14 y 16).

El objetivo principal de la presente investigación es evaluar el tratamiento de las aguas residuales generadas en el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses en una Planta de Tratamiento de Agua Residual de tratamiento aerobio de la sede Bogotá y una Planta de Tratamiento de Agua Residual de tratamiento anaerobio de la sede Villavicencio, esto implica evaluar el uso y proceso del agua potable en la prestación del servicio forense del Instituto en términos cualitativos y cuantitativos, a través de entrevistas y visitas a los laboratorios y organismos de inspección forense, recopilar, analizar y

comparar la información disponible sobre las características de las instalaciones en términos de capacidad y eficiencia de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual de ambas sedes, con la información de los manuales de operación y mantenimiento de los sistemas y los informes históricos de las caracterizaciones fisicoquímicas de las aguas residuales y finalmente establecer y proponer recomendaciones de los procesos que se llevan a cabo en las Plantas de Tratamiento para el manejo de los vertimientos que se generan en esta entidad pública.

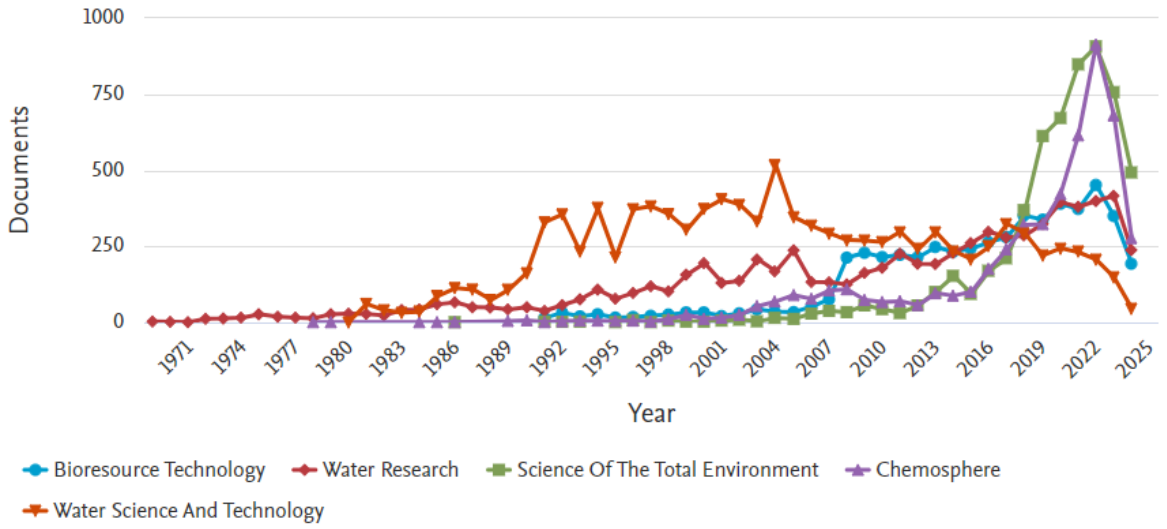
La presente investigación permite identificar oportunidades de mejora en el tratamiento del agua residual generada por los laboratorios y organismos de inspección forense, aportando al compromiso del Sistema de Gestión Ambiental del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses generando impactos ambientales positivos reduciendo las cargas contaminantes que se vierten al alcantarillado, identificando y aplicando buenas prácticas en la gestión integral del recurso hídrico en los procesos institucionales. Además, la generación de nuevo conocimiento en el tratamiento del agua residual resultante del servicio forense es un tema que no ha sido documentado y servirá de herramienta para mejorar el tratamiento actual de los vertimientos y como base teórica para ser aplicada en las sedes del Instituto a nivel nacional.

Lo anterior, con el fin de aportar a la generación de conocimiento en el tratamiento del agua residual proveniente del servicio forense, contribuir con recomendaciones y mejoras tecnológicas en las PTAR, todo esto teniendo en cuenta que no se encuentra información documentada académicamente en publicaciones científicas y ha estado muy estrechamente relacionada con el agua residual hospitalaria, a su vez, este estudio será una base para el análisis de viabilidad técnica y económica para poder hacer uso del agua residual, lo que impacta positivamente en la eficiencia de recursos y disminución de la contaminación hídrica.

1. Tratamiento del agua residual

El aumento de la demanda y escasez de fuentes de agua potable, el rápido desarrollo de la industrialización, el crecimiento de la población, y las sequías a largo plazo se han convertido en un problema mundial. Se estima que alrededor de 4 mil millones de personas en todo el mundo experimentan no tener acceso a agua potable, y millones de personas fallecen anualmente por enfermedades graves transmitidas por el agua, se espera que estas cifras crezcan en un corto plazo, producto del aumento de la contaminación del agua debido a la descarga abrumadora de micropoluyentes y contaminantes en el ciclo natural del agua. Es por esto, que con miras a suprimir el aumento de la escasez de agua potable, el desarrollo de tratamientos de agua residual a bajo costo y con una alta eficiencia es necesario. Una atractiva opción es la posible reutilización de aguas residuales rurales o las aguas residuales municipales tratadas para actividades agrícolas e industriales (Chong et al., 2010).

Figura 1-1. Documentos académicos sobre el tratamiento del agua residual clasificados por año y fuente



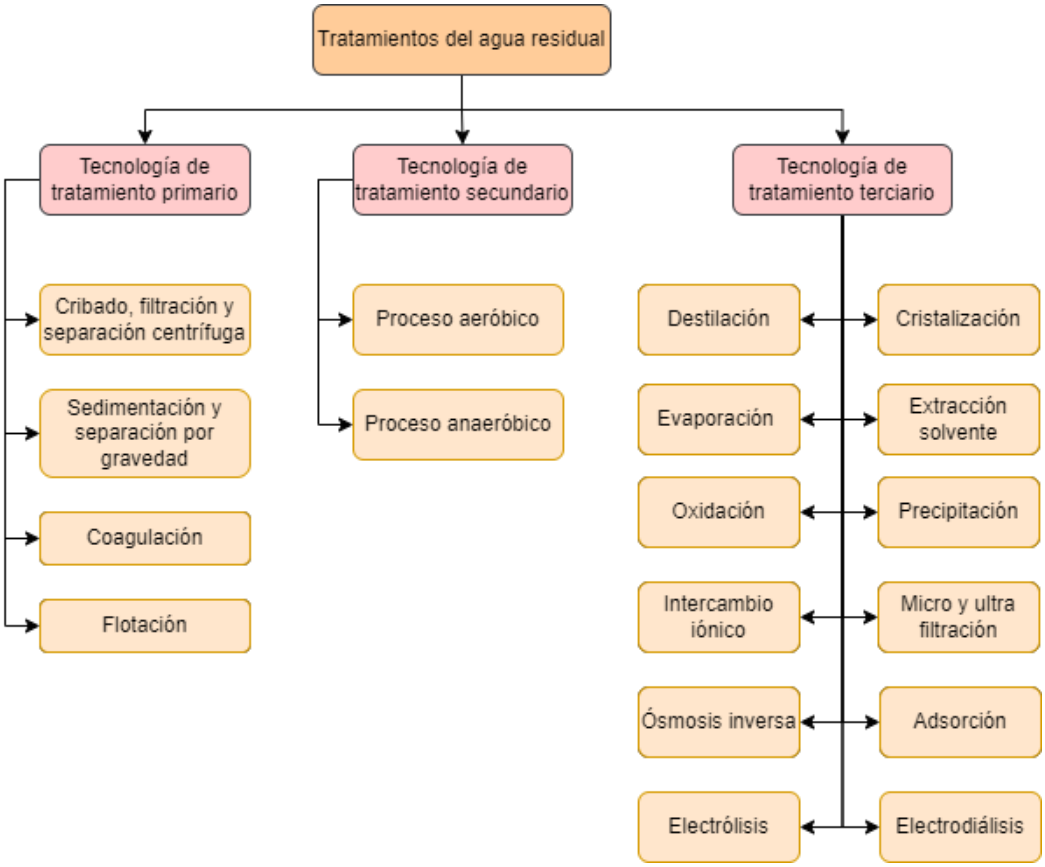
El interés por el tratamiento del agua residual en el mundo ha sido académicamente registrado aproximadamente desde el año 1969, y como se puede ver en la Figura 1-1, se ha mantenido en crecimiento hasta la actualidad por la necesidad de realizar tratamientos que reduzcan el impacto ambiental generado al medio ambiente y como opción de reusó del agua tratada con ciertas condiciones específicas para las actividades humanas que consumen grandes cantidades de agua potable en el mundo.

Es importante conocer la naturaleza cualitativa y cuantitativa del agua residual; muchos contaminantes están presentes en las mismas, el tipo de contaminantes depende de la naturaleza de la industria, agricultura y de los vertimientos de agua residual de las diferentes actividades municipales, este tipo de contaminantes pueden clasificarse como inorgánicos, orgánicos y de naturaleza biológica. En la actualidad las operaciones y procesos unitarios se combinan en una planta de tratamiento de agua completa para proporcionar lo que es llamado tratamiento primario, secundario y terciario (Gupta et al., 2012).

El tratamiento primario incluye procesos preliminares en donde se separan los sólidos orgánicos e inorgánicos, el tratamiento secundario se ocupa de eliminar los sólidos suspendidos, dispersos y disueltos (tratamiento biológico) y finalmente el tratamiento terciario se especializa en mejorar la calidad del agua mediante el empleo de productos biológicos, físicos o químicos. Los tratamientos químicos y de floculación han demostrado ser confiables para la eliminación de microorganismos, pero también se han propuesto para mejorar el proceso de purificación realizar el pretratamiento con filtración de nanofibras, electrocoagulación, fotocatálisis, uso de especies vegetales como el eucalipto y el arundo donax (caña común) (Venugopal et al., 2020)(Gupta et al., 2012).

Algunas de las tecnologías de tratamiento están resumidas en la Figura 1, y es importante considerar las técnicas más efectivas, de bajo costo y que a su vez sean robustas para desinfectar y tratar las aguas desde su fuente de generación, sin estresar más el medio ambiente o colocar a la salud humana en riesgo por el tratamiento que se quiera realizar en sí (Gupta et al., 2012)(Shannon et al., 2008).

Figura 1-2. Clasificación de tratamiento del agua residual



Fuente: (Gupta et al., 2012)

Además, para el tratamiento del agua residual pueden utilizarse procesos aeróbicos y anaeróbicos; el primero involucra el uso de oxígeno libre o que esta disuelto por microorganismos para la conversión de residuos orgánicos en biomasa y CO2, mientras que en el último se degradan residuos orgánicos complejos en metano (CH4), dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O), sin presencia de oxígeno mediante cuatro pasos elementales (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis). Los procesos biológicos aeróbicos se utilizan por lo general para el tratamiento de aguas residuales orgánicas con el fin de obtener una eficacia de alto grado en el tratamiento, mientras que, en el tratamiento anaeróbico, se considera el avance en la biotecnología del tratamiento de residuos, establecido en la percepción de recuperar y utilizar los recursos sin dejar de

alcanzar el objetivo de control de la contaminación. A continuación, se presenta una comparación entre el tratamiento aerobio y el anaerobio (Chan et al., 2009).

Tabla 1-1. Comparación del tratamiento aerobio y anaerobio

Característica	Aerobio	Anaerobio
Eficiencia de la eliminación orgánica	Alta	Alta
Calidad de los efluentes	Excelente	Moderado a pobre
Tasa de carga orgánica	Moderado	Alta
Generación de lodos	Alto	Bajo
Necesidad de nutrientes	Alto	Bajo
Requisitos de alcalinidad	Bajo	Elevado para determinados residuos industriales
Necesidad de energía	Alto	Bajo a moderado
Susceptibilidad a la temperatura	Bajo	Alto
Tiempo de inicio	2 a 4 semanas	2 a 4 meses
Olor	Menos oportunidad para los olores	Posibles problemas de olor
Bioenergía y recuperación de nutrientes	No	Si
Modo de tratamiento	Total (dependiendo de las características de la materia prima)	Esencialmente pretratamiento

Fuente: (Chan et al., 2009)

En adición a lo anterior, el método anaeróbico en comparación con el método aeróbico ofrece beneficios fundamentales como los siguientes: puede emplearse a costos muy bajos, porque los reactores técnicamente son sencillos y relativamente económicos, además que el tratamiento anaerobio en general puede ser operado con poco o ningún uso de consumo de energía, en lugar de consumir energía, se produce energía útil en forma de biogás, el tratamiento se puede aplicar en prácticamente cualquier lugar y en

cualquier escala y el espacio que requiere el sistema es relativamente pequeño, el volumen del exceso de lodo producido en el tratamiento anaeróbico es por lo general, significativamente inferior en comparación con los sistemas aeróbicos y los organismos anaerobios pueden conservarse en largos períodos de tiempo (superior a un año) sin cualquier deterioro grave de su actividad (Lettinga, 1995).

Es por esto, que dependiendo de las necesidades y condiciones que se tengan para el tratamiento de un agua residual se debe escoger el tipo de tecnología a utilizar si aerobio o anaerobia con el fin de optimizar recursos y obtener la eficiencia requerida para la remoción de contaminantes.

También, se puede ver que es operativa y económicamente ventajoso adoptar procesos anaerobios-aeróbicos en el tratamiento de aguas residuales industriales de alta resistencia ya que combina el beneficio de la digestión anaeróbica (p.e. producción de biogás) con los beneficios de la digestión aeróbica (p.e. mejor eliminación de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos volátiles (SSV)(Ros & Zupancic, 2004).

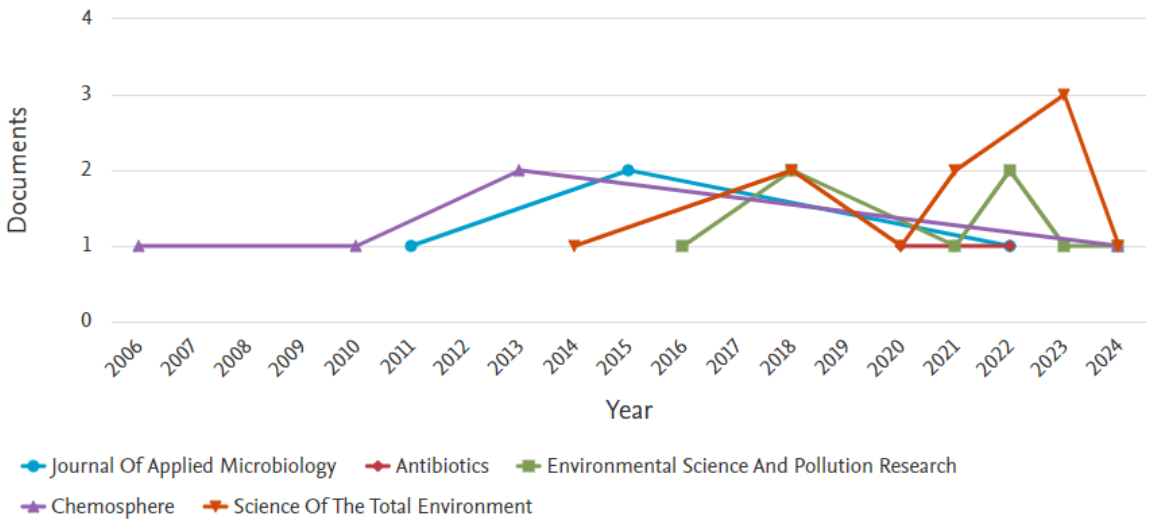
1.1 Tratamiento del agua residual hospitalaria

El desarrollo del ser humano ha traído consigo la aparición de nuevas sustancias en los vertimientos, que no son eliminados fácilmente por los tratamientos tradicionales. Es de suma importancia eliminar estas sustancias de manera efectiva, para mantener la concentración de los químicos en el vertimiento a un mínimo nivel, con el fin de cumplir con las regulaciones medioambientales, que cada vez son más rigurosas. Por esta razón es que se requiere de la investigación de tecnologías nuevas y que sean más eficientes para tratar las aguas residuales que puedan degradar las moléculas complejas en unas más simples y así mitigar la degradación de la calidad del agua (Gogate & Pandit, 2004).

Recientemente, se ha incrementado la atención a la presencia de contaminantes emergentes en los vertimientos de las aguas residuales, aguas superficiales y aguas subterráneas. Lo más común de encontrar es que los contaminantes emergentes no se encuentran reglamentados, y por esto es que pueden ser postulados para ser tenidos en

cuenta en las regulaciones a futuro tomando especial interés en las investigaciones sobre posibles consecuencias en la salud y datos que surjan del monitoreo de su presencia.

Figura 1-3. Documentos académicos sobre el tratamiento del agua residual hospitalaria clasificados por año y fuente



Algunos de estos contaminantes son los tensoactivos, los productos de tipo farmacéutico, los productos que provienen del cuidado personal, los disruptores endocrinos, las drogas ilícitas, los aditivos de la gasolina, entre otros compuestos. La característica principal de estos grupos de contaminantes es que no necesitan estar constantemente en el ambiente para causar efectos negativos, puesto que sus altas tasas de transformación / remoción se pueden compensar por su introducción continua en el ambiente. Los hospitales son fuentes importantes de estos compuestos, ya que se generan una gran variedad de microcontaminantes resultantes del diagnóstico, de los laboratorios, actividades de investigación y evacuación de medicinas de los pacientes (Verlicchi et al., 2010).

Mientras que en algunos países (por ejemplo, Japón, China, Grecia) los efluentes de aguas residuales generadas de los hospitales de gran tamaño, se les hacen pretratamientos biológicos en el sitio, en muchos otros países, incluida Suiza, se conecta directamente al alcantarillado municipal y se trata en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. El agua residual con tratamiento en la fuente, tiene la ventaja de evitar la

dilución, debido a la mezcla con las aguas residuales urbanas y evitar pérdidas en el medio ambiente debido a fugas en el alcantarillado. En el caso de aguas residuales hospitalarias, las preocupaciones son evitar la propagación de bacterias (multirresistentes o patógenas), virus, y huevos de parásitos, así como para evitar el aporte de productos farmacéuticos, agentes de diagnóstico y desinfectantes (Kovalova et al., 2012).

Otro estudio por Husain et al., 2020, también menciona que los volúmenes de generación de agua residual de los hospitales son considerables y representan una gran amenaza para el medio ambiente y, por lo tanto, para la salud humana. El efluente generado a partir de unidades hospitalarias como laboratorios patológicos, salas infecciosas y alojamiento del personal, son muy complejos, ya que contiene microbios patógenos, residuos de fármacos, químicos, tejidos biológicos, cultivos y toxinas químicas.

Hay cierto potencial en las implicaciones para la salud que plantea el efluente hospitalario no tratado como resistencia microbiana, persistencia, daño en el ADN, efectos tóxicos, ecotoxicidad, bioacumulación, etc. A nivel mundial, la gestión de las aguas residuales de los hospitales es un desafío para las autoridades sanitarias y medioambientales, dado que se ha encontrado que los efluentes de los centros de salud afectan negativamente el medio ambiente acuático. Estudios previos también han demostrado que el efluente del hospital contiene contaminantes complejos que requieren ser tratados antes de su eliminación en el sistema de alcantarillado municipal para evitar los efectos adversos en el entorno acuático y epidemias en la ciudad.

A continuación, se resume en la Tabla 2 tecnologías diferentes en el tratamiento de agua residual proveniente de hospitales aportada por diferentes autores en el mundo.

Tabla 1-2. Recopilación bibliográfica de tratamientos de agua residual hospitalaria

Tecnología	Autor
Coagulación y floculación, adsorción por carbón activado, lodos activados, reactores de membrana de ultrafiltración biológica, osmosis inversa, nanofiltración, ozonización y procesos avanzados de oxidación, desinfección, tratamiento natural por humedales artificiales.	(Verlicchi et al., 2010)
Biorreactor de membrana	(Kovalova et al., 2013)
Coagulación, floculación y flotación	(Suarez et al., 2009)
Procesos de oxidación avanzada	(Husain et al., 2020)
Carbono activado, ozono y rayos ultra violeta	(Kovalova et al., 2012)
Lodos activados y tratamiento en un biorreactor de membranas	(Mahnik et al., 2007)
Oxidación avanzada y un reactor anaerobio horizontal de lecho fijo (RAHLF)	(Ortiz & Chaparro, 2014)
Reactor de biopelícula sumergido óxico anaeróbico de flujo ascendente	(Pirsaheb et al., 2018)
Tanque de homogenización, un tanque de aireación, un tanque de sedimentación, un tanque de retención de lodos y un área para la desinfección y control	(Khan et al., 2024)
Cribado, coagulación, floculación, sedimentación, aireación, tratamiento térmico, procesos de lodos activados, biorreactores de membrana, reactores de biopelícula de lecho móvil, humedales, métodos basados en la adsorción, filtración de membrana, métodos de desinfección para la eliminación de bacterias y de virus, procesos avanzados de oxidación, y nanoremediación	(Bhandari et al., 2023)
Trampa de grasas, reactor anaerobio, floculador, filtración y desinfección	Autor

1.2 Tratamiento del agua residual del servicio forense

Uno de los focos de atención, en materia epidemiológica, lo constituye, sin duda, la actividad relacionada con las prácticas forenses y especialmente las actividades que se desarrollan en los Institutos de Medicina Legal o su equivalente a nivel mundial. Además, se ha correlacionado su actividad con las de los hospitales y por esto la revisión bibliográfica de la composición de estos vertimientos y sus posibles tratamientos. El estudio

de cadáveres y posibles causas de muerte involucra rigurosos protocolos de seguridad y de análisis científico que, dadas las circunstancias que se viven actualmente en el mundo, adquieren mayor relevancia e interés en el campo investigativo. También, existe una estrecha relación con la naturaleza y calidad de vertimientos de aguas residuales no domésticas de dichas instituciones.

En Colombia, las autoridades ambientales se rigen con la Resolución 631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, y para las aguas residuales generadas en la prestación del servicio forense se las ha clasificado en la actividad de seguimiento y monitoreo como “pompas fúnebres y actividades relacionadas”. No obstante, en esta Resolución en los artículos 5[1], 14 y 16 se fijan parámetros máximos permitidos en los efluentes de naturaleza físicos y químicos sin tener en cuenta la parte microbiológica, por lo que el análisis de evaluación de las tecnologías de tratamiento que tienen las dos PTAR de estudio está enfocado, únicamente, en el seguimiento a los parámetros fisicoquímicos.

Los límites máximos permisibles y los parámetros que debe monitorear el Instituto una vez al año son los relacionados en la Tabla 1-3, acorde a la clasificación del Instituto en la actividad de “pomas fúnebres y actividades relacionadas” (artículo 14) de la Resolución 631 de 2015, con la aplicación de un factor de conversión de 1,5 (artículo 16) a los parámetros de DQO, DBO_5, SST, SSED y Grasas y Aceites por realizarse el vertimiento al alcantarillado público, de igual forma, solo para el distrito capital la Secretaría Distrital de Ambiente ha establecido el cumplimiento de la Resolución 3957 de 2009 “Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital” mediante el establecimiento de aplicación del rigor subsidiario con límites máximos permisibles para los parámetros de Temperatura, Sustancias Activas al Azul de Metileno y Cadmio (Tabla 1-4).

[1] Artículo 5 de la Resolución 631 de 2015. DEL PARÁMETRO DE TEMPERATURA Y DE LA ZONA DE MEZCLA TÉRMICA. Para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40,00 °C.

Tabla 1-3. Parámetros y límites máximos permisibles acorde a la Resolución 631 de 2015

RESOLUCIÓN 631 DE 2015 CUMPLIMIENTO PARAMETROS ACTIVIDAD DE POMPAS FUNEBRES			
PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LIMITES PERMISIBLES	
		ARTICULO 14	ARTICULO 16
pH	Unidades de pH	6 a 9	5 a 9
DQO	mg/L O_2	600	900
DBO_5	mg/L O_2	250	375
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100	150
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1	1,5
Grasas y Aceites	mg/L	20	30
Fenoles	mg/L	0,2	No aplica
Formaldehido	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Fósforo	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Nitratos	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica
Nitrógeno Total	mg/L	Análisis y Reporte	No aplica

Tabla 1-3. (Continuación)

RESOLUCIÓN 631 DE 2015 CUMPLIMIENTO PARAMETROS ACTIVIDAD DE POMPAS FUNEBRES			
PARAMETRO	UNIDADES	VALORES LIMITES PERMISIBLES	
		ARTICULO 14	ARTICULO 16
Cadmio	mg/L	0,05	No aplica
Cromo	mg/L	0,5	No aplica
Mercurio	mg/L	0,01	No aplica
Plomo	mg/L	0,1	No aplica
Acidez Total	mg/L $CaCO_3$	Análisis y Reporte	No aplica
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	Análisis y Reporte	No aplica
Dureza Cálcica	mg/L $CaCO_3$	Análisis y Reporte	No aplica
Dureza Total	mg/L $CaCO_3$	Análisis y Reporte	No aplica
Color Real	m^{-1}	Análisis y Reporte	No aplica

Tabla 1-4. Parámetros y límites máximos permisibles acorde a la Resolución 3957 de 2009

RESOLUCIÓN 3957 DE 2009 APLICACIÓN DE RIGOR SUBSIDIARIO		
PARAMETRO	UNIDADES	APLICACIÓN RIGOR SUBSIDIARIO
Temperatura	°C	30
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	10
Cadmio	mg/L	0,02

Con respecto a los tipos de Plantas de Tratamiento de Agua Residual existentes en el Instituto, todas tienen las mismas unidades de proceso con tratamiento biológico, con adición de químicos (coagulantes, desinfectantes, antiespumantes y microorganismos facultativos) y secado de lodos, la única sede que tiene un reactor anaerobio es la de Villavicencio y por esto se escogió para realizar la evaluación de su tratamiento.

En general las unidades de proceso de las PTAR a nivel nacional son las siguientes, tratamiento primario: caja de entrada, rejilla manual para cribado de material grueso, trampa de grasas, tanque de homogenización y bombeo, tratamiento secundario: reactor aerobio o anaerobio, sedimentador, clarifloculador, tanque de compensación, filtración, tratamiento terciario: desinfección y deshidratación de lodos en filtro prensa o lechos de secado.

2. Actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses

En muchos países, la medicina forense representa una especialidad médica dentro del sistema jurídico, la cual se ocupa principalmente del examen y la evaluación de las personas que han resultado heridas o muertas por influencias externas, como traumatismos o intoxicaciones, o se sospecha que lo han sido, pero también de las personas sospechosas de haber lesionado a otra persona. A su vez, los suicidas y las muertes accidentales son también examinados por un especialista en medicina forense (o patología forense). Las personas con lesiones no mortales después de lesiones o intoxicación intencionalmente autoinfligidas o accidentales suelen ser tratadas exclusivamente dentro del sistema de atención de la salud. La patología forense es la parte de la medicina forense que se ocupa del examen de personas fallecidas, y aunque la legislación relativa a la patología forense difiere de un país a otro, un principio común es que en la investigación de una posible muerte o sospecha de muerte penal, se contrata a un patólogo forense mediante una solicitud oficial de la policía o el fiscal, para que asista en la investigación como un experto médico que se esfuerza por ayudar con evaluaciones imparciales, basadas en "la ciencia y la experiencia probada"(Eriksson, 2016).

La organización formal de la medicina forense y los expertos en medicina forense es algo diferente en todos los países. En Europa Central, por ejemplo, los expertos medicolegales son contratados en una universidad, ya que se cree que esto garantiza una base científica, independencia e imparcialidad. En Suecia y Finlandia, una autoridad gubernamental nacional es responsable de la administración de los servicios de medicina forense, mientras que, en los Estados Unidos, Canadá y varios otros países anglosajones, se aplican diversos sistemas bajo los términos generales "sistema forense" y "sistema médico forense", sistemas que no siempre son fáciles de diferenciar (Eriksson, 2016).

En Colombia, desde la época de la Colonia, en el año 1493 se tiene documentado el primer dictamen medicolegal, las prácticas médicas eran atribuidas a los curanderos, que más adelante serían reemplazados por médicos dedicados al arte de la cirugía, ellos también empezarían por realizar las necropsias en un inicio de tipo rudimentario, pero fueron entando conocimientos científicos en esa época y que hoy en día son la base de muchos conceptos que se siguen utilizando (C. A. Giraldo, 2014).

En el año 1914 por medio de la ley 53 de octubre 29 se organizó el Servicio Nacional de Medicina Legal, para esa época el servicio fue dependencia del Ministerio de Gobierno y su primer director fue el doctor José María Lombana Barreneche, en 1946 el servicio paso a ser dependencia del Ministerio de Justicia, en 1989 paso de ser una división a una dirección y ya para el año 1991 con la nueva Carta Constitucional, la Dirección Nacional de Medicina Legal el primero de julio de 1992 pasó a ser un establecimiento público autónomo adscrito a la Fiscalía General de la Nación, incorporado a la Rama jurisdiccional del poder público y en desarrollo de ese mandato constitucional el Decreto 2699 de 1991 creó el nuevo organismo que se llamó “Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses”, e unificó los sistemas médico-legales bajo un sistema único de medicina legal dirigido y controlado por el nuevo ente público (C. Giraldo, 1994).

A pesar de provenir la medicina forense de las bases de la medicina como tal, está articula un conjunto de conocimientos médicos que tienen como misión prestar auxilio y soporte científico y técnico a la administración de la justicia, y es por ello que se atribuye en muchas ocasiones la homologación del servicio del Instituto con los hospitales, sin embargo, en el desarrollo de sus funciones se difiere de lo que normalmente se realiza en un hospital y por ello es la unicidad de los procesos que se llevan a cabo en el Instituto.

Las ciencias forenses, son un conjunto de disciplinas de las ciencias naturales, que aplican el método científico al análisis de los elementos materia de prueba "EMP" o evidencias físicas "EF", con el fin de entregar a la administración de justicia, evidencia científica imparcial sobre las circunstancias de tiempo, modo y lugar en el que ocurrieron los hechos motivo de investigación. Un científico forense generalmente trabaja en un laboratorio y su campo de trabajo está relacionado con el reconocimiento, identificación, individualización y evaluación de los elementos materiales probatorios o evidencias físicas, escribiendo los

correspondientes informes y en algunos casos, con su testimonio como testigo pericial ante la corte[2].

Algunos procesos del Instituto generan vertimientos y estos deben tratarse para cumplir con criterios de calidad acorde a la normatividad ambiental, tratar el agua residual es una preocupación mundial debido al impacto en el ser humano y en el medio ambiente. Esto ha llevado a que se estén desarrollando más avances tecnológicos para el tratamiento del agua residual y así cumplir con los valores máximos permitidos de los vertimientos y minimizar las afectaciones que puedan generarse. A su vez, en muchos países ya se han adelantado proyectos en donde se realiza el reúso del agua residual tratada para diferentes actividades dependiendo de los requerimientos de calidad.

Es por esto, que la investigación de las tecnologías del tratamiento de agua residual generada de los servicios forenses es un tema de gran interés, para evaluar varios tipos de tratamiento acorde a necesidades de remoción específica o por requerimientos de cumplimiento legal. En este caso, para el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses se hace por exigencia normativa y por compromiso en el mejoramiento continuo del Sistema de Gestión Ambiental. Siendo así, se requiere de una evaluación de las dos tecnologías existentes (anaerobia y aerobia) en el Instituto para proponer acciones de optimización donde se requiera mejorar el proceso de tratamiento de los vertimientos generados por la prestación del servicio forense a la comunidad y a la administración de justicia colombiana. Además, que se establece la importancia y aporte a la investigación propuesta en función de la generación de conocimiento, desarrollo tecnológico y el aporte a dar soluciones para minimizar los contaminantes vertidos al alcantarillado, y estudiar la viabilidad del uso del agua residual tratada en actividades que consumen agua en el Instituto.

Para el desarrollo de las actividades propuestas en el Trabajo Final de Maestría, en el Instituto se contó con la aprobación de un proyecto de investigación científica en donde se estableció el cumplimiento de los mismos objetivos con el fin de contar con los permisos

[2] Definición del portafolio de servicios de la página oficial del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses: https://www.medicinalegal.gov.co/portafolio-de-servicios.

respectivos para recopilar información, realizar entrevistas a los servidores públicos que laboran en los laboratorios y organismos de inspección de estudio, hacer visitas de campo en las instalaciones de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual de las sedes Bogotá y Villavicencio y finalmente tener acuerdos de confidencialidad y respetar los derechos de autor del Instituto.

En la actualidad el grupo interno de trabajo del Instituto que lidera todos los lineamientos y directrices en el ámbito ambiental a nivel nacional está a cargo del Grupo Nacional de Gestión de Servicios Técnicos Especializados y de Medio Ambiente, que, a su vez, hace parte de la Subdirección de Servicios Forenses, dado que es la prestación del servicio pericial la que mayor impacto ambiental negativo genera al medio ambiente. Lo anterior, sustentado en el análisis del Sistema Integrado de Gestión del cual hace parte el Sistema de Gestión Ambiental, a través de la implementación del procedimiento Institucional “Identificación de aspectos y evaluación de impactos ambientales”, el cual cuenta con una matriz donde se registran por áreas y/o procesos los aspectos ambientales que interactúan con el medio ambiente y que generan impactos ambientales tanto positivos como negativos, con el desarrollo de la matriz se hace una calificación teniendo criterios de existencia normativa, cumplimiento legal, naturaleza del impacto (positivo o negativo), extensión, probabilidad de ocurrencia, persistencia en el tiempo, reversibilidad, efecto y recuperabilidad, dando como resultado impactos ambientales no significativos (importancia baja de 1 - 25 en calificación) y significativos (importancia moderada >25 - 50 o importancia alta >50 - 100).

Del anterior ejercicio, se ha encontrado que los impactos ambientales negativos más significativos por su recurrencia son la generación de residuos sólidos peligrosos (infecciosos), la generación de vertimientos de agua residual no doméstica y el consumo de agua potable de los laboratorios forenses, organismos de inspección y realización de necropsias medicolegales. Otro aspecto ambiental identificado es la generación de malos olores por el funcionamiento normal de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual, sin embargo, dadas las características del agua residual generada en el Instituto con altas cargas orgánicas es de esperar que el tratamiento genere estos olores por la generación de ácido sulfhídrico (H_2S) por la descomposición de la materia orgánica. En la sede Bogotá, por la cercanía de la PTAR a las áreas administrativas y clínica forense es en donde

algunas veces hay que hacer intervención con mantenimientos rutinarios, adición de microorganismos facultativos y retrolavados al sistema de filtración del carbón activado. Sin embargo, en la sede Villavicencio la generación de olores no es causal de incomodidad dado que se encuentra ubicada lejos del área administrativa, en campo abierto y el tratamiento como es de tipo anaerobio cuenta con una chimenea de escape de gases a una altura adecuada para evitar esta incomodidad. De todas formas, no se cuentan registros de peticiones, quejas, reclamos parte de la comunidad aledaña en cuanto a la generación de malos olores.

Las instalaciones del Instituto en la sede Bogotá se encuentran ubicadas en la calle 7A No. 12A-51, localidad de Santa Fe, sector de Las Nieves y Barrio Santa Inés, en donde se desarrollan las actividades misionales (forenses) y administrativas, hoy en día los edificios se encuentran aledaños por el lado norte, oriente y sur con el parque Tercer Milenio y por el lado occidente con la avenida caracas por donde transita la troncal de Transmilenio. Este sector históricamente ha estado rodeado por habitantes en condición de calle, antes con más impacto por la existencia del Bronx, comerciantes y compradores por las actividades económicas que se desarrollan en San Victorino y la Plaza España y en general aún se conservan locales que prestan servicios de “sobanderos y curanderos” muy comunes de instalarse cercanos al Instituto ya que algunos de estos “mecánicos de huesos” aprendieron en las salas de necropsias arreglando o embalsamando a los muertos, y se hicieron expertos en la anatomía humana, las viviendas más cercanas son las del Barrio San Bernardo y conjuntos de Campo David a una distancia de 250 metros aproximadamente del Instituto. El sector en general presenta en la actualidad problemas sociales y de salud pública, delincuencia, abuso de drogas ilícitas y comercios informales, los cuales han sido atendidos según el alcance de las funciones del Distrito, sin embargo, es común que al transitar por el Instituto aún se vean las problemáticas mencionadas anteriormente.

Figura 2-1. Imagen satelital (Google Maps) de la ubicación del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses sede Bogotá

Las instalaciones del Instituto en la sede Villavicencio se encuentran ubicadas en la carrera 6 No. 24A - 14, Barrio Menegua, en donde se desarrollan las actividades misionales (forenses) y administrativas, el edificio se encuentra aledaño por el lado norte por un terreno baldío, por el oriente por unas canchas de fútbol, por el sur por el Centro de Desarrollo Infantil (CDI) Chaparralito Llanero y por el lado occidente por casas, comercio y una funeraria. El terreno donde se encuentra el Instituto según el concepto de uso del suelo corresponde a un área residencial con actividad productiva A.A.R.3: *"áreas residenciales en las que se permite una mayor ocupación* del suelo por parte del uso industrial compatible con el uso principal residencial", además, tiene un uso dotacional grupo 4:

"corresponde a los servicios de soporte urbano y a la infraestructura constituyente y complementaria de los Sistemas Estructurantes, que requieren de localización especial por el muy alto impacto ambiental y urbano que generan. Se subdivide en: 1. De soporte Urbano. Servicios Fúnebres, Lugares o edificaciones destinadas a: 5. Prestación de servicios de manejo y entrega de cadáveres (morgue). Ubicado en un ***AAR 3****, su categoría de uso es* ***RESTRINGIDO****. Usos Restringidos: son aquellos que, previo estudio del impacto social, ambiental, urbano, de las medidas de mitigación y mediante la formulación del plan de manejo correspondiente, pueden ser autorizados por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal".* Por lo anterior, a pesar de que las instalaciones del Instituto si se encuentran cercanas a viviendas, las labores del Instituto se encuentran autorizadas por la Dirección Técnica de Desarrollo Urbano de la ciudad de Villavicencio.

Figura 2-2. Imagen satelital (Google Maps) de la ubicación del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses sede Villavicencio

2.1 Análisis de las actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de las sedes Bogotá y Villavicencio

El Instituto dada su cobertura a nivel nacional en la prestación de diferentes servicios forenses, ha normalizado los procesos para que en cualquier sede se conserve la atención con las mismas guías, reglamentos, protocolos, manuales y modelos. Los Laboratorios Forenses como Biología, Balística, Estupefacientes, Evidencia Traza, Genética, Toxicología y los Organismos de Inspección como Lofoscopia, Física, Grafología y Documentología, Antropología y Patología cuentan con procedimientos estandarizados de trabajo, donde se define el paso a paso para la ejecución de un ensayo o una inspección, esto con el fin de garantizar la validez y confiabilidad de los resultados emitidos, por lo que se ha establecido de manera rutinaria la ejecución de los procesos, dependiendo de la naturaleza de los métodos aplicables a cada disciplina, además, que los laboratorios forenses cuentan con acreditación ISO/IEC 17025:2017 “Requisitos generales para la competencia de laboratorios de calibración y de ensayo” hasta el 2027-07-14 otorgado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) y los organismos de inspección cuentan con acreditación ISO/IEC 17020:2012 “Requisitos para el funcionamiento de diferentes tipos de organismos que realizan la inspección" hasta el 2027-04-02 otorgado por ONAC.

En el análisis de las actividades misionales del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses en las sedes Bogotá y Villavicencio, a través de la Subdirección de Investigación Científica, se hicieron visitas a los laboratorios forenses y organismos de inspección de estas sedes para que, por medio de entrevistas y verificación visual se pudiera identificar las actividades y procedimientos que consumen agua y generan vertimientos de agua residual no doméstica, esto con el fin de generar un diagrama de flujo que de manera cualitativa brinde aspectos relevantes para entender la dinámica del flujo del agua en la prestación del servicio forense. A continuación, se listan los laboratorios y organismos de inspección que se visitaron en las sedes de Bogotá y Villavicencio y que tienen manejo del recurso hídrico.

Tabla 2-1. Caracterización de los laboratorios y organismos de inspección de estudio en la sede Bogotá

Laboratorio / organismo de inspección	Procedimientos que usan agua	Generación de vertimientos	Conexión con la PTAR
Laboratorio de Genética forense	Identificación de personas, cadáveres y fragmentos corporales humanos, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Organismo de inspección de Lofoscopia	Revelado de huellas, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Balística forense	Estudiar armas, proyectiles, vainillas, cartuchos, perdigones, postas, pistones de potencia, esquirlas y fragmentos de proyectil, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Organismo de inspección de Patología y Antropología forense	Necropsias medicolegales, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Biología forense	Identificación de la naturaleza y origen de una muestra, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Organismo de inspección de Lofoscopia	Revelado de huellas, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Estupefacientes	Análisis de sustancias que producen dependencia síquica o física y sometidas a control por la Ley 30/86 o medicamentos sometidos a control por el Ministerio de Protección Social y Ministerio de Salud, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Toxicología	Análisis sobre material orgánico para determinar la presencia de sustancias tóxicas, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Evidencia traza	Análisis comparativo (cotejo) de trazas de elementos, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si

Tabla 2-2. Caracterización de los laboratorios y organismos de inspección de estudio en la sede Villavicencio

Laboratorio / organismo de inspección	Procedimientos que usan agua	Generación de vertimientos	Conexión con la PTAR
Laboratorio de Genética forense	Identificación de personas, cadáveres y fragmentos corporales humanos, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Organismo de inspección de Lofoscopia	Revelado de huellas, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Balística forense	Estudiar armas, proyectiles, vainillas, cartuchos, perdigones, postas, pistones de potencia, esquirlas y fragmentos de proyectil, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Organismo de inspección de Patología y Antropología forense	Necropsias medicolegales, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si
Laboratorio de Biología forense	Identificación de la naturaleza y origen de una muestra, lavado de material de laboratorio y áreas de trabajo	Si	Si

2.1.1 Laboratorio de Genética Forense - Bogotá

En el laboratorio se manejan muestras como EMP o EF[3], en su mayoría fluidos biológicos como sangre, semen, y saliva provenientes del laboratorio de Biología o pelo, músculo, dientes y/o tejidos entregados por el organismo de inspección de Patología, para que en este laboratorio se pueda identificar el perfil genético e identificación fehaciente de un ser humano.

El procesamiento en el laboratorio depende del tipo de muestra que se tenga, por ejemplo con las muestras óseas y piezas dentales se utiliza la biología molecular para la extracción

[3] De manera general se entiende por EMP y EF cualquier objeto, instrumento o medio de conocimiento conducente al descubrimiento de la verdad, como son huellas, marcas o rastros de origen físico, químico, biológico o electrónico, perceptible a través de los sentidos o mediante la utilización de tecnología forense, cuyo análisis proporciona las bases científicas o técnicas para encaminar la investigación penal, lograr la identificación del autor o autores, y así confirmar o descartar la comisión de una conducta punible y la reconstrucción de los hechos. Glosario del Sistema Integrado de Gestión del INMLCF.

de ADN por medio de la técnica de amplificación PCR a través de equipos de alta tecnología, estas muestras pueden provenir de dos fuentes: la exhumación de un cuerpo o durante la realización de una necropsia medicolegal, en todo caso las muestras pueden traer tejido blando y tierra, por lo que hay que hacer una limpieza mecánica y lavado para facilitar la desbridación[4] y posteriormente se hace una pulverización, para finalmente realizar la extracción del ADN. En este proceso se usa agua de grifo, agua ultrapura, jabón neutro Extran®, hipoclorito de sodio al 0,5 %, buffer de digestión, buffer de unión, buffer de elución, buffer de lavado, sílice, guanidina y solventes orgánicos que se consumen totalmente en el proceso y los excesos van a bidones que luego son recolectados por un gestor externo.

Cuando se realizan casos de presunto delito sexual, desde el laboratorio de Biología ingresan prendas que contienen muestras con algún fluido corporal, en el laboratorio de Genética se hace un corte pequeño de la prenda para extraer el ADN y cuando se requiere verificar la presencia de espermatozoides se hace mediante la tinción “árbol de navidad” compuesta por colorantes que permite colorear las cabezas de los espermatozoides de color rojo y el resto de la célula de color verde, mucho del colorante es usado en el procesamiento de la muestra y el restante es almacenado en bidones para su posterior descarte.

En el laboratorio se hace lavado y desinfección del material de vidrio y plástico reutilizable (gravillas, frascos, puntas) con el jabón neutro Extran® e hipoclorito de sodio, el agua residual generada y que es conducida por la tubería a la Planta de Tratamiento de Agua Residual es el resultado de los remanentes biológicos procesados en el laboratorio, mezclas de reactivos y colorantes que no fueron consumidos en su totalidad. Hay cinco grifos de agua, siete desagües en pocetas, cinco dispositivos para lavado de ojos de emergencia y cinco sifones. En este laboratorio hay un sistema para la destilación y desionización del agua, y la misma produce un agua de desecho que puede ser utilizada en otro proceso como por ejemplo el lavado del material.

[4] Dividir con un instrumento cortante tejidos fibrosos. Glosario del Sistema Integrado de Gestión del INMLCF.

2.1.2 Laboratorio de Genética Forense - Villavicencio

El laboratorio se llevan a cabo análisis de muestras familiares y restos humanos de vivos o fallecidos, también se lleva a cabo el proceso de purificación del agua para volverla ultrapura, se hace amplificación de ADN y se realiza lavado de material. Las muestras que ingresan al laboratorio son de tipo biológico como sangre, células epiteliales, restos óseos, cartílagos o dientes

En el proceso de extracción de ADN se utilizan insumos para la digestión, buffer para la extracción, se usa hipoclorito, EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), detergente neutro Extran®, agua ultrapura, lauril, fenol, etanol, cloroformo, sangre, proteasa, polvo de hueso y tejidos. La mayoría de los insumos químicos se consumen en el procesamiento de las muestras, y los desechos como las trazas de fenol salen como residuos de fenol en recipientes plásticos, y el EDTA, el lauril y la proteasa se vierten en bidones para su posterior descarte.

El sistema de purificación de agua utiliza un sistema de osmosis inversa y desionización, en promedio se usan 16 litros de agua potable para convertir 8 litros de agua ultrapura, por lo que el agua de rechazo que corresponde a los otros 8 litros podría usarse en otro procesamiento de muestra cuando sea posible o para el lavado del material en el laboratorio.

El lavado del material en el laboratorio se hace de manera diaria con jabón neutro Extran®, se lava todo el material reutilizable, soporte de tubos y botellas vacías. Hay dos baños, uno para mujeres y otro para hombres en donde hay dos sanitarios, un orinal, cuatro lavamanos, dos sifones y una poceta con grifo para lavar los utensilios de aseo para lavar el laboratorio, ya en el laboratorio en general hay seis grifos con poceta, seis desagües, un dispositivo para lavado de ojos de emergencia, dos sifones y una ducha de emergencia.

2.1.3 Organismo de inspección Lofoscopia - Bogotá

En el laboratorio se manejan pulpejos[5], los cuales son muestras de tipo biológico que se analizan y procesan, en este organismo de inspección se usa el agua potable para lavar y verificar la muestra biológica. Dentro de los insumos químicos que se utilizan está el Isodine, Complucad® e hidróxido de amonio, estos últimos para fijar y recuperar los tejidos para revelar huellas dactilares. Se realiza lavado periódico de las cabinas en donde se manipulan los pulpejos y lavado del material utilizado. Hay dos llaves de agua en pocetas, un dispositivo para lavado de ojos de emergencia, dos desagües y un sifón.

Esta área genera aguas residuales con carga orgánica del lavado de los pulpejos con trazas de Isodine y lavado del material que se usa en el procesamiento, las trazas de químicos que se lleguen a generar se disponen en bidones para su posterior gestión integral externa, este organismo de inspección se encuentra conectado a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede.

2.1.4 Organismo de inspección Lofoscopia - Villavicencio

El organismo de inspección hace la identificación de cadáveres por medio de huellas latentes de EMP, en una cabina se tratan los pulpejos con cianocrialato, el cual genera un vapor que se adhiere a la huella por reacciones de polimerización y da como resultado una huella visible blanca. Los pulpejos se trabajan de ser posible siempre en sala de necropsias y la muestra (pulpejo) que deba ser tratada en el área de lofoscopia es llevada en un recipiente con Isodine en solución o alcohol, para su conservación se usa hidróxido de amonio y Complucad® para el tratamiento de la epidermis. El lavado del material se hace en la misma sala de necropsias, dado que el procesamiento de las muestras en el área de lofoscopia es poco común, sin embargo, de llegarse a lavar material serían las pinzas para la manipulación del pulpejo.

[5] Parte carnosa y mollar de un miembro pequeño del cuerpo humano y más comúnmente, parte de la palma de la mano de la que sale el dedo pulgar. Glosario del Sistema Integrado de Gestión del INMLCF.

Los insumos químicos que no se agotan en el procesamiento de las muestras como el amonio y el Complucad®, son segregados en bidones para su posterior tratamiento con el gestor externo autorizado, en esta área solo hay un grifo en una poceta y un desagüe.

2.1.5 Laboratorio de Balística - Bogotá

En el laboratorio se realizan estudios de identificación de municiones y sus derivados, estudios de armas de fuego y sus accesorios, revelado de seriales de armas de fuego o esposas metálicas, estudios de cotejo de armas de fuego, análisis de residuos de disparo en prendas de vestir y en piel, determinación de trayectorias de un proyectil, asistencia en el estudio de lesionados o víctimas fatales por arma de fuego que requiera apoyo en clínica forense o en el desarrollo de una necropsia y determinación de posibles posiciones de las víctimas y agresores al momento de producirse un disparo.

En general, en la sala de necropsias se hace el abordaje de estudio de la distancia de disparo en las prendas de la víctima, y de contar con el EMP del proyectil se procederá a realizar su limpieza para su posterior análisis. En general en las prendas se hace una verificación física de los orificios de disparo con el fin de encontrar correspondencia con las lesiones presentes en la víctima, a su vez, el estudio químico permite identificar la presencia de pólvora con la prueba de sulfodifenilamina y Griess modificado y con la prueba de rodizonato de sodio y ditioxiamida se puede identificar residuos inorgánicos principalmente del proyectil y/o mezcla iniciadora.

Otro procedimiento de este laboratorio es la recuperación de proyectiles de las armas de fuego que llegan como EMP, y su obtención se hace en un tanque de agua en donde se dispara el arma y se libera el proyectil para su análisis en el abordaje de casos de lesionados o víctimas fatales, este tanque tiene trazas de plomo en el agua, las cuales se van acumulando a la medida que se va usando este proceso, por lo que en este caso se ve como oportunidad de mejora, poder realizar la limpieza del agua del tanque a través de un sistema de recirculación con filtros de metales pesados, y así evitar estar desocupando y llenando este tanque con agua potable. En primera instancia su justificación radica, por los costos de la succión de esta agua plomada con un gestor externo y el consumo de agua al llenar nuevamente el tanque, también hay que tener en cuenta que este tanque se

encuentra aledaño a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede por lo que podría verterse el agua con plomo en este sistema, sin embargo, ya que la PTAR tiene en esencia un tratamiento biológico podría haber afectaciones en su funcionamiento o en definitiva las cargas de plomo no podrían ser removidas por el sistema y sobrepasarían los límites máximos permisibles de plomo (0,10 mg/L) que regula la Resolución 631 de 2015 cuando se hace vertimiento a la red de alcantarillado del distrito.

2.1.6 Laboratorio de Balística - Villavicencio

En el laboratorio se procesan evidencias con armas de fuego inclusive y se hace análisis de prendas, las muestras que ingresan al laboratorio son prendas, municiones, armas y proyectiles. Se hace lavado de los elementos y se hace procesamiento al arma de fuego, que en su mayoría se hace de manera química con rodizonato de sodio y ácido acético, para identificar proyectiles y/o mezcla iniciadora, estos químicos se agotan en su mayoría durante el procesamiento y de haber algún sobrante se dispone en bidones para su posterior desecho, también hay papel filtro que queda impregnado con estas sustancias, y es desechado como un residuo sólido. En el laboratorio hay dos grifos con pocetas y dos desagües, en los cuales se hace el lavado de material y procesamiento de muestras, el agua residual generada tiene remanentes de los químicos que puedan quedarse impregnados en el material que se usa en el laboratorio, y el agua es dirigida a la Planta de Tratamiento de Agua Residual.

En esta sede, también hay un tanque de agua para recuperar proyectiles, sus dimensiones son de un metro de ancho, tres metros de largo y dos metros de alto, sin embargo, solo se llena el agua del tanque hasta una altura de 1,3 metros, por lo que la capacidad del tanque es de 3,9 m3 de agua, la cual en vez de ser descartada por un gestor externo podría ser recirculada con filtros que atrapen las trazas de plomo y así evitar el consumo de agua potable en el llenado de este tanque, además, de evitar la restricción de capacidad de remoción del plomo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio.

2.1.7 Organismo de inspección de Patología y Antropología - Bogotá

La contribución a la administración de justicia de estos organismos de inspección es realizar el análisis de los cadáveres (recientes o esqueletizados) por medio de la Anatomía Patológica, esto con el fin de establecer la causa, manera y circunstancias de la muerte y diferenciar de muertes naturales. Estos organismos en la necropsia medicolegal toman muestras de los cuerpos para apoyarse de otras ciencias o laboratorios presentes en el Instituto y así ratificar las causas de muerte, además, se preservan EMP con el fin de colaborar con información a las investigaciones judiciales en estrecha relación con los datos entregados por la administración de justicia.

En la sede Bogotá es en donde más se abordan casos para realización de necropsias y en su proceso se generan considerables cantidades de vertimientos con alta carga orgánica por la presencia de fluidos corporales, en promedio un perito puede tardar en este procedimiento dos horas y se puede gastar de 150 a 180 L de agua potable, es por esto, que en conclusión el agua residual no doméstica generada en esta área es la que mayor aporta en volumen al caudal que ingresa a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede.

En el área de recepción hay un grifo de agua para el lavado de manos, en la zona de trabajo del laboratorio de Balística hay una zona de lavado con su grifo en poceta y desagüe, para el área de Histotecnología hay dos cabinas para la toma y corte de muestras cada una con un grifo y un desagüe, a su alrededor hay dos sifones, un lavamanos con su desagüe y una ducha de emergencia con su sifón, hay en la sala de necropsias trece mesas cada una con su grifo y su desagüe, hay una ducha de emergencia y en toda el área hay distribuidas cuatro rejillas y once sifones para recolectar el agua residual que se genera en el lavado de la sala, allí mismo hay una poceta para lavado de manos de los peritos con dos grifos y un desagüe, en el pasillo donde se encuentra la recepción de cadáveres y las neveras hay nueve rejillas en el piso con doce sifones y al final de este pasillo se encuentra una poceta con grifo de agua y desagüe para el lavado de los implementos de aseo que son usados para la limpieza del área.

En la zona para el secado de prendas hay un sifón y en el área para almacenar las evidencias hay una poceta para lavado de manos con su grifo, desagüe y un sifón; en la sala de necropsias se encuentra una sala auxiliar de manejo de cadáveres especiales que llegan con altos índices de descomposición, y allí se encuentra una mesa con grifo y desagüe, un sifón en el área, una rejilla con sifón, una poceta para lavado de manos con su grifo y desagüe y una ducha de emergencia. En las zonas de descanso de los peritos hay dos baños, uno para mujeres y otro para hombres, en el de hombres hay dos sanitarios, tres orinales, tres lavamanos, dos duchas y dos sifones, en el de mujeres hay dos sanitarios, tres lavamanos, dos duchas y cuatro sifones. En el área común hay un comedor con un baño donde hay un sanitario y un lavamanos y en la cafetería hay una poceta con grifo y desagüe para el lavado de loza.

2.1.8 Organismo de inspección de Patología y Antropología - Villavicencio

Estos organismos de inspección prestan apoyo a la administración de justicia por medio del análisis antropológico a cadáveres o segmentos corporales en diferentes estados post mortem, por lo general son cadáveres esqueletizados o restos óseos sin líquidos o tejido, sin embargo, pueden llegar muestras con algunos remanentes de tejidos en descomposición, tierra, raíces o restos de suelo que se deben limpiar para realizar el procesamiento de la muestra en el área, esta limpieza por lo general se hace con jabón neutro y de manera manual. En el organismo de inspección hay un grifo en la mesa de necropsia, dos desagües, un sifón, un grifo con poceta y unas rejillas en el piso al lado del cuarto frío.

En la sala de necropsias hay una marmita que sirve para tratar los restos óseos con agua y cal, y así desprender más fácilmente los tejidos que puedan estar presentes y necesiten ser retirados, la capacidad aproximada de la marmita es de 80 L, por lo que se usa una cantidad considerable de agua en cada procedimiento y el agua residual generada es vertida a las rejillas que por las tuberías conducen a la Planta de Tratamiento de Agua Residual.

El organismo de inspección de Patología, se apoya en otras ciencias o laboratorios cuyos análisis permiten cumplir con los objetivos de una necropsia médico legal, los cuales son establecer la causa y la manera de muerte, realizar la identificación del cuerpo y preservar EMP con el fin de aportar información a las investigaciones judiciales que sean designadas al Instituto.

Las muestras son cuerpos que deja la administración de justicia para establecer causas de muerte e identificación de cadáveres, este procedimiento es uno de los que más consume agua potable en la sede y la generación de vertimientos es de alta carga orgánica por los fluidos corporales que segregan los cuerpos que se procesan, en promedio una necropsia puede durar unas dos horas aproximadamente y el consumo de agua es de unos 150 L por procedimiento, la generación de agua residual es entonces intermitente ya que siempre va a depender de los casos que se aborden en la sede.

Los químicos que se usan en la sala de necropsias es formol para preservar las muestras que son enviadas a otros laboratorios para análisis y procesamiento, el amonio para la limpieza de áreas con una adecuada dilución y alcohol que se usa en las huellas dactilares de cadáveres descompuestos.

En el área de la sala de necropsias hay dos baños uno para mujeres y otro para hombres, ambos cuentan con un inodoro, un lavamanos, un desagüe y un sifón. En la parte de recepción y entrega de cadáveres hay cuatro rejillas en el suelo y dos grifos de agua, hay una poceta con su desagüe para el lavado de los elementos de aseo, allí también hay un baño con un inodoro, un lavamanos, un desagüe y una ducha. En el área de procedimientos hay tres rejillas en el suelo, dos grifos de agua, seis mesas para realizar necropsias cada una con su grifo de agua y desagües. En las áreas de radiología, embalaje y almacenamiento de muestras cada una cuenta con un sifón, en donde se encuentra la marmita utilizada por Antropología hay una rejilla, una mesa para necropsia con su desagüe y grifo de agua y dos lavamanos con sus desagües para el lavado de huesos.

2.1.9 Laboratorio de Biología - Bogotá

El Laboratorio de Biología se ocupa del análisis de muestras biológicas recolectadas como EMP de posibles hechos delictivos. Sus análisis permiten aportar a la autoridad competente sobre la utilidad de solicitar estudio genético con el fin de identificar al individuo del cual procede el material biológico analizado, se procesan cualquier tipo de muestras con el fin de identificar sangre, espermatozoides, elementos pilosos y saliva humana. Las muestras que ingresan al laboratorio son entonces hisopos con material biológico y prendas.

Los casos que más se abordan en el laboratorio son para la determinación de espermatozoides cuando hay presunto abuso sexual, por lo que se usan colorantes, buffer tampón y agua destilada para lograr la tinción “árbol de navidad”, los desechos de los remanentes de estos colorantes se van acumulando en bidones para su posterior recolección con un gestor externo autorizado. El lavado de material reutilizable (frascos, canastas) es común en el laboratorio y se usa el jabón de alto espectro Alkacide®, el cual es biodegradable y no tiene repercusiones al ser vertido por los desagües, los remanentes que hayan quedado del procesamiento de colorantes “árbol de navidad” se recolectan en bidones para luego ser descartados, en el área de lavado de material hay dos grifos con pocetas y dos desagües.

2.1.10 Laboratorio de Biología - Villavicencio

En el laboratorio básicamente se analizan evidencias en búsqueda de fluidos biológicos como sangre, semen, saliva (EMP) y muestras sólidas como prendas o escobillones donde haya adherencia de los fluidos mencionados anteriormente.

La práctica que más se desarrolla también es la identificación de espermatozoides mediante la coloración de “árbol de navidad” en donde se usan dos colorantes y etanol, el procesamiento de la muestra consisten en colocarla en un cassette de inmunocromatográfica y allí se colocan los reactivos para identificar los espermatozoides. Los remanentes de la coloración se van almacenando en bidones para luego ser descartados con un gestor externo autorizado, en el área no se hace lavado de material

ya que todo es desechable y sale como residuo sólido peligroso. En el laboratorio hay un dispositivo de lavado de ojos de emergencia, dos sifones y tres grifos con pocetas con sus respectivos desagües.

2.1.11 Laboratorio de Estupefacientes - Bogotá

El laboratorio apoya a la administración de justicia en el análisis físico-químico de sustancias líquidas y sólidas y material vegetal sometidos a control por la Ley 30 de 1986 y sus normas complementarias y por el Ministerio de Salud y Protección Social a través de la Resolución No. 1478 de 2006 y sus normas complementarias. Se realiza entonces la identificación de sustancias que producen dependencia, identificación de sustancias precursoras para la obtención y procesamiento de estupefacientes, análisis y detección de medicamentos que se encuentran controlados por el Ministerio de la Protección Social, análisis químico de material vegetal del cual pueden extraer sustancias que producen dependencia (coca, cannabis o amapola) y cuantificación de cocaína y heroína en incautaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, las muestras que ingresan al laboratorio son material vegetal o químicos que pueden estar en contacto con fluidos corporales dependiendo del medio de transporte utilizado para ser camuflados, por lo que las superficies de las muestras son lavadas con hipoclorito y agua para su desinfección y posterior análisis.

Para el análisis y extracción de lo que se vaya a analizar se hacen pruebas preliminares con hidrocarburos y ácidos, los que no se logren consumir en el proceso van a bidones para su posterior descarte, muchas veces también se forman sales que son descartados como residuos químicos sólidos, en viales se maneja el material vegetal con acetona para extraer TCH (Tetrahidrocannabinol) por lo que queda un remanente sólido que se descarta como químico sólido, y en general, en los procesos de extracción se usan cantidades pequeñas de agua, y sus remanentes son almacenados en bidones como residuo líquido para ser tratado posteriormente con un gestor externo. Los químicos que pueden salir como trazas son la cocaína, hidrocarburos, anfetaminas, etanol, acetona, ácidos, hidróxido, solventes clorados, solventes acuosos y pruebas preliminares.

Es entonces en el lavado de material que por el desagüe se pueden ir trazas de los químicos mencionados anteriormente, ya que son los que quedan en las paredes del material de vidrio reutilizable, esta acción se hace diario en el laboratorio con jabón neutro Extran® y el agua residual generada se conduce hacia la Planta de Tratamiento de Agua Residual. Hay tres grifos en pocetas con su respectivo desagüe, un dispositivo para lavado de ojos de emergencia, una ducha y dos sifones.

2.1.12 Laboratorio de Toxicología- Bogotá

El Laboratorio apoya la administración de justicia con el análisis de sustancias tóxicas o potencialmente tóxicas en muestras biológicas y no biológicas, las cuales son recolectadas durante una necropsia o en un reconocimiento a personas vivas o en escena, estas sustancias están relacionadas con un evento que produjo una situación tóxica en el marco de la investigación, cuyos resultados apoyan a determinar la causa de muerte, establecer si existe estado de indefensión en casos de delitos sexuales, hurto o secuestro, establecer estados de embriaguez o factores de riesgo asociados en los casos de muertes accidentales y homicidios.

Siendo así las cosas, en este laboratorio se hace identificación de sustancias en muestras biológicas en su mayoría procedentes de seres vivos o cadáveres, las muestras pueden ser sangre, orina, semen o lo que se pueda recuperar, estos serían los EMP que ingresan al laboratorio para ser analizados.

El tratamiento en el laboratorio se hace con solventes en material no reutilizable y en el proceso se crean dos fases en el fondo se sedimentan las moléculas de muestra y en la parte superior se encuentran los solventes y soluciones de trabajo, una vez procesada y realizado el proceso de identificación los remanentes que pudieran quedar van al desagüe de la poceta del laboratorio, esta agua residual está compuesta entonces de agua, parte orgánica con solventes y solventes. Aproximadamente con el ingreso de cincuenta muestras se genera una solución acuosa de remanentes biológicos de diez litros.

En el laboratorio también ingresan muestras no biológicas como por ejemplo veneno (cianuro) y muestras de alcoholemia que deben ser identificadas en muestras no biológicas

que se manejan en viales, hay unos químicos que se generan de forma masiva como halogenados, no halogenados, ácidos y básicos y de los equipos que se utilizan en el laboratorio se generan desechos de mezclas compuestos por agua, acetonitrilo y metanol, los anteriores remanentes son almacenados en bidones para su posterior descarte. Otro procedimiento que se hace en el laboratorio es el lavado del material no desechable (material volumétrico y no volumétrico de vidrio y vasos de precipitado) con jabón neutro Extran® e hipoclorito. En el laboratorio hay tres grifos con sus respectivas pocetas y desagües, toda el agua residual generada y que es vertida al desagüe en las pocetas se transporta por medio de las tuberías hacia la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede.

2.1.13 Laboratorio de Evidencia Traza- Bogotá

El laboratorio apoya a la administración de justicia en el análisis de una amplia variedad de materiales, la mayoría son elementos que se encuentran presentes en una mínima cantidad, los cuales generalmente se encuentran adheridos a las prendas de vestir de la víctima o sospechoso y no se encuentran a la simple vista. Las muestras que pueden ingresar al laboratorio son: fibras, sogas, silicona, prendas, cascarones de pintura, residuos de incendio, residuos de disparo en mano y fragmentos de vidrio, en el laboratorio también se realiza la identificación de sustancias (mercurio, aceites, plomo, antimonio, bario) información que dentro de una investigación judicial puede aportar información para el esclarecimiento de los hechos.

Los análisis se basan en la comparación de las características físicas y químicas y pueden ayudar a relacionar a un individuo con una víctima o con la escena de un crimen. En los procesamientos de las muestras los análisis son químicos y se usan gran variedad de ácidos (ácido nítrico), solventes orgánicos, acetona, etanol, hexano, cloroformo, hidróxido de sodio y potasio, amonio, xilol, mercurio, los cuales de no consumirse en el procesamiento son vertidos en bidones para su posterior descarte. El lavado de material que no es desechable se hace con agua desionizada y jabón neutro Extran®, hay dos sifones con pocetas y dos desagües, hay un dispositivo para lavado de ojos de emergencia, una ducha de emergencia y un sifón, todas estas salidas de agua residual generada son conectadas a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede.

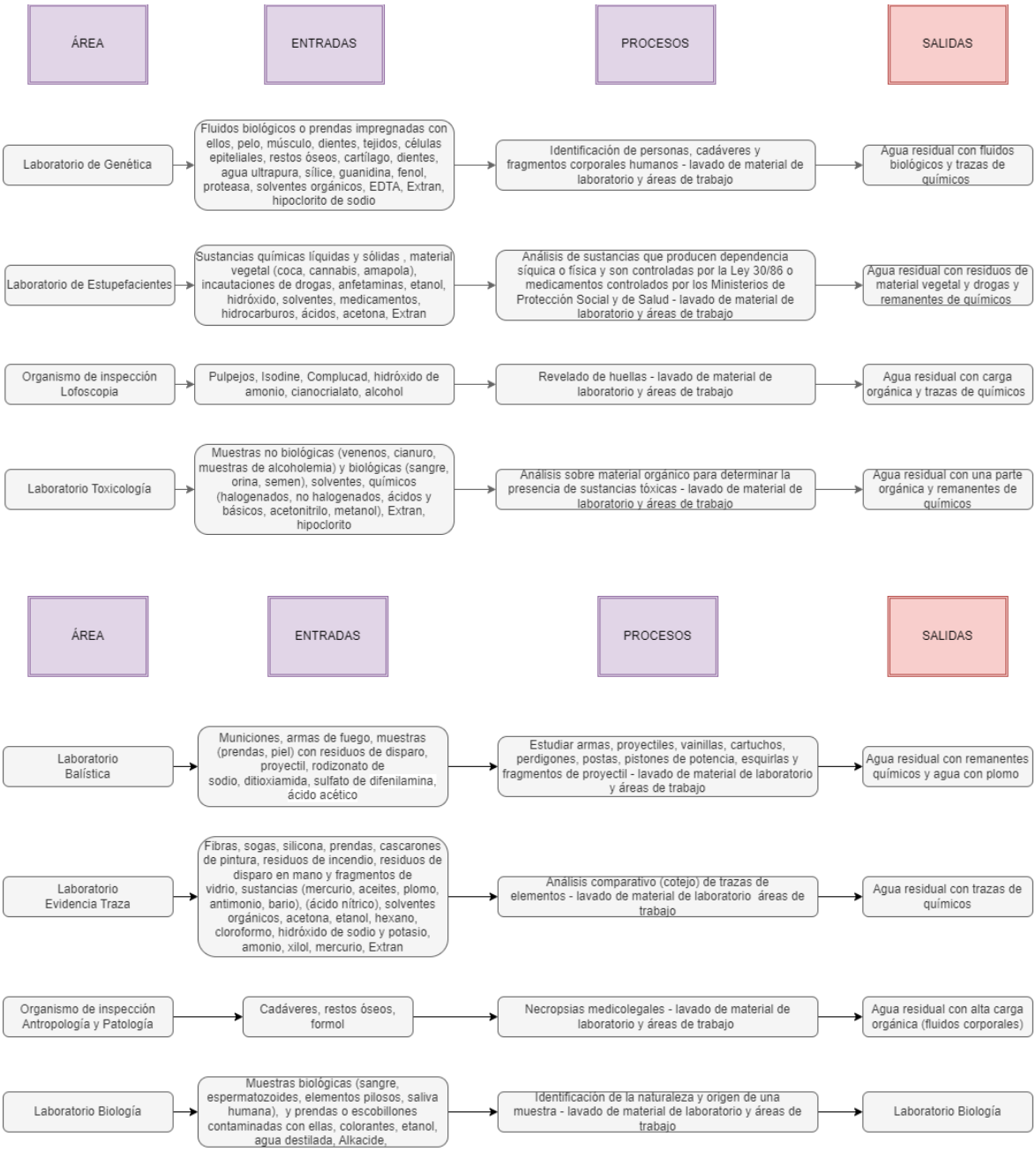
2.2 Diagramas de flujo de las actividades del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de las sedes Bogotá y Villavicencio

Luego de ser analizados los laboratorios y organismos de inspección de estudio en la sede Bogotá y Villavicencio, a continuación, se presenta en estilo de diagrama de flujo las entradas (agua potable) y salidas (vertimientos) del recurso agua con el fin de caracterizar los vertimientos generados en el Instituto y que pasan por las Plantas de Tratamiento de Agua Residual de ambas sedes.

Es importante resaltar, que todos los laboratorios trabajan con muestras biológicas y sustancias químicas para la realización de sus procedimientos forenses, estas sustancias químicas tienen un proceso de segregación, recolección interna, almacenamiento temporal, recolección externa, tratamiento y disposición final con gestores autorizados, por lo que los remanentes o trazas de residuos químicos que son vertidos hacia las Plantas de Tratamiento son del resultado del lavado de la vidriería y materiales usados en los laboratorios. Los vertimientos líquidos de los laboratorios y organismos de inspección, no es de manera continua ya que depende del número de casos dispuestos por la administración de justicia, la complejidad de los mismos y de los ensayos que se deban realizar.

En el caso del organismo de inspección de Patología y Antropología forense, la generación de vertimientos es más frecuente y son los procesos en donde más se aporta a la generación de agua residual con alta carga orgánica y que es tratada por las Plantas de Tratamiento, sin embargo, sigue siendo fluctuante dependiendo de los casos que lleguen para ser trabajados.

Figura 2-3. Diagrama de flujo con entradas y salidas del agua en los laboratorios y organismos de inspección de las sedes Bogotá y Villavicencio



3. Plantas de Tratamiento de Agua Residual de las sedes de Bogotá y Villavicencio

El Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (INMLCF) es una entidad pública que presta servicios forenses en Colombia para la comunidad, apoyando técnica y científicamente a la administración de justicia. Los procesos que se llevan a cabo para el funcionamiento del Instituto, interactúan directa e indirectamente con el medio ambiente y los resultados de esta interacción generan impactos ambientales adversos.

Para la prestación del servicio forense del Instituto, se tienen laboratorios en las disciplinas de Genética, Toxicología, Estupefacientes, Biología, Evidencia Traza, Balística, y Organismo de Inspección de Patología, Antropología, Lofoscopia, los cuales consumen agua potable en la ejecución de sus procedimientos, y pueden cambiar las características físicas y químicas del agua generando en conjunto un agua residual de tipo no doméstico con características infecciosas y tóxicas.

Es por esto, que el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses comprometido con proteger el medio ambiente, prevenir la contaminación, y controlar sus impactos ambientales significativos derivados de sus procesos, realiza controles administrativos y controles de ingeniería, los cuales fortalecen el desempeño ambiental, con el fin de aportar al proceso de mejora continua del Instituto. Algunas de las actividades de tipo administrativo son la gestión de buenas prácticas de los servidores públicos en el ahorro y uso eficiente del agua y la segregación adecuada de los residuos químicos para que no sean vertidos a los desagües que conducen a las Plantas de Tratamiento de Agua Residual, ya los controles de ingeniería son los sistemas de tratamiento de agua residual que se han diseñado y construido para la reducción de las cargas contaminantes de las aguas residuales generadas, esto con el fin de dar cumplimiento a los requerimientos

normativos que se exigen en Colombia, además, por el compromiso del Instituto a la reducción de sus impactos ambientales negativos como lo es la contaminación del recurso hídrico.

3.1 Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá

Para el tratamiento de los vertimientos generados en la sede Bogotá se tiene en funcionamiento desde el año 2007 una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) hasta nivel de tratamiento terciario, la ubicación de la misma es en el patio de maniobras del Instituto (ubicación señalada en rectángulo rojo de la figura 2-1) y contigua a la sala de necropsias, la cual es el área donde se generan la mayor cantidad de volumen de agua residual no doméstica, sin embargo, la sede no contaba con otro espacio suficiente para la localización de la PTAR y se encuentra muy cerca del área de atención de usuarios en clínica forense, lo cual genera malestar por los malos olores que se pueden generar eventualmente por el normal funcionamiento de la PTAR, para lo cual se hacen correctivos inmediatos en el mantenimiento rutinario de la PTAR con apoyo de suministro de microorganismos facultativos que aportan al tratamiento biológico y retrolavados en los filtros de carbón activado, con el fin de controlar este aspecto ambiental. El tratamiento en la PTAR es aerobio con uso de lodos activados en aireación extendida, los cuales se caracterizan por un tiempo de retención más largos para descomponer la materia orgánica presente en el agua residual. El sistema en general cuenta con las siguientes unidades de proceso:

1. Caja de entrada: En esta zona se agrupan tres fuentes de recepción de agua residual, provenientes de la sala de necropsias, laboratorios y organismos de inspección.
2. Rejilla de cribado: Compuesta por tres canastillas de desbaste de retiro para limpieza manual con el fin de realizar el cribado de material grueso, se retienen residuos mayores a ½”.
3. Trampa de grasas: Está construida en concreto con entrada y salida antisifonante mediante uso de tee sanitaria de 4”. Las tapas de la trampa están fabricadas en lámina de alfajor y recubiertas con pintura anticorrosiva tipo epóxica.

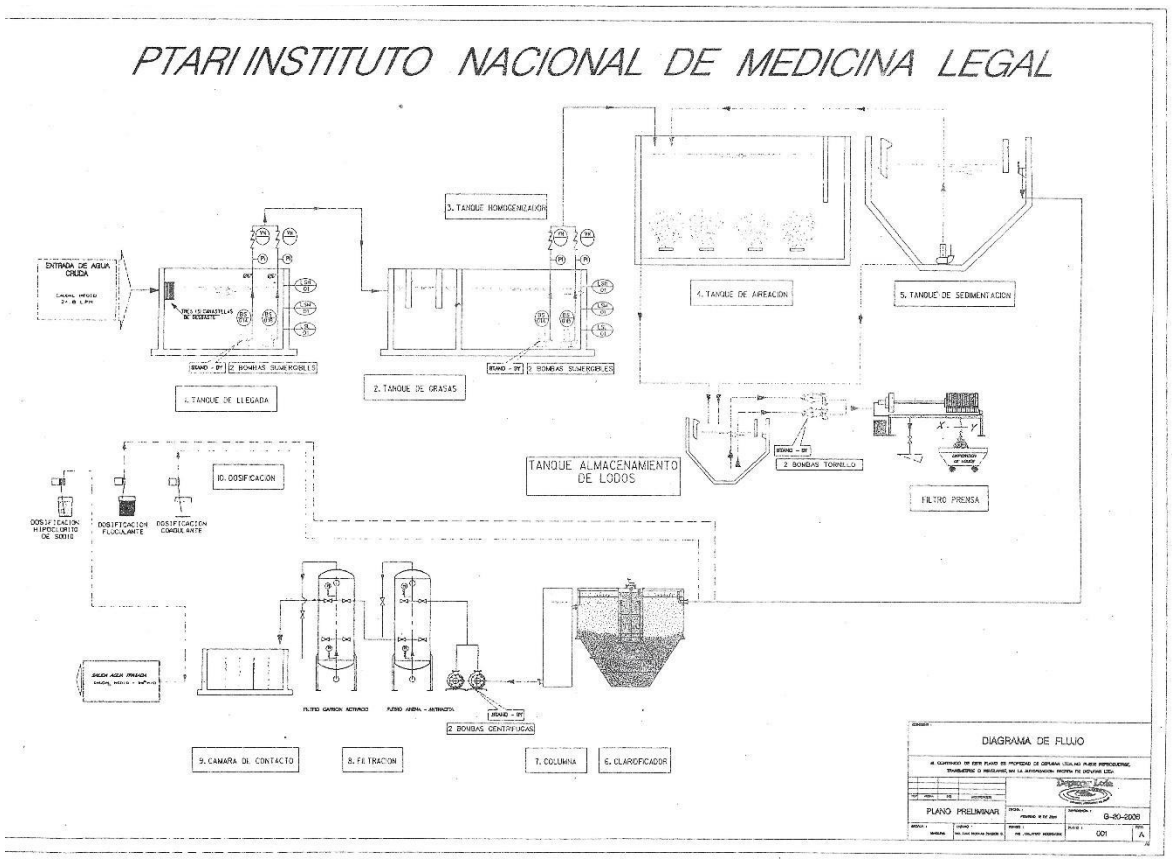
4. Tanque de homogenización y de bombeo: Es la estructura que tiene como función acumular el agua residual para homogenizar las características y permitir el bombeo a caudal constante en la PTAR.
5. Reactor de aireación: Tiene forma rectangular y está construido en plancha de acero. Los sistemas de inyección de aire son con tecnología de sopladores regenerativos que los hace menos ruidosos. El aire se lleva por tuberías a los cuatro difusores inatascables y debidamente repartidos a lo largo del reactor.
6. Sedimentador: Adosado al reactor de aireación y construido igualmente en plancha de acero, este recibe las aguas aireadas en una canaleta que se conecta a la zona de desnate separada por un bafle que obliga a que el efluente baje y circule nuevamente de abajo hacia arriba, permitiendo que los lodos se queden en la zona inferior donde se almacenan para su recirculación y purga. Los lodos deben recircularse a la cabeza de tratamiento, pues contienen microorganismos aclimatados al sistema y dan más rendimiento que los nuevos que se van creando. La recirculación se realiza por medio de "bombas airlift"[6] utilizando aire inyectado desde el mismo soplador de aireación. El agua clarificada se recoge por medio de una canaleta en la zona superior del sedimentador y son llevadas desde allí hasta el sistema de clarificación y tratamiento terciario. Para la purga de lodos se utilizan las mismas bombas “airlift”, abriendo la válvula que va al tanque espesador, de donde se envían al sistema de deshidratación de lodos.
7. Clarifloculador: Es un proceso que hace parte del tratamiento terciario. En esta estructura se logra la formación del floc (conglomerado de partículas sólidas) utilizando químicos (coagulante y floculante) que desestabilizan las partículas y permiten su aglutinamiento para que sean fácilmente retenidas en los filtros.
8. Tanque de compensación: Es un tanque cilíndrico de posición vertical que permite la acumulación de agua para poder bombear a los filtros y mantener controlada la succión.
9. Filtración: En esta unidad se hace el proceso físico en el cual se retienen las partículas en un lecho filtrante combinado de granito (granulometría de 0.45 a 0.65 mm), arena

[6] Las bombas Airlift o ALS son dispositivos simples que funcionan con base a aire comprimido o gas y por flotabilidad levantan el líquido que se requiere bombear (Carmona, 2021).

sílice (granulometría de 0.45 a 0.65 mm) y carbón activado (granulometría aproximada de 2 mm), logrando así el pulimento y mejor calidad del vertimiento.

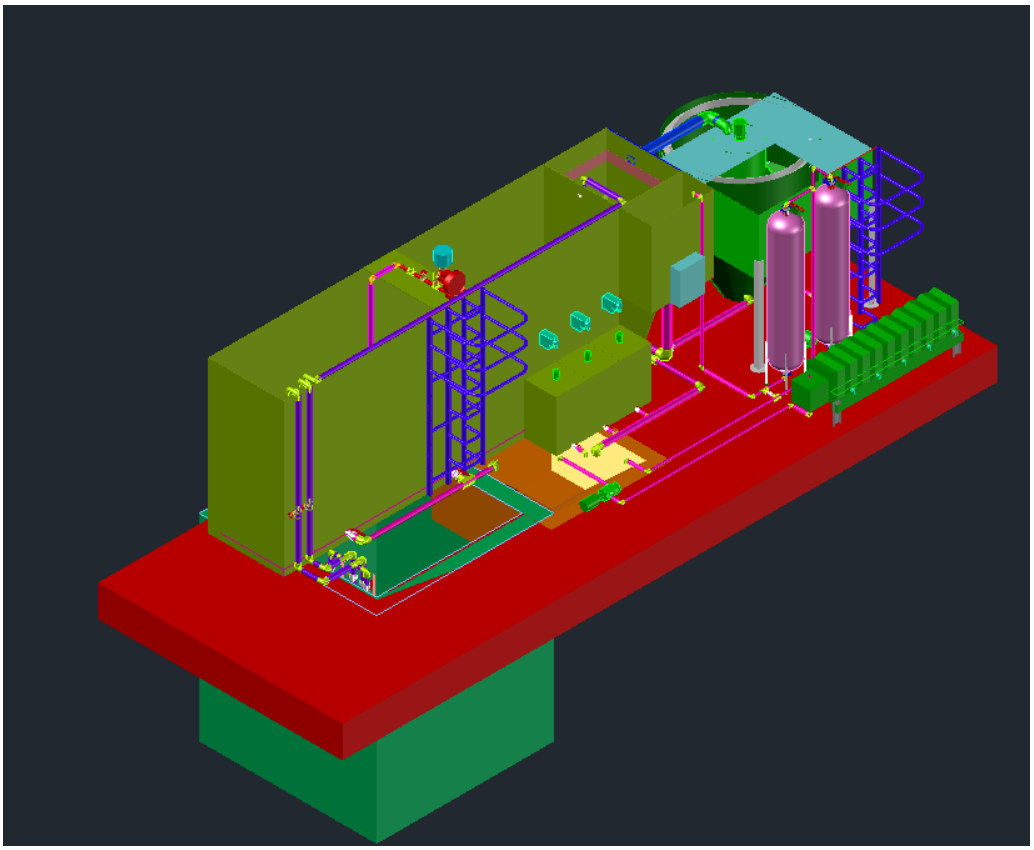
10. Desinfección: La desinfección se realiza mediante la aplicación de cloro granulado en solución, utilizando una bomba de diafragma. La solución se debe aplicar a la entrada del tanque de contacto construido radialmente dentro del reactor y con capacidad mínima de retención de quince minutos, suficiente para permitir una buena inactivación de los microorganismos.
11. Deshidratación de lodos: Se realiza por medio mecánico utilizando un filtro prensa manual. El filtro prensa es alimentado por una bomba de diafragma y desde el pozo de acumulación de lodos. Las aguas filtradas retornan al pozo de bombeo y vuelven a iniciar el ciclo.

Figura 3-1. Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá



Fuente: Depurar Ltda.

Figura 3-2. Vista 3D de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Bogotá



Fuente: Depurar Ltda.

El agua residual generada de manera intermitente, pasa en primera instancia por las rejillas donde se retienen los sólidos o materiales de gran tamaño (mayores a ½") que puedan interferir con el tratamiento o con los componentes de la PTAR, luego pasa a la trampa de grasas donde por un proceso físico, las grasas flotan y son retenidas en la superficie. El agua continúa al pozo de equilibrio y bombeo, en donde se controlan los caudales pico y se espera a que la PTAR tenga un ingreso de caudal constante por medio de dos bombas sumergibles que se alternan automáticamente para pasar el agua a la parte superior del reactor de aireación.

Las bombas están comandadas desde el tablero central, de modo que la bomba sumergible 1 trabaja de las 12:00 horas a las 23:59 horas y la bomba sumergible 2 trabaja

desde las 00:00 horas a las 11:59 horas. En el evento en que el caudal aumente hasta llegar al pico y una sola bomba no sea suficiente para evacuar el pozo, la bomba en reposo inicia a trabajar para drenar el pozo y en ese momento quedará nuevamente en su estado inicial. Los sensores de nivel son los encargados de enviar las señales necesarias para encender las bombas, se debe tener en cuenta que en el tablero de control la válvula de control (1) debe estar abierta, para permitir el flujo al reactor.

Una vez alcanzado el reactor de aireación, las aguas entran a la parte superior y circulan en forma horizontal, a su vez, el aire se inyecta en la parte baja del reactor para permitir la respiración de los microorganismos aerobios y se reircula hacia arriba, generando una acción de frote y mezcla completa en esta unidad, permitiendo así que los microorganismos tengan el mayor contacto posible con el agua a tratar. Se deben mantener aquí las condiciones de oxígeno disuelto (concentraciones entre 1 a 2 mg/L) necesarias para un buen tratamiento. El agua residual permanece en el reactor durante un periodo de retención aproximado de quince horas y pasa al sedimentador por la parte superior y mediante la conexión se obliga a circular hacia abajo para después subir a una velocidad determinada para que los sólidos de mayor tamaño se sedimenten y sean recirculados utilizando una bomba “airlift al tanque de aireación, cuando se ha alcanzado una concentración adecuada de microorganismos, deben purgarse los lodos generados en el sistema periódicamente.

Luego el agua pasa a la tolva de clarificación, en la que se dosifican los químicos (coagulante y floculante) y pasa a un compartimiento donde hidráulicamente se facilita la formación del floc, seguido de esto el agua se acumula en un tanque de equilibrio, en el cual una bomba succiona para impulsar el agua a través del sistema de filtración en donde se retienen los sólidos suspendidos que han logrado sobrepasar el tratamiento secundario. A la salida de los filtros se inyecta cloro en solución para lograr la desinfección y finalmente sale del sistema al alcantarillado público el agua residual tratada. Es importante mencionar que la PTAR cuenta con un tablero de control central para el manejo de los equipos electromecánicos.

La PTAR se opera en cierta forma de manera automática, sin embargo, requiere de la atención del operario de la PTAR para realizar la supervisión del buen funcionamiento de

los equipos electromecánicos y mantenimiento del sistema como revisar la concentración adecuada de químicos (coagulante, floculante y desinfectante), para lo cual debe mantenerse el pH y la temperatura del agua, además, como ayudante al proceso se aplican en los tanques de la PTAR microorganismos facultativos para ayudar a la degradación de la materia orgánica, otro aspecto importante es que en los procesos de limpieza de las áreas que confluyen a la planta no deben ser vertidos desinfectantes como hipoclorito al sistema de drenaje que conduce a la PTAR, dado que este tipo de químicos puede degradar los microorganismos presentes en el sistema y que son parte fundamental del tratamiento biológico.

El objetivo principal del tratamiento de este tipo de agua residual consiste en degradar la materia orgánica presente en el agua como proteínas, carbohidratos, grasas, etc, a compuestos más simples como CO_2, H_2O, NH_3, gases, N, P, etc. Este proceso de descomposición de la materia orgánica, asegura un tratamiento prácticamente libre de olores y se logra a través de la descomposición que realizan los microorganismos para alimentarse y desarrollarse.

3.2 Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio

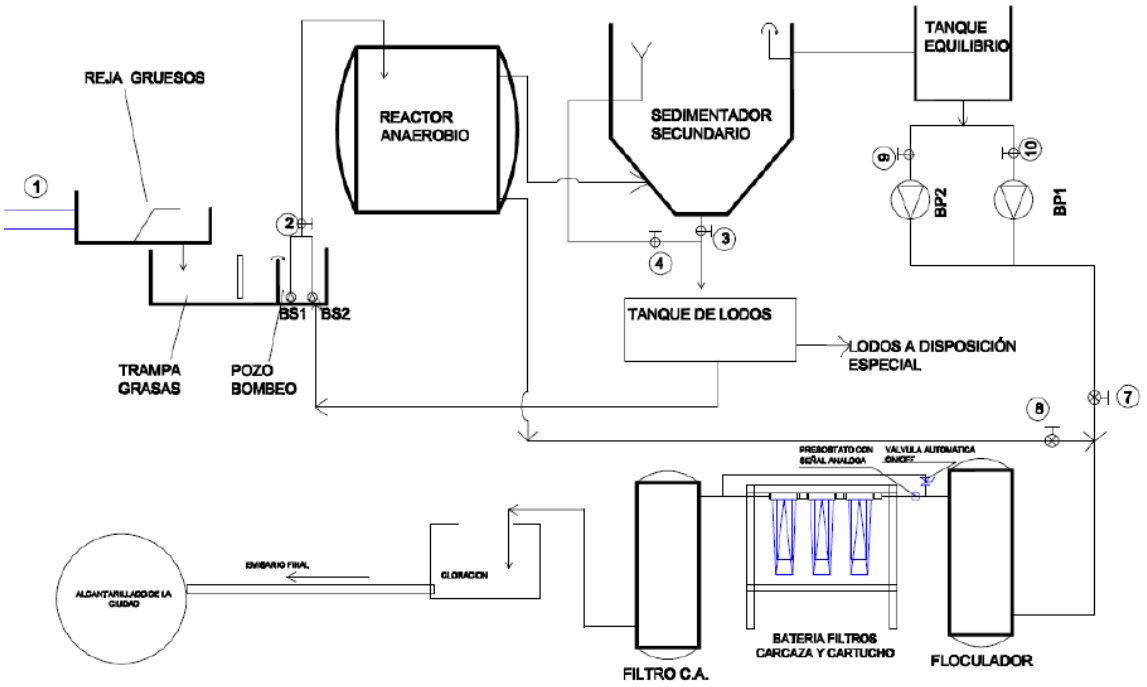
El tratamiento de los vertimientos generados en la sede Villavicencio se hace mediante una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) hasta nivel de tratamiento terciario, la cual fue puesta en funcionamiento desde el año 2015, la ubicación de la misma es en un área al aire libre del Instituto (ubicación señalada en rectángulo rojo de la figura 2-2) y contigua a la sala de necropsias, la cual es el área donde se generan la mayor cantidad de volumen de agua residual no doméstica, dado que el tratamiento de la PTAR es anaerobio la generación de malos olores no es perceptible por los servidores públicos del Instituto, usurarios o comunidad aledaña; los gases generados en el tratamiento son conducidos por una chimenea que está a una altura adecuada y así se controla este aspecto ambiental. El tratamiento en la PTAR es a través de un reactor anaerobio de flujo pistón, el tratamiento entonces se realiza en ausencia de oxígeno disuelto, no requiriendo

la inyección de aire y por lo tanto con menos consumo de energía. Adicionalmente, la producción de lodos es menor, sin embargo, los procesos anaerobios son más susceptibles a cambios repentinos de las condiciones fisicoquímicas. El sistema en general cuenta con las siguientes unidades de proceso:

1. Pozo colector: Unidad que recolecta las aguas residuales generadas en la sede.
2. Canaleta de cribado: En esta unidad se hace la retención de sólidos de gran tamaño, por una rejilla con un orificio máximo de 5/8” y de retiro manual.
3. Trampa de grasas: Caja donde se hace la separación física de las grasas flotantes y se deja pasar el agua residual a la siguiente unidad.
4. Tanque de homogenización y de bombeo a reactor: Es la estructura en donde se acumula el agua residual para homogenizar las características de las mismas y permitir el bombeo a caudal constante al reactor de la PTAR.
5. Reactor anaeróbico: Planta de tratamiento tipo compacta en la modalidad de reactor anaerobio de flujo pistón, fabricada en plancha de acero al carbón, tiene cámaras secuenciales con soporte para microorganismos tipo rosetón fabricado en poliestireno, el sistema cuenta con conexiones de entrada, salida y purgas.
6. Chimenea: Sistema de evacuación de gases del reactor anaerobio, compuesto por una chimenea de diámetro de 6” y altura de 6 m, fabricada en lámina de acero inoxidable y con filtros de gases para remover olores.
7. Floculador: Tanque donde se dosifican los químicos (coagulantes y floculante), de flujo confinado ascensional en medio plástico, construido en fibra de vidrio, con diámetro de 24” y altura de 1.2 m, tiene accesorios de interconexión y válvulas.
8. Sedimentador: Unidad adosada al reactor anaerobio en donde se forma el floc.
9. Filtración: Sistema de filtración compuesto por granito (granulometría de 0.45 a 0.65 mm), arena sílice (granulometría de 0.45 a 0.65 mm) y carbón activado.
10. Microfiltración: Compuesto por cartuchos lavables y reemplazables, de dos baterías con tres filtros en paralelo. Los cartuchos son 2 en polipropileno fibrilado de 100 micrones, 2 en polipropileno de 50 micrones y 2 en polipropileno de 20 micrones.
11. Sistema de dosificación de desinfectante: Compuesto por una bomba de diafragma de trabajo pesado con su respectivo tanque de preparación de solución de 125 L y tanque de contacto de 250 L en plástico.

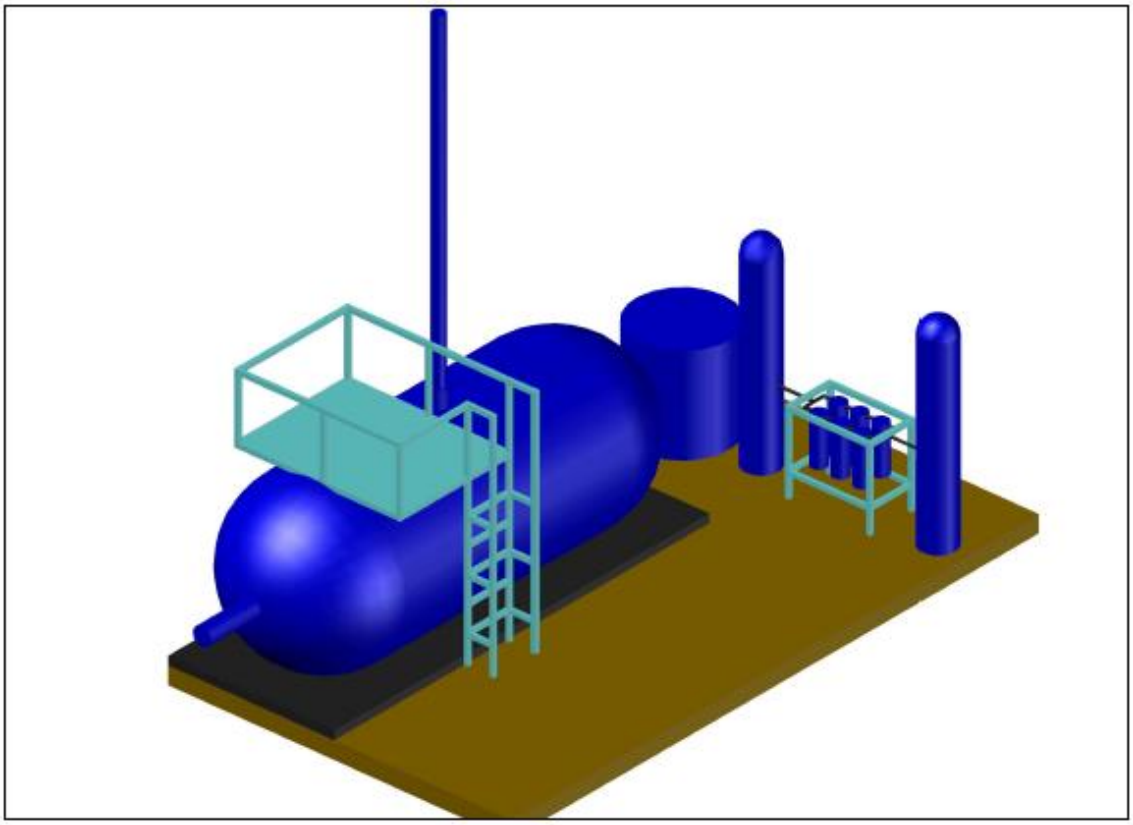
12. Tanque colector de lodos: Unidad en donde se recolectan los lodos generados en el reactor y el sedimentador.

Figura 3-3. Diagrama de flujo de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio



Fuente: Rafael Enrique Fonseca Cardona Ingeniería (REFCI)

Figura 3-4. Vista 3D de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la sede Villavicencio



Fuente: Rafael Enrique Fonseca Cardona Ingeniería (REFCI)

El agua residual llega a la caja de entrada y debe atravesar la rejilla de material grueso donde se retienen residuos mayores a 5/8”, se incluye aquí también un vertedero triangular para aforar el caudal y luego el agua es conducida a la trampa de grasas donde las grasas flotan y son retenidas en la superficie. El agua continúa al pozo de equilibrio y bombeo, PARA controlar los caudales pico mientras la PTAR mantiene un caudal constante por medio de dos bombas sumergibles que se alternan automáticamente.

Una vez alcanzado el reactor anaerobio el agua permanecerá allí durante un periodo de tiempo promedio de 12 horas, en el reactor las aguas entran a la parte inferior y circulan a través de las cámaras, las cuales se encuentran provistas de elementos plásticos de soporte de los microorganismos, permitiendo así que éstos tengan el mayor contacto posible con el agua a tratar, en esta área es importante mantener las condiciones de pH necesarias para un buen tratamiento. Los microorganismos degradan los compuestos

orgánicos produciendo dióxido de carbono y metanos luego estos son conducidos por medio de una chimenea instalada para su extracción.

El agua pasa luego al sedimentador por la parte inferior y se obliga a circular hacia arriba a una velocidad determinada para que los sólidos de mayor tamaño se sedimenten. El agua clarificada se recoge en la canaleta y es llevada al tanque de equilibrio de 1000 L. De allí, las bombas de proceso impulsan el agua residual a través del floculador de tipo confinado previa dosificación del coagulante. Una vez formados los flóculos resulta fácil retenerlos en el sistema de filtros compuesto por filtros de carcaza y cartucho, en donde se retienen los sólidos suspendidos que han logrado sobrepasar el tratamiento secundario. También hay filtración de carbón activado por medio de cartuchos, ya cuando se finaliza el proceso de filtrado se adiciona por medio de una bomba dosificadora de diafragma el desinfectante (cloro en solución) con capacidad mínima de retención de 15 minutos y en proporciones adecuadas para inactivar los microorganismos, finalmente el agua residual tratada sale al alcantarillado público.

A pesar de que los sistemas anaerobios tienen la ventaja de generar menor cantidad de lodos que los sistemas aerobios, con el tiempo la masa microbial crece y se acumula, y dado que es necesario mantener un equilibrio entre alimento y microrganismos, estos lodos de exceso deben ser purgados periódicamente del sistema (reactor y sedimentador), por lo que deben ser drenados en cantidad de 1 m^3/semana al tanque de lodos y de allí por medio de un carro tipo vactor o de manera manual deben ser retirados aproximadamente una vez al mes y dispuestos como residuos peligroso con un gestor externo autorizado. Esto aligera la operación y minimiza los impactos por olores.

3.3 Comparación de las caracterizaciones de la PTAR de Bogotá y de Villavicencio

Los informes con las caracterizaciones de vertimientos del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses son realizados por contratistas o laboratorios acreditados por el IDEAM, con el fin de hacer el análisis del cumplimiento de la normatividad ambiental

actual colombiana con respecto a la descarga de agua residual no doméstica al alcantarillado público. La normatividad específica para este aspecto ambiental es la Resolución 631 de 2015 mediante la cual se establecen los límites máximos permisibles de vertimiento a aguas superficiales o al alcantarillado público de ciertos parámetros fisicoquímicos dependiendo de la actividad que los genere.

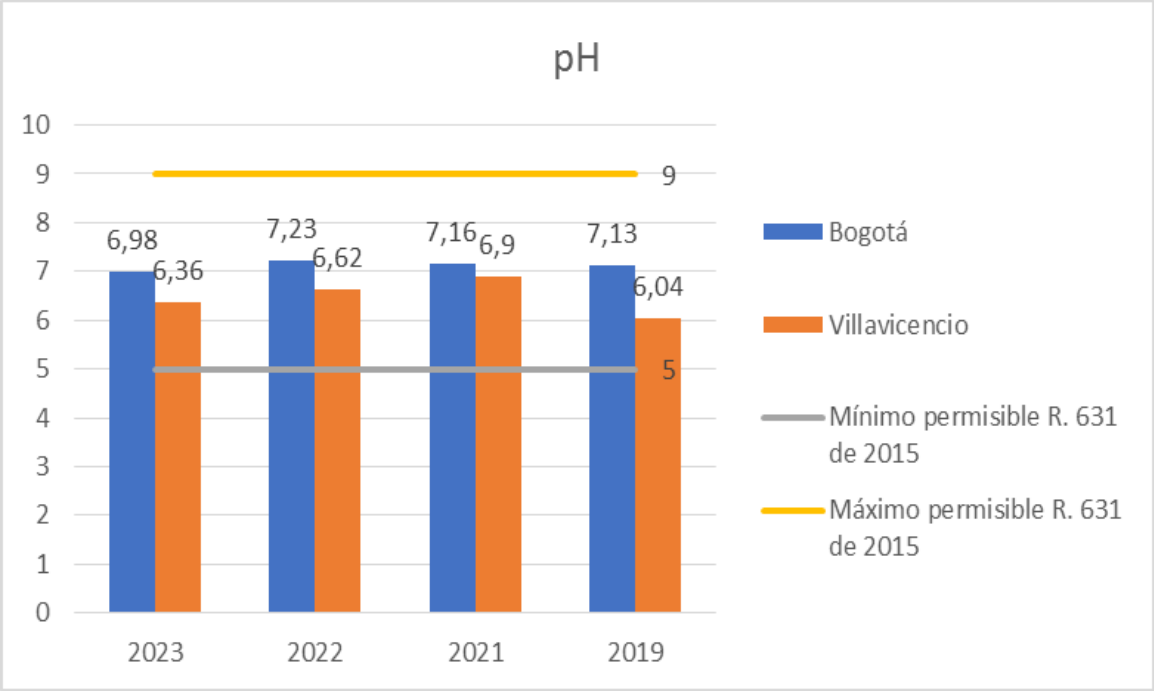
Los monitoreos siguen los lineamientos de la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos - U.S EPA en su Handbook for Analytical Quality Control in Water and Wastewater Laboratories, y por la Asociación Americana de Trabajos del Agua - AWWA- en el American Standard Methods for Examination of Water and Wastewater Edición 23, además de la norma técnica Colombiana NTC-ISO 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorio de Ensayo y Calibración”.

A continuación, se presenta una comparación y evaluación de cumplimiento de la normatividad en términos cualitativos y cuantitativos de los resultados obtenidos de las caracterizaciones realizadas en los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023 al vertimiento tratado de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual de las sedes de Bogotá y Villavicencio.

- pH

El pH es una unidad de medida que determina el grado de acidez o alcalinidad, y se mide en una escala que va de 0 a 14 unidades de pH. Una solución ácida tiende a tener una concentración alta de hidrogeniones (H +), mientras que una solución básica tiende a tener una concentración baja de H +.

Figura 3-5. Comparación de comportamiento del pH en la sede Bogotá y Villavicencio

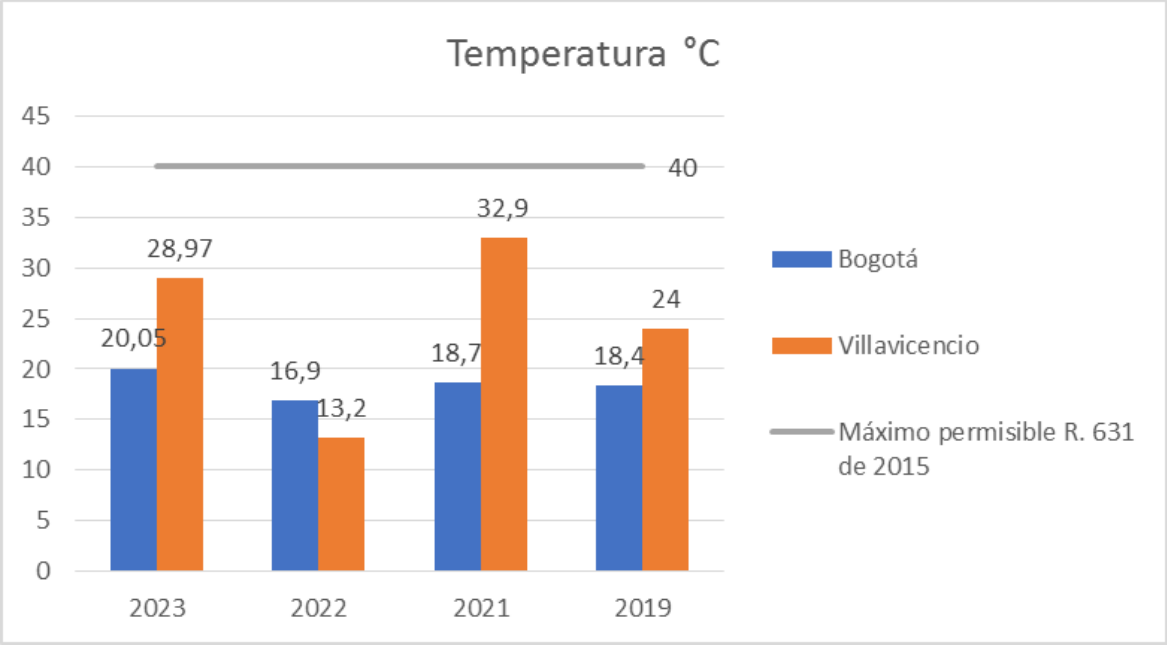


De acuerdo con lo anterior, se evidencia que los valores de pH en las muestras de agua residual no doméstica presentan un rango de características en su mayoría neutras y desde el punto de vista normativo se evidencia que los valores de pH se encuentran en el rango de cumplimiento respecto al artículo 14 y 16 de la Resolución 631 de 2015.

- Temperatura

La medición de la temperatura es muy importante debido a que puede interferir en la vida acuática, en las reacciones químicas, velocidades de reacción y en los usos del agua.

Figura 3-6. Comparación de comportamiento de la temperatura en la sede Bogotá y Villavicencio

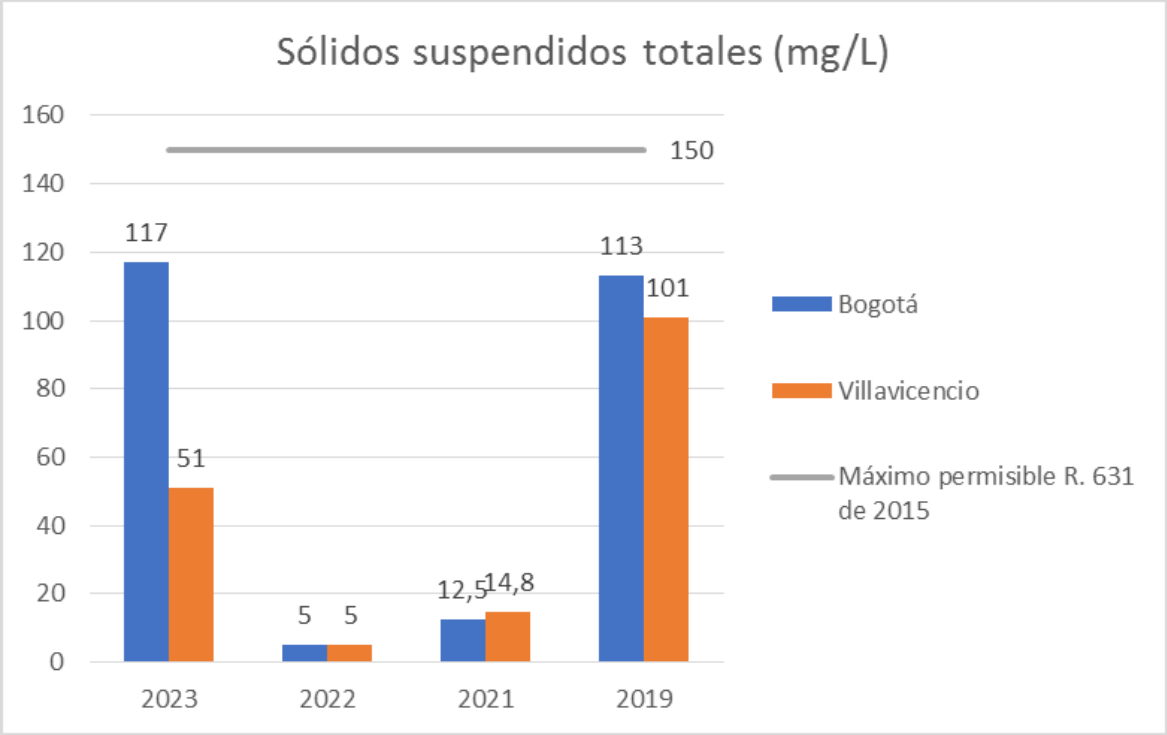


La temperatura para ambas sedes en sus históricos ha reportado valores que se encuentran acordes a las condiciones del lugar y hora de la toma de muestra, evidenciando además el cumplimento con lo estipulado por el artículo 5 de la Resolución 631 de 2015 (40 °C).

- Sólidos Suspendidos Totales (SST)

El agua disuelve gran variedad de sustancias, las cuales dependiendo de su naturaleza le confieren diferentes características. Los sólidos en el agua se pueden diferenciar en sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, siendo los sólidos totales la suma de todos ellos. Los SST están estrechamente relacionados con el contenido de materia orgánica e inorgánica presente en el agua y constituyen el material soluble y coloidal presente en la misma.

Figura 3-7. Comparación de comportamiento de los sólidos suspendidos totales en la sede Bogotá y Villavicencio



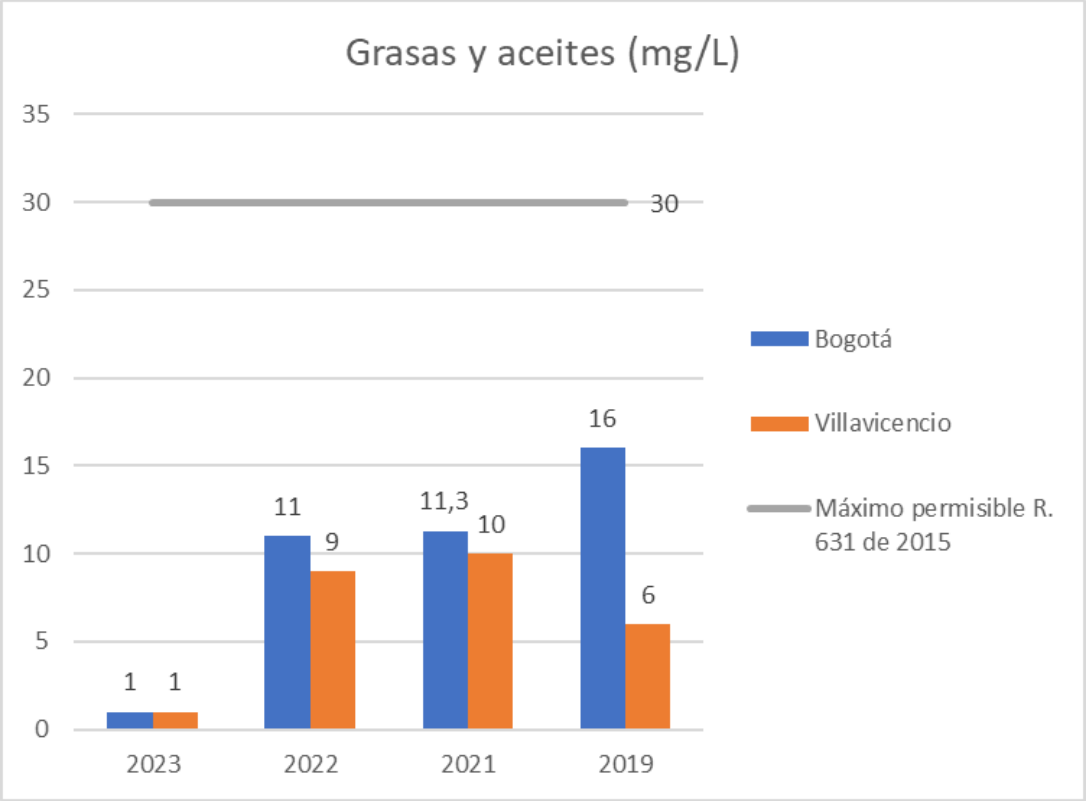
Los sólidos suspendidos totales, por su naturaleza tienen una composición muy heterogénea y suelen correlacionarse con algunos parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), turbidez y algunos metales; los Sólidos Suspendidos Totales (SST) en ambas sedes registran concentraciones inferiores al límite normativo establecido en el artículo 14 y 16 de la Resolución 631 de 2015 (150,00 mg/L).

- Grasas y Aceites

Las descargas de aceites, grasas y detergentes que flotan en el agua, dan a las corrientes superficiales un aspecto visual no agradable y de contaminación. Las grasas, aceites y demás material ligero se acumulan en la superficie, donde forman una capa flotante de espuma o natas en la parte superior. Es de gran importancia conocer la cantidad de aceite y grasa presente en un agua residual, para establecer el diseño y el funcionamiento adecuado de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

En la determinación de aceites y grasas no se está cuantificando una cantidad absoluta de una sustancia específica, sino que se determinan grupos de sustancias con características físicas similares.

Figura 3-8. Comparación de comportamiento de las grasas y aceites en la sede Bogotá y Villavicencio



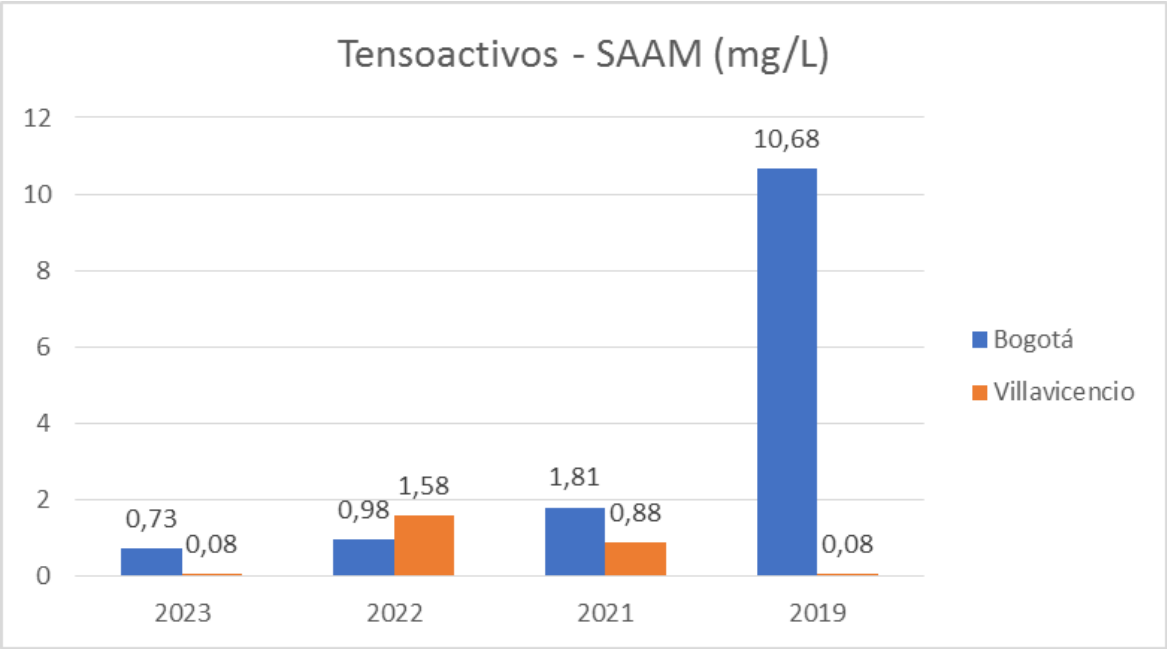
El parámetro de Grasas y Aceites en los puntos de monitoreo registraron para todas las sedes analizadas concentraciones inferiores al límite máximo establecido en el artículo 14 y 16 de la Resolución 631 de 2015 (30,00 mg/L).

- Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

Los surfactantes o tensoactivos pueden ingresar a las aguas residuales principalmente por la descarga de residuos acuosos de operaciones de limpieza doméstica e industrial de áreas. Un tensoactivo se encuentra conformado por un grupo muy hidrófobo y uno muy hidrófilo, dichas moléculas tienden a agregarse en las interfaces entre el medio acuoso y

en las otras fases del sistema, como lo son el aire, líquidos oleosos y partículas, lo que genera formación de espuma, emulsificación y suspensión de partículas.

Figura 3-9. Comparación de comportamiento de los tensoactivos en la sede Bogotá y Villavicencio



A pesar de que este parámetro no tiene valor de límite máximo permisible en la Resolución 631 de 2015, solo se pide análisis y reporte, se puede evidenciar que los valores son bajos, exceptuando que en el año 2019 el valor para la sede de Bogotá tuvo un valor fuera del promedio, por lo que se tuvieron que hacer los correctivos respectivos en buenas prácticas para el manejo de detergentes con composición biodegradable en un 90 %, esta situación tuvo mejores resultados en los años siguientes.

- Fósforo Total y Ortofosfatos

El fósforo es un nutriente esencial para los organismos vivos. En el agua dulce y marina el fósforo se encuentra sujeto a procesos de transformación continua que incluyen consumo o desprendimiento en sus diferentes formas, sin embargo, es considerado como un

parámetro crítico en la calidad del agua debido a su influencia en el proceso de eutrofización.

Las especies de fósforo más comunes en aguas naturales incluyen compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos o suspendidos. Los compuestos inorgánicos incluyen ortofosfatos, polímeros lineales o polifosfatos y polímeros cíclicos o metafosfatos; y los compuestos orgánicos comprenden ésteres, fosfonatos, ácidos nucleicos, fosfolípidos, azúcares, proteínas, ácido aminofosfórico, fosfoamidas y otros. Entre las fuentes de fósforo de origen natural cabe mencionar los depósitos de roca fosfórica las cuales desprenden fósforo, en forma de ortofosfatos principalmente mediante erosión y de las aguas residuales de origen urbano por detergentes.

Figura 3-10. Comparación de comportamiento del fósforo total en la sede Bogotá y Villavicencio

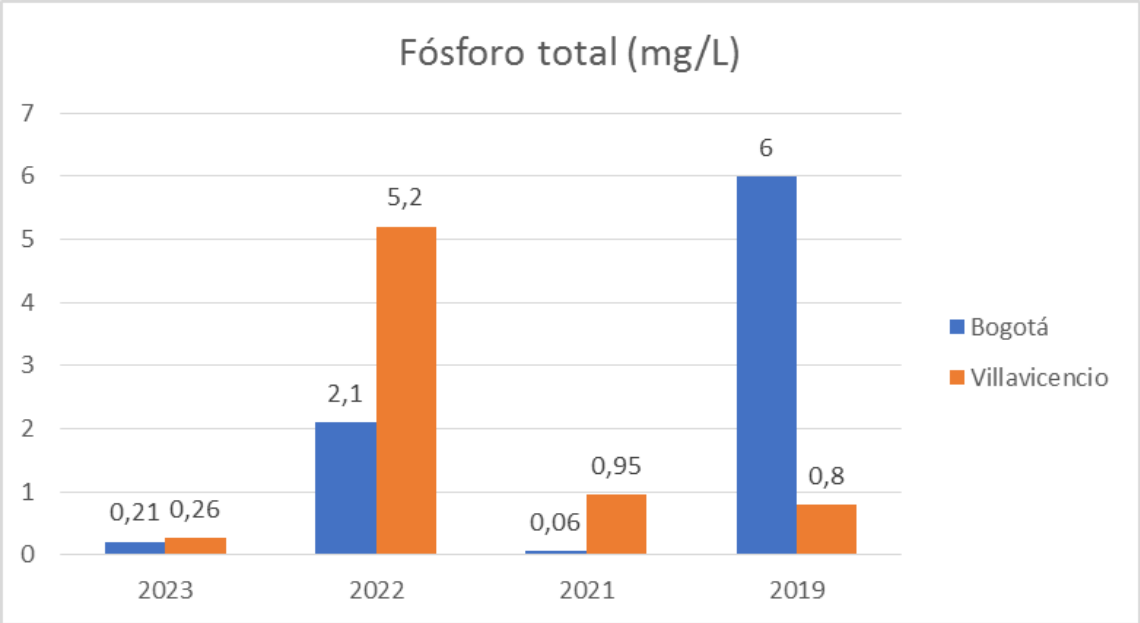
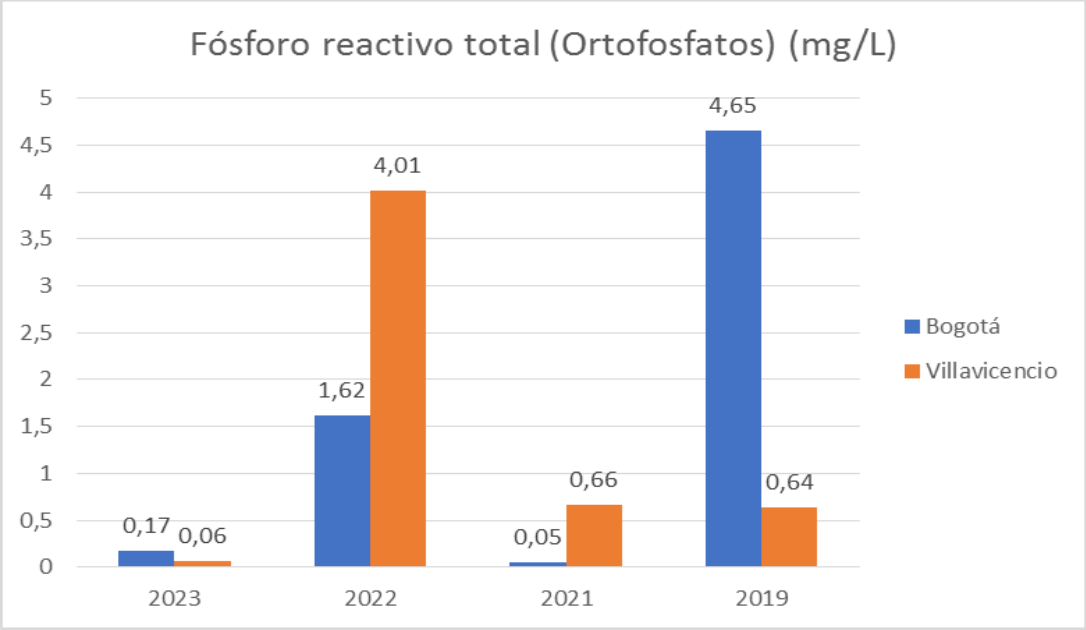


Figura 3-11. Comparación de comportamiento del fósforo reactivo en la sede Bogotá y Villavicencio



Para ambos parámetros en las sedes de estudio las concentraciones del año 2023 han disminuido del promedio de años anteriores, sin embargo, en la Resolución 631 de 2015 no hay un límite máximo permisible para su descarga, por lo que solo se hace el análisis y reporte.

- Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total y Nitratos

En la química del agua, los compuestos del nitrógeno, NH_4+, NO_2, NO_3 y nitrógeno orgánico, representan un papel muy importante puesto que son los verdaderamente responsables del crecimiento de los organismos animales y vegetales en el medio acuático. En condiciones normales, los compuestos nitrogenados del agua provienen fundamentalmente de la degradación de la materia orgánica muerta, que a su vez ha sido absorbida de la atmósfera para su metabolismo. En condiciones del medio alteradas, los aportes adicionales de nitrógeno proceden mayoritariamente de los vertidos urbanos y de ciertas instalaciones industriales, así como del uso creciente de fertilizantes y pesticidas en la agricultura.

El cálculo de la cantidad de nitrógeno total corresponde a la sumatoria de todas las formas de nitrógeno orgánico más el ion amonio. Por tal motivo este conjunto de compuestos químicos comprende aquellos con una tendencia a degradarse en iones nitrato y nitrito.

El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de los seres vivos y por lo general, se encuentra en las aguas subterráneas y superficiales en forma de Amoniaco, Nitratos y Nitritos. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo el amoniaco, y la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en el agua. Generalmente, los nitratos son solubles, por lo que son movilizados con facilidad de los sedimentos por las aguas superficiales y subterráneas.

Figura 3-12. Comparación de comportamiento del nitrógeno amoniacal en la sede Bogotá y Villavicencio

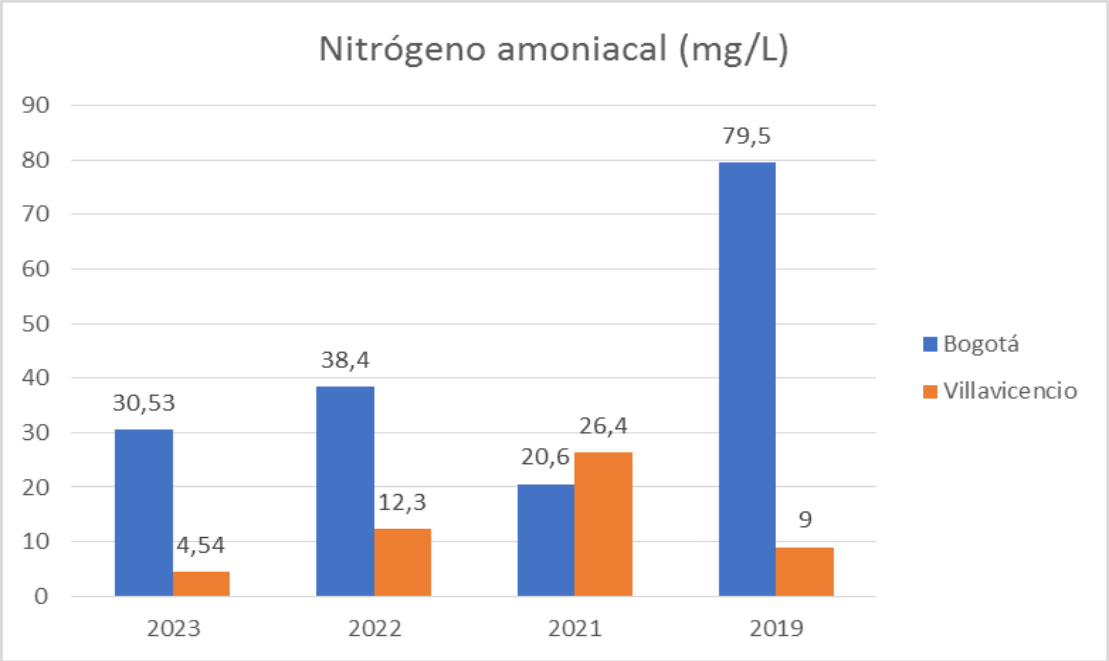


Figura 3-13. Comparación de comportamiento del nitrógeno total en la sede Bogotá y Villavicencio

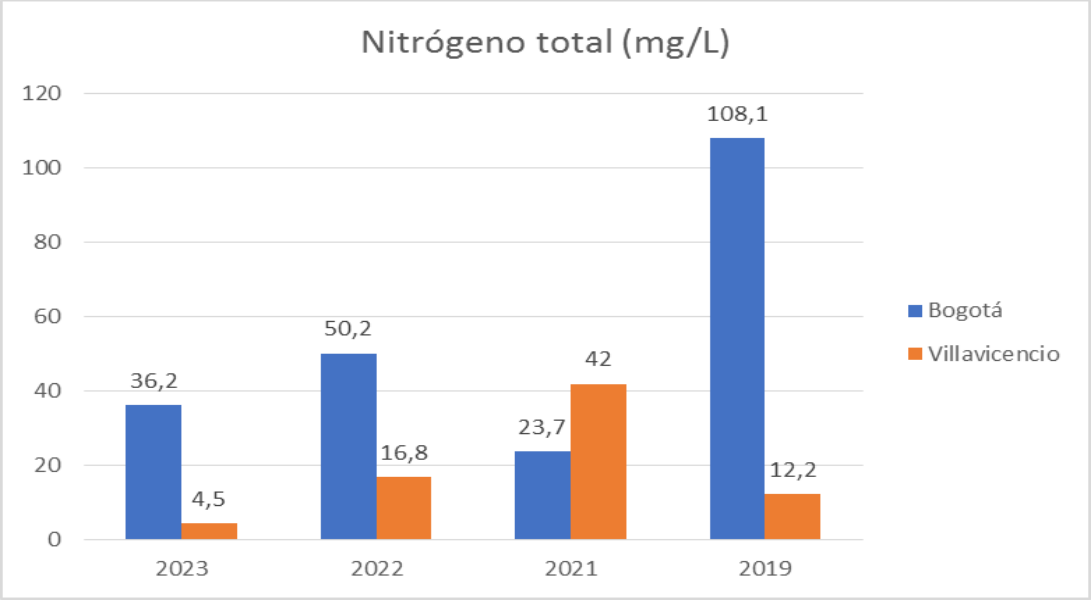
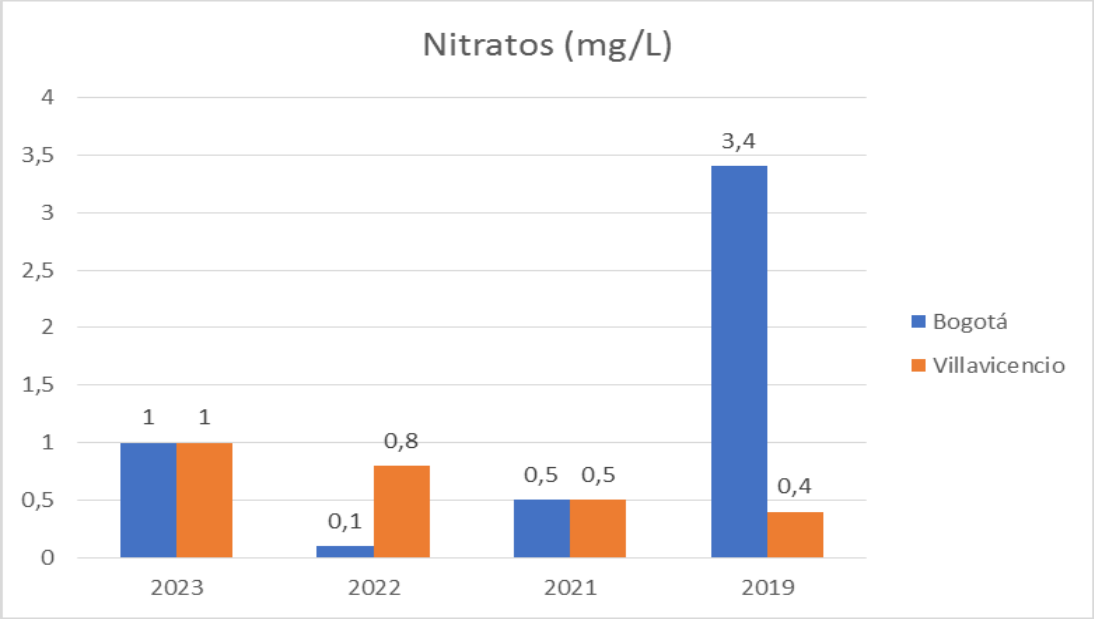


Figura 3-14. Comparación de comportamiento de los nitratos en la sede Bogotá y Villavicencio



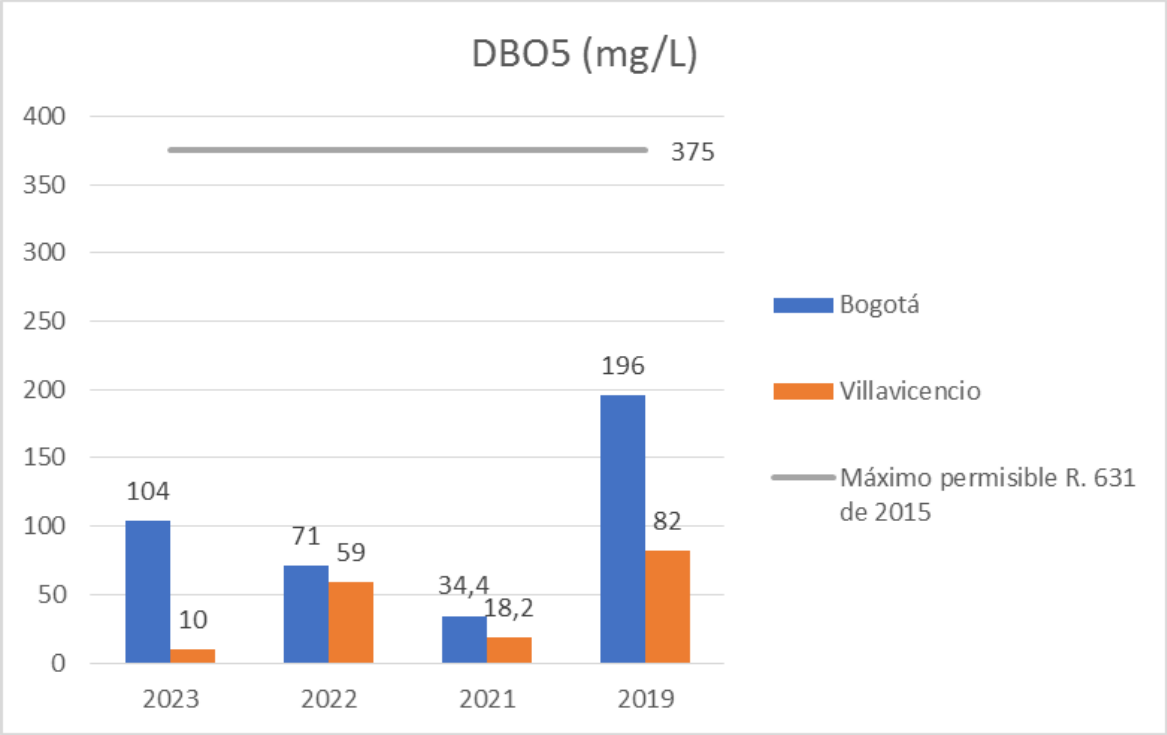
Para los parámetros de Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Total, las concentraciones reportadas son altas lo que indica alta presencia de materia orgánica y/o de compuestos nitrogenados que podrían afectar la calidad del recurso, sin embargo, los nitratos si tienen una concentración baja. A nivel normativo, estos compuestos nitrogenados no presentan requerimiento que establezca un valor límite admisible, sin embargo, la Resolución 0631 de 2015 expone la condición de “Análisis y Reporte”.

- Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO_5)

La prueba de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) es una prueba empírica que mide el oxígeno molecular disuelto en el agua requerido por los organismos en sus procesos metabólicos para consumir la materia orgánica presente en las muestras. Las muestras de agua, o una dilución conveniente de las mismas, se incuban por cinco días a una temperatura de 20±1ºC en la oscuridad. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto (OD), medida por el método yodométrico o electrométrico, durante el periodo de incubación produce una medida de la DBO.

La determinación de la DBO_5 establece los requerimientos relativos de oxígeno de las aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas, con el fin de estimar la carga orgánica presente. El método tiene una amplia aplicación en plantas de tratamiento y en la evaluación de la eficiencia de tales sistemas de tratamiento.

Figura 3-15. Comparación de comportamiento de la DBO en la sede Bogotá y Villavicencio



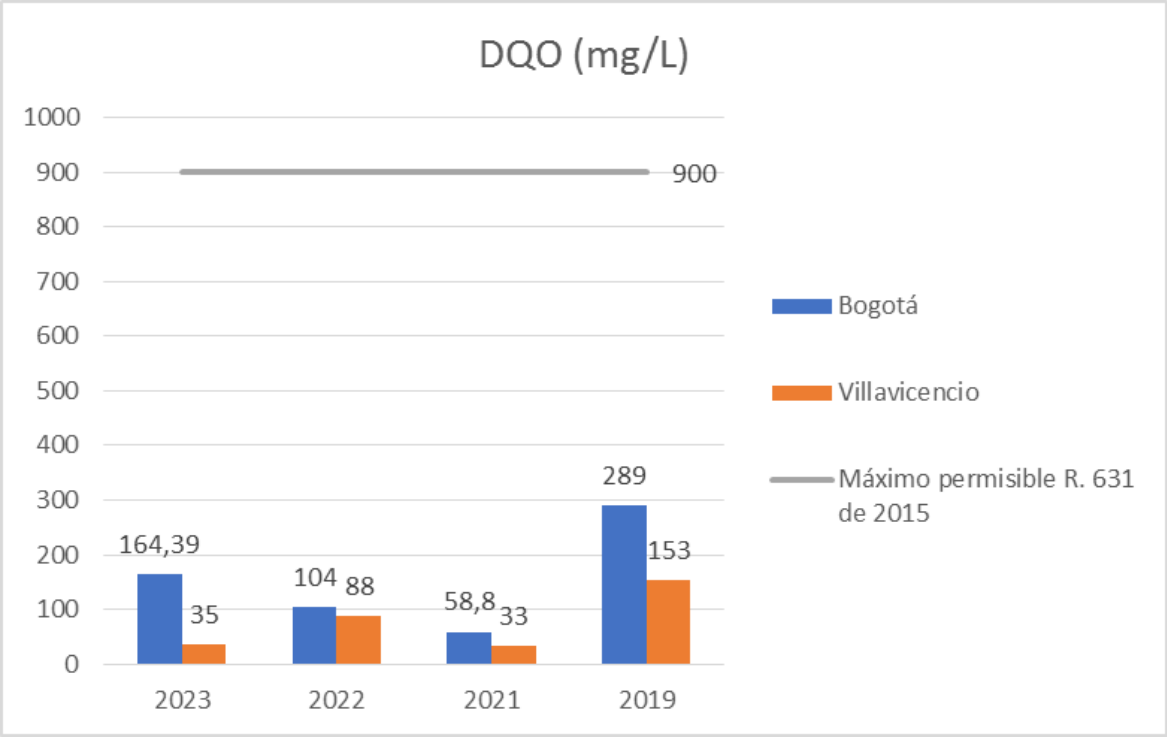
Con base a lo anterior, se puede inferir que en las dos sedes hay presencia de materia orgánica, sin embargo, las concentraciones son inferiores al máximo establecido en la Resolución 631 de 2015, y en cuanto a la eficiencia del sistema se evidencia que la PTAR de la sede Villavicencio tiene concentraciones menores de materia orgánica en el efluente.

- Demanda Química de Oxígeno

En el análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO), las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4 concentrado) con un exceso conocido de dicromato de potasio (K_2Cr2O_7) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4), que actúa como agente catalizador; y de sulfato mercúrico ($HgSO_4$), adicionado para remover la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, se cuantifica ya sea la cantidad de cromo (III) producido (medición de absorbancia a 600 nm) o la cantidad de dicromato no reducido

(medición de absorbancia a 420 nm) mediante una curva de calibración. La DQO se calcula en términos de oxígeno equivalente (IDEAM, 2007).

Figura 3-16. Comparación de comportamiento de la DQO en la sede Bogotá y Villavicencio



Siendo así, la DQO es una medida de la cantidad de oxígeno disuelto consumido, bajo condiciones preestablecidas por la oxidación química de la materia orgánica biodegradable presente en el agua (IDEAM, 2007).

Para ambas sedes la cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presentó un resultado mayor que el reportado para la DBO_5, esto en razón a que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente pero no biológicamente, es decir, que el oxidante químico es capaz de reaccionar con sustancias de difícil biodegradación para los microorganismos, ya desde el punto de vista normativo se reporta que hay un cumplimiento respecto al límite normativo establecido en el artículo 14 y 16 de la Resolución 631 de 2015 (900,00 mg O_2/L).

3.4 Cálculo de cargas contaminantes en la PTAR de Bogotá y de Villavicencio

El Decreto 3930 de 2010 "Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones" define como carga contaminante: *"(…) el producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene determinado en el mismo sitio; en un vertimiento se expresa en kilogramos por día (kg/d)".*

Por lo que la ecuación que permite hallar la carga contaminante es la definida en la Ecuación 3.4.1.

$$\boldsymbol{CC = Q * C * 0.0864 * t} \qquad (3.4.1)$$

Donde:
CC= Carga Contaminante, en kilogramos por día (kg/d)
Q= Caudal promedio de aguas residuales, en litros por segundo (L/s)
C= Concentración del elemento, sustancia o compuesto contaminante, en miligramos por litro (mg/L)
0.0864= Factor de conversión de unidades (de mg/s a Kg/d)
t= tiempo de vertimiento del generador, en horas por día (h)

Para el presente caso de estudio se analizarán las cargas de la sede Bogotá y sede Villavicencio con base a los resultados obtenidos de la caracterización de vertimientos realizada en el mes de diciembre del año 2023, y para los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Grasas y Aceites (GYA). Es importante tener en cuenta que el caudal generado es intermitente, y varía según la disposición de casos que deje la administración de justicia, además, que como se ha concluido en el documento, el procedimiento que mayor aporte da en la generación

de vertimientos es la realización de las necropsias medicolegales, siendo así, el tiempo de descarga no son 24 horas, sino un promedio de seis horas al día. Con base en lo anterior, se tienen los siguientes aportes de cargas contaminantes al día en las dos sedes de estudio.

Tabla 3-1. Cálculo de cargas contaminantes de la PTAR sede Bogotá con datos del año 2023

Bogotá				
Ítem	Parámetro	Caudal (L/s)	Concentración (mg/L)	Carga (Kg/día)
1	DBO_5	0,21	104	0,472
2	SST	0,21	117	0,531
3	GYA	0,21	1	0,005

Tabla 3-2. Cálculo de cargas contaminantes de la PTAR sede Villavicencio con datos del año 2023

Villavicencio				
Ítem	Parámetro	Caudal (L/s)	Concentración (mg/L)	Carga (Kg/día)
1	DBO_5	0,05	10	0,014
2	SST	0,05	51	0,073
3	GYA	0,05	1	0,001

Para la sede en Bogotá se puede inferir con los resultados anteriores que hay una mayor cantidad de volumen de agua que pasa por la PTAR en un tiempo determinado, así como la concentración de los parámetros de DBO y SST con respecto a los resultados de la sede Villavicencio, además, que teniendo en cuenta que la mayor parte que aporta vertimientos son las necropsias medicolegales se tiene que para el año 2023 en los meses de enero a noviembre se realizaron en Bogotá 2302 necropsias y en la sede Villavicencio en el mismo periodo se realizaron 282 necropsias, como se puede ver el trabajo realizado en el organismo de inspección de Patología Forense de la sede Villavicencio tan solo es del 12.25 % con respecto a lo realizado en la sede Bogotá y por ello también la generación de caudal y cargas contaminantes.

De igual forma con estos aportes de cargas contaminantes a los alcantarillados públicos de cada ciudad, el Instituto cumple con los máximos permisibles de los parámetros mencionados en la Resolución 631 de 2015 en sus artículos, 5, 14 y 16.

4. Análisis de los resultados obtenidos para las PTAR de la sede Bogotá y Villavicencio

Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de las sedes de Bogotá y Villavicencio son adecuadas para el tratamiento de los vertimientos generados en las sedes, es importante resaltar que a pesar de que muchos de los procesos en las instalaciones y las unidades de las PTAR trabajan de forma semiautomática, deben estar en monitoreo por parte de un operario debidamente entrenado, el cual debe hacer los mantenimientos periódicos del sistemas, revisión de los equipos electromecánicos, purga y retiro de lodos, retiro de grasas y limpieza de las rejillas del cribado, con el fin de que la operación de los sistemas se haga de forma funcional y acorde al manual de cada PTAR. A su vez, se cuenta con contratación externa para el mantenimiento correctivo y preventivos de las Plantas, en donde se llevan a cabo actividades de limpieza y retiro de lodos que se acumulan en las unidades de los sistemas, cambio de los materiales filtrantes (arena, carbón activado y granito), reparaciones de los tanques, cambio de bombas sumergibles (cuando aplique), aplicación de pintura époxica y demás requerimientos para que se alargue la vida útil de las PTAR y se garantice su correcto funcionamiento.

Acorde al trabajo que es dispuesto en el Instituto en la sede Villavicencio, con la PTAR de tecnología anaerobia se da un tratamiento adecuado a las cargas contaminantes que ingresan al sistema, y la generación de lodos con el tratamiento anaerobio es mucho menor como lo soporta la literatura en la Tabla 1-1, esto a su vez, genera que el operario de la PTAR puede realizar labores de mantenimiento rutinario una vez a la semana teniendo en cuenta que el recurso humano es limitado y no es exclusivo para realizar esta actividad.

Sin embargo, para la sede en Bogotá a pesar de la magnitud de trabajo que deja la administración de justicia a disposición del Instituto, la PTAR tiene buen rendimiento que se ve reflejado con el cumplimiento de los máximos permisibles de parámetros fisicoquímicos, aunque el mantenimiento de este sistema si requiere de mayor periodicidad de atención, además que la generación de lodos es mayor en el proceso aerobio como se pudo constatar en la información documentada de la Tabla 1-1, por lo que el operario de la PTAR debe realizar la deshidratación de los lodos en el filtro prensa una vez por semana y también, con un gestor externo se hace la succión de lodos una vez cada dos meses.

En conclusión las eficiencias de las PTAR de ambas sedes son adecuadas para el cumplimiento normativo actual en donde solo se monitorean parámetros fisicoquímicos, sin embargo, el componente de aporte microbiológico no está contemplado dentro de los seguimientos obligatorios, por lo que como oportunidad de mejora en el desempeño ambiental del Instituto se encuentra poder realizar caracterizaciones microbiológicas para en un inicio tener un diagnóstico de la eficiencia de los sistemas en la remoción de estos parámetros y con ello poder determinar si es necesario tecnología de tratamiento terciario como se justificó en el marco teórico del presente escrito y así poder dar un uso al vertimiento tratado.

De igual forma es pertinente mencionar que los monitoreos podrían ir más allá del cumplimiento normativo, por ejemplo con la inclusión de seguimiento de parámetros microbiológicos que por la naturaleza del vertimiento se infiere que pueden impactar al medio ambiente y a su vez, conocer el potencial de las PTAR para remover este tipo de contaminantes, otra oportunidad sería la caracterización del vertimiento antes del tratamiento, con el fin de poder conocer porcentajes de remoción de las cargas contaminantes, sin embargo, la asignación de recursos para el Instituto es limitado y por ahora solo se concentra en el cumplimiento estrictamente legal.

A nivel mundial, encontrar información libre sobre las características de los vertimientos generados en la prestación del servicio forense no es de acceso público, posiblemente por la información confidencial que se maneja y se ha limitado al monitoreo de drogas ilícitas,

lo cual está ganando interés por la afectación al medio ambiente ya que son considerados contaminantes emergentes.

Por lo anterior, los resultados del presente estudio son una base para ser compartida con países que prestan servicios similares (fuero del ámbito hospitalario) y crear alianzas de intercambio de conocimientos para identificar que parámetros monitorean, tipos de tratamiento de agua residual establecidos, regulaciones normativas en vertimientos y calidad de los vertimientos para parámetros físicos, químicos y microbiológicos. En Bolivia el sistema judicial cuenta con laboratorios de Documentología, Huellografía, Balística Forense, Fotografía y Planimetría Forense, Investigación de la Escena del Crimen, Accidentología Vial y Forense, Informática Forense, Biología Forense, Genética Forense, Toxicología Forense, Química Forense, Auditoria Forense, Ingeniería Forense, Área Psicología Forense, Área Tanatología Forense, Área Antropología Forense. En Argentina la medicina forense cuenta con un Departamento Clínica, Cirugía y Especialidades Médico-legales, Laboratorio de Genética Forense, Departamento de Salud Mental Adultos, Área Psicología, Departamento de Salud Mental Infanto-Juvenil, Departamento de Odontología Legal, Area de Enlace Cuerpo Médico Forense y Morgue Judicial, Departamento de Docencia, Investigación y Bioética, Biblioteca Científica, Área de Estadísticas, Comisión de Género, Laboratorio de Anatomo-histopatología, Laboratorio de Toxicología y Química Legal, Laboratorio de Análisis Clínicos, Servicio de Radiología, Servicio de Antropología Forense.

El uso del vertimiento a la luz de la norma que reglamenta el uso de las aguas residuales en Colombia que es la Resolución 1256 de 2021, sería de recirculación para uso en el mismo proceso de la misión Institucional, como lo sería la realización de necropsias o lavado de áreas, sin embargo, para ello no hay en la norma criterios de calidad por lo que se tendría que buscar lo que pueda aproximarse a los requerimientos de un uso doméstico. Siendo así, en los artículos 2.2.3.3.9.3 y 2.2.3.3.9.4 del Decreto 1076 de 2015.se establecen los criterios de calidad admisibles para la destinación del agua para uso doméstico, los cuales son: Amoniaco, Arsénico, Bario, Cadmio, Cianuro, Cinc, Cloruros, Cobre, Color Real, Compuestos fenólicos, Cromo, Difenil Policlorados, Mercurio, Nitratos, Plata, Sulfatos, Turbiedad, Tensoactivos (Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)), Coliformes totales, pH, con unos valores máximos de concentración.

Por lo anterior, los parámetros de monitoreo como lo son los metales e iones, es de esperar que no se encuentren en este tipo de aguas residuales generadas por el Instituto, con base a las caracterizaciones históricas que se han realizado ya que se muestran muy por debajo del límite cuantificable por los equipos de medición, sin embargo, los tensoactivos y coliformes totales si deben tener concentraciones muy bajas de 0.5 mg/L y 1.000 microorganismos/100 ml respectivamente, por lo que, se debe tener en un inicio muy buenas prácticas con el uso de detergentes biodegradables y que entran al sistema y una desinfección adicional a la cloración como lo es por medio de rayos ultravioletas y en complemento con el proceso de osmosis inversa para la retención de algunos metales e iones que puedan salir del vertimiento.

Dado que el monitoreo del vertimiento para obtener esta calidad esperada requiere que sea constante se propone que pueda hacerse de manera piloto en la sede de Bogotá en donde se encuentra el operario de la PTAR con mayor disponibilidad de tiempo y los ingenieros ambientales que pueden hacer seguimiento a los parámetros requeridos para el uso doméstico. Por lo que un estudio de viabilidad de la recirculación del agua residual tratada es una oportunidad para la minimización de los impactos ambientales negativos generados por el Instituto con bases de la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Acorde a las actividades, cronograma y objetivos planteados para la presente investigación se tiene que el recurso hídrico forma parte fundamental en la prestación del servicio forense en los distintos laboratorios y organismos de inspección, en algunos casos con algunos requerimientos más exigentes que otros como el uso de agua ultrapura o desionizada para el procesamiento de muestras, de todas formas, las características físicas, químicas y microbiológicas del agua utilizada cambian y hacen que se genere un vertimiento con altas cargas de tipo orgánico por la naturaleza de las muestras que son procesadas en su mayoría con fluidos biológicos y también cuenta este vertimiento con ciertas trazas de químicos que no se procesan en su totalidad o que son remanentes del lavado del material que se usa en el procesamiento de muestras.

Por lo anterior, el Instituto en cumplimiento de su misión y prestación de servicio siempre va a tener el aspecto ambiental de generación de vertimientos con impactos ambientales negativos al recurso hídrico por su contaminación a pesar de que existan las Plantas de Tratamiento de Agua Residual y se dé cumplimiento con todo lo que regula la normatividad actual.

Las dos tecnologías de PTAR en las sedes de Bogotá y Villavicencio son adecuadas para el manejo del trabajo que se da en cada sede y acorde al recurso humano disponible, sin embargo, se resalta que en el tratamiento anaerobio no se generen tanta cantidad de lodos y su mantenimiento no requiera que sea de manera periódica. La base esencial de las dos tecnologías es el trabajo de degradación de materia orgánica que realizan los microrganismos, por lo que el mantenimiento de las condiciones adecuadas para que estos puedan sobrevivir es muy importante con la adopción de inyección de microorganismos

facultativos, el seguimiento del pH y la temperatura y el no vertimiento de hipoclorito de sodio que pueda interferir con la manutención de estas condiciones para la sobrevivencia de este cultivo de microrganismos.

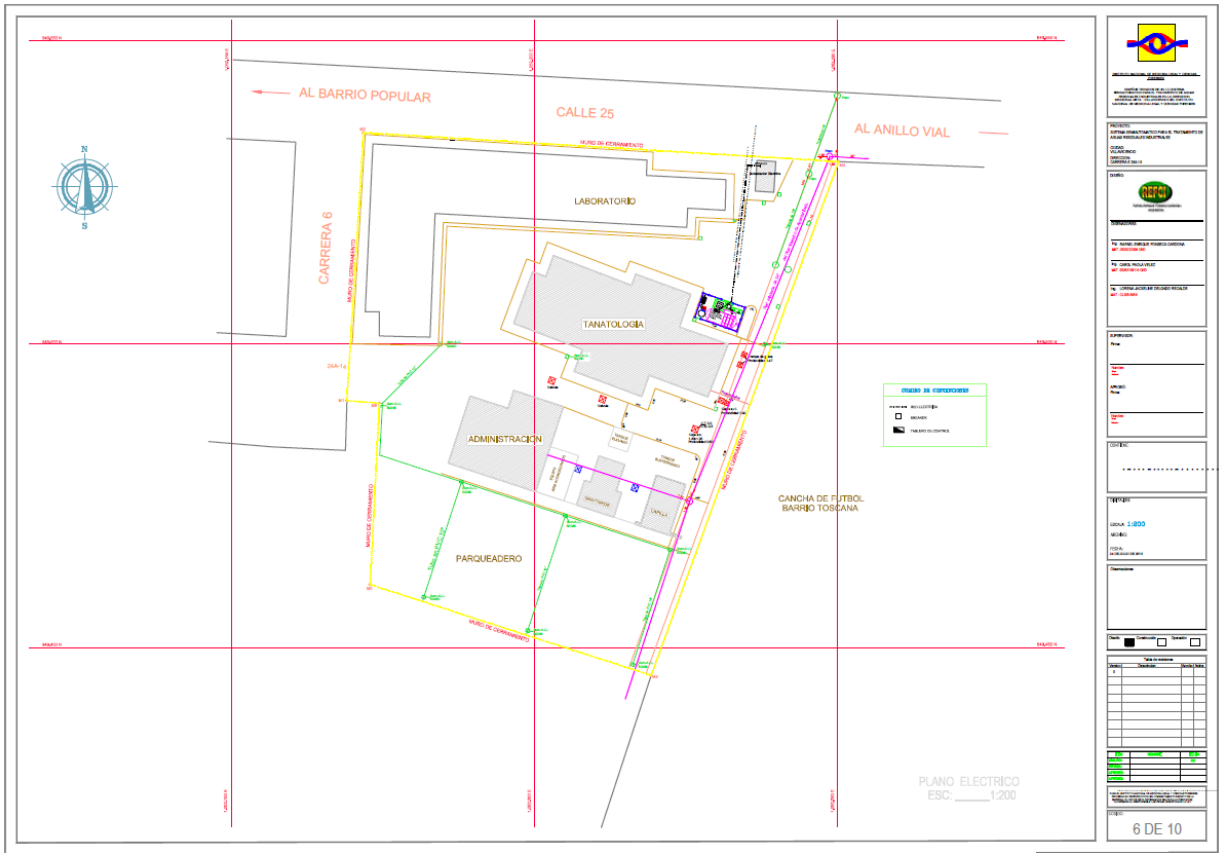
Con el cumplimiento de lo exigido en la normatividad actual colombiana para descargas puntuales de vertimientos al alcantarillado para parámetros fisicoquímicos, el Instituto puede desarrollar un proyecto de viabilidad de recirculación del vertimiento tratado con la adopción de una tecnología adicional al tratamiento actual como lo es la osmosis inversa y la desinfección por luz ultravioleta, con el fin de remover los posibles metales que puedan quedar en el vertimiento luego del tratamiento biológico y la eliminación de microorganismos infecciosos que puedan afectar y poner en riesgo a los servidores por la manipulación de esta agua residual.

5.2 Recomendaciones

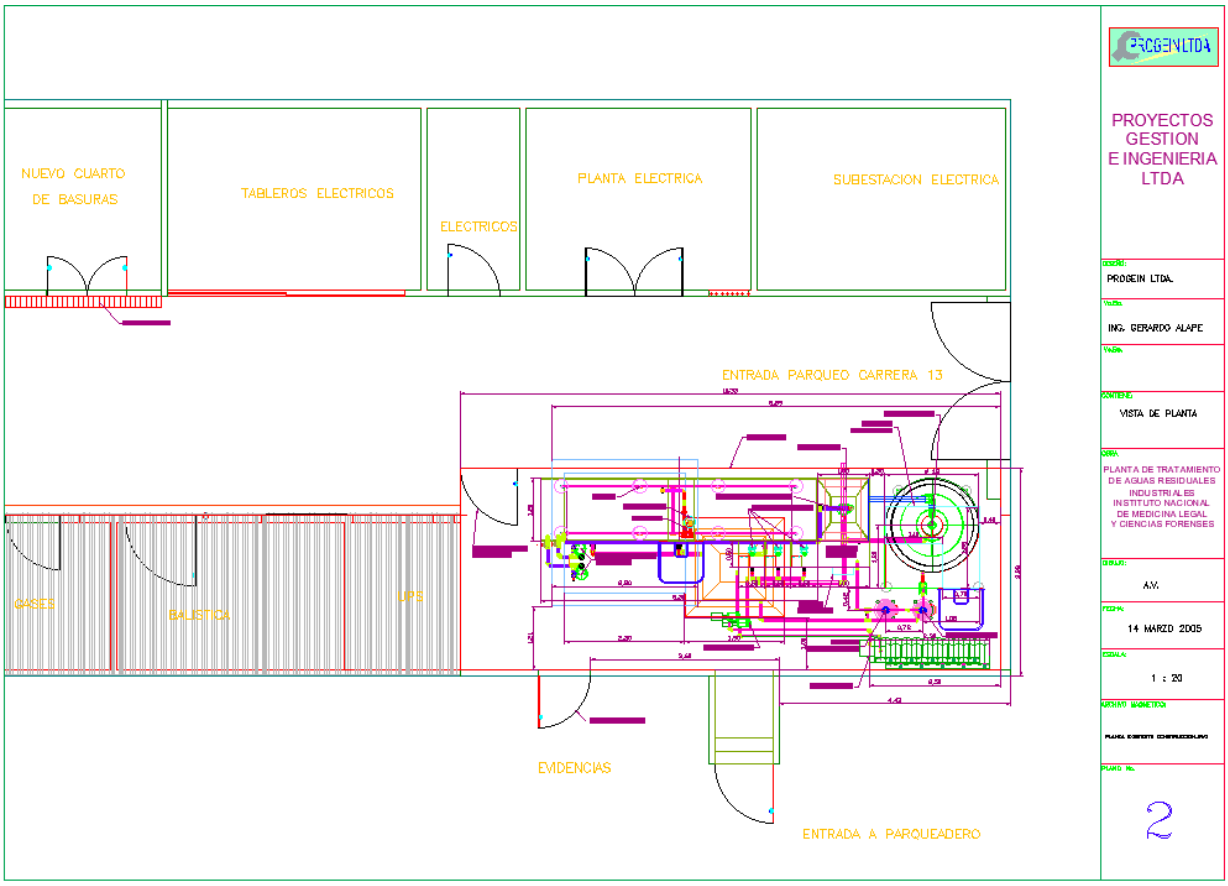
El mantenimiento y la operación de los sistemas de tratamiento de agua residual de manera periódica es fundamental para lograr el cumplimiento de los requisitos legales, además por la minimización de los impactos ambientales negativos que genera el Instituto por la generación de vertimientos, por lo que contar con el personal idóneo y exclusivo para esta actividad sería de gran aporte al cumplimiento de los objetivos del Sistema de Gestión Ambiental del Instituto.

El proyecto de viabilidad de la recirculación del agua tratada debe proyectarse para una sede y con base en la experiencia del estudio se puede replicar para todos los sistemas de tratamiento de agua residual a nivel nacional, esto con el fin de ser un referente a nivel nacional y mundial en la contribución de ahorro y uso eficiente del recurso hídrico.

A. Anexo: Plano de localización de la sede Villavicencio



B. Anexo: Plano de localización de la sede Bogotá



Bibliografía

Balducci, C., Green, D. C., Romagnoli, P., Perilli, M., Johansson, C., Panteliadis, P., & Cecinato, A. (2016). Cocaine and cannabinoids in the atmosphere of Northern Europe cities, comparison with Southern Europe and wastewater analysis. *Environment International*, *97*, 187–194. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.09.010

Bannwarth, A., Morelato, M., Benaglia, L., Been, F., Esseiva, P., Delemont, O., & Roux, C. (2019). The use of wastewater analysis in forensic intelligence: drug consumption comparison between Sydney and different European cities. *Forensic Sciences Research*, *4*(2), 141–151. https://doi.org/10.1080/20961790.2018.1500082

Bhandari, G., Chaudhary, P., Gangola, S., Gupta, S., Gupta, A., Rafatullah, M., & Chen, S. (2023). A review on hospital wastewater treatment technologies: Current management practices and future prospects. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 56). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104516

Bilge, S., Dogan-Topal, B., Gürbüz, M. M., Yücel, A., Sınağ, A., & Ozkan, S. A. (2022). Recent advances in electrochemical sensing of cocaine: A review. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 157). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116768

Boles, T. H., & Wells, M. J. M. (2014). Pilot survey of methamphetamine in sewers using a Polar Organic Chemical Integrative Sampler. *Science of the Total Environment*, *472*, 9–12. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.122

Carmona, J. (2021). *SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA DE UNA BOMBA AIRLIFT*. UNIVERSIDAD DE CHILE.

Centazzo, N., Frederick, B. M., Jacox, A., Cheng, S. Y., & Concheiro-Guisan, M. (2019). Wastewater analysis for nicotine, cocaine, amphetamines, opioids and cannabis in New York City. *Forensic Sciences Research*, *4*(2), 152–167. https://doi.org/10.1080/20961790.2019.1609388

Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *155*(1–2), 1–18. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041

Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. In *Water Research* (Vol. 44, Issue 10, pp. 2997–3027). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039

Daglioglu, N., Guzel, E. Y., & Kilercioglu, S. (2019). Assessment of illicit drugs in wastewater and estimation of drugs of abuse in Adana Province, Turkey. *Forensic Science International*, *294*, 132–139. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.11.012

EMCDDA. (2016). *Assessing illicit drugs in wastewater: advances in wastewater-based drug epidemiology* (S. Castiglioni, Ed.). https://www.emcdda.europa.eu/system/files/publications/2273/TDXD16022ENC_4.pdf

EMCDDA. (2021). *Wastewater analysis and drugs — a European multi-city study | www.emcdda.europa.eu*. Wastewater Analysis and Drugs - a European Multi-City Study. https://www.emcdda.europa.eu/publications/html/pods/waste-water-analysis_en

Eriksson, A. (2016). Forensic Pathology. In *Forensic Epidemiology: Principles and Practice* (pp. 151–177). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404584-2.00006-9

Giraldo, C. (1994). Organización de la Medicina Legal en Colombia . *Medicina Legal de Costa Rica*, *10*(2), 43–44.

Giraldo, C. A. (2014). Medicina legal en Colombia. Crónica de un centenario y de sus antecedentes. *Revista CES MEDICINA*, *28*(2), 325–335.

Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, *8*(3–4), 501–551. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7

Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012). Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview. *RSC Advances*, *2*(16), 6380–6388. https://doi.org/10.1039/c2ra20340e

Hong, C., Yan, Y., Tu, Y., & Huang, C. (2023). Efficient flat membrane based liquid phase microextraction of cathinones from environmental water and biological samples. *Talanta Open*, *7*. https://doi.org/10.1016/j.talo.2023.100232

Husain, A., Khan, N. A., Ahmed, S., Dhingra, A., Pratap, C., Ullah, S., Akbar, A., Changani, F., Youse, M., Alam, S., Vambol, S., Vambol, V., Khursheed, A., & Ali, I. (2020). *Application of advanced oxidation processes followed by different treatment technologies for hospital wastewater treatment*. *269*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122411

IDEAM. (2007). *Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría*.

Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., & Guwy, A. J. (2009). Illicit drugs and pharmaceuticals in the environment - Forensic applications of environmental data. Part 1: Estimation of the usage of drugs in local communities. *Environmental Pollution*, *157*(6), 1773–1777. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.03.017

Khan, M. T., Ahmad, R., Liu, G., Zhang, L., Santagata, R., Lega, M., & Casazza, M. (2024). Potential Environmental Impacts of a Hospital Wastewater Treatment Plant in a Developing Country. *Sustainability (Switzerland)* , *16*(6). https://doi.org/10.3390/su16062233

Kovalova, L., Siegrist, H., Singer, H., Wittmer, A., & McArdell, C. S. (2012). Hospital wastewater treatment by membrane bioreactor: Performance and efficiency for organic micropollutant elimination. *Environmental Science and Technology*, *46*(3), 1536–1545. https://doi.org/10.1021/es203495d

Kovalova, L., Siegrist, H., Von Gunten, U., Eugster, J., Hagenbuch, M., Wittmer, A., Moser, R., & McArdell, C. S. (2013). Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environmental Science and Technology*, *47*(14), 7899–7908. https://doi.org/10.1021/es400708w

Lettinga, G. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, *67*(1), 3–28. https://doi.org/10.1007/BF00872193

Mahnik, S. N., Lenz, K., Weissenbacher, N., Mader, R. M., & Fuerhacker, M. (2007). Fate of 5-fluorouracil, doxorubicin, epirubicin, and daunorubicin in hospital wastewater and their elimination by activated sludge and treatment in a membrane-bio-reactor system. *Chemosphere*, *66*(1), 30–37. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.051

Marek WIERGOWSKI, Beata SZPIECH, Krystyna REGU£A, & Anna TYBURSKA. (2009). MUNICIPAL SEWAGE AS A SOURCE OF CURRENT INFORMATION ON PSYCHOACTIVE SUBSTANCES USED IN URBAN COMMUNITIES . *Problems of Forensic Sciences*, *LXXIX*, 327–337.

Ortiz, C. E. M., & Chaparro, T. R. (2014). Combination of advanced oxidation process and anaerobic process for hospital wastewater treatment. *Afinidad*, *71*(565), 63–67.

Pacheco Ferreira, A. (2019). Estimaciones del consumo de drogas ilícitas derivadas del análisis de aguas residuales: Una revisión crítica. *Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud*, *51*(1), 69–80. https://doi.org/10.18273/revsal.v51n1-2019008

Pirsaheb, M., Sharafi, K., Khosravi, T., Moradi, M., & Ghayebzadeh, M. (2018). Application of downflow anaerobic upflow oxic submerged bio-film reactor (Dauosbr) in removing phosphorus, nitrogen, organic matter, turbidity and total suspended solids from hospital wastewater. *Environmental Engineering and Management Journal*, *17*(6), 1467–1474. https://doi.org/10.30638/eemj.2018.145

Ros, M., & Zupancic, G. D. (2004). Two-Stage Thermophilic Anaerobic–Aerobic Digestion of Waste-Activated Sludge. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, *21*(5).

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marĩas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, *452*(7185), 301–310. https://doi.org/10.1038/nature06599

Suarez, S., Lema, J. M., & Omil, F. (2009). Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation-flocculation and flotation. *Bioresource Technology*, *100*(7), 2138–2146. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.015

Truta, F., Drăgan, A. M., Tertis, M., Parrilla, M., Slosse, A., Van Durme, F., de Wael, K., & Cristea, C. (2023). Electrochemical Rapid Detection of Methamphetamine from Confiscated Samples Using a Graphene-Based Printed Platform. *Sensors*, *23*(13). https://doi.org/10.3390/s23136193

Venugopal, A., Ganesan, H., Sudalaimuthu Raja, S. S., Govindasamy, V., Arunachalam, M., Narayanasamy, A., Sivaprakash, P., Rahman, P. K. S. M., Gopalakrishnan, A. V., Siama, Z., & Vellingiri, B. (2020). Novel wastewater surveillance strategy for early detection of coronavirus disease 2019 hotspots. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, *17*, 8–13. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.05.003

Verlicchi, P., Galletti, A., Petrovic, M., & BarcelÓ, D. (2010). Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology*, *389*(3–4), 416–428. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.005