



**Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de la mina La Peña**

Dellys Juliana Casas Cubides

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniera Sanitaria y Ambiental

Asesora

Yesica María Gómez Jaramillo, Magíster (MSc) en Ingeniería ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

<b>Cita</b>	(Casas, 2024)
<b>Referencia</b>	Casas (2024). <i>Optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de la mina La Peña</i> [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Elija un elemento.

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

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

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

## Tabla de contenido

Resumen .....	1
1. Introducción .....	2
2 Objetivos .....	3
2.1 Objetivo general .....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 Marco teórico .....	3
4 Metodología .....	6
Etapa 1. Diagnóstico .....	6
Etapa 2. Revisión de alternativas .....	7
Etapa 3. Determinación de alternativas viables .....	8
5 Resultados y discusión .....	9
5.1. Resultados del diagnóstico de funcionamiento del sistema .....	9
5.2. Resultados de revisión de alternativas.....	15
5.3. Resultados de viabilidad de las alternativas .....	19
6 Conclusiones .....	21
Referencias .....	23

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Principales características del agua residual doméstica en países en desarrollo .....	5
<b>Tabla 2.</b> Resultados in situ de la caracterización a la salida del sistema séptico. ....	11
<b>Tabla 3.</b> Consolidado de parámetros a la salida del sistema analizados en laboratorio .....	12
<b>Tabla 4.</b> Número de empleados que hacen uso del sistema séptico por jornadas .....	13
<b>Tabla 5.</b> Promedio ponderado de empleados por día .....	13
<b>Tabla 6.</b> Cargas contaminantes calculadas a partir de aportes per cápita a la entrada del sistema. .....	14
<b>Tabla 7.</b> Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de contaminantes por el método 1. .....	14
<b>Tabla 8.</b> Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de contaminantes método 2. ....	15
<b>Tabla 9</b> Alternativas de medios de soportes para FFAFA's .....	15
<b>Tabla 10.</b> Registro de consumo de agua doméstica.....	16
<b>Tabla 11.</b> Resultados de cálculo del TRH del sistema .....	17
<b>Tabla 12.</b> TRH duplicando la capacidad del sistema. ....	17
<b>Tabla 13.</b> Comparación de límites máximos permisibles de la resolución 0699 de 2021 vs resolución 0631 de 2015. ....	18
<b>Tabla 14.</b> Resultados de viabilidad de alternativas. ....	19

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Ubicación del sitio de interés.....	9
<b>Figura 2.</b> Detalle de ubicación del vertimiento al interior de mina La Peña.....	10
<b>Figura 3.</b> Diagrama de instalación del sistema séptico. ....	11

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>ARD</b>	Aguas Residuales Domésticas
<b>DQO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>FAFA</b>	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
<b>SAAM</b>	Sustancias Activas al Azul de Metileno
<b>SST</b>	Sólidos Suspendidos Totales
<b>STARD</b>	Sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas
<b>TRH</b>	Tiempo de retención hidráulica

## **Resumen**

En este informe se presentan las propuestas de las alternativas viables de optimización de un sistema séptico, mediante el que se busca mitigar la contaminación asociada al vertimiento de las aguas residuales domésticas tratadas de las Instalaciones de mina la Peña ubicada en jurisdicción del municipio de San Luis en el departamento de Antioquia. Es así, como el proyecto se realizó en tres etapas: en primer lugar, se llevó cabo la evaluación funcionamiento del sistema de tratamiento existente según la caracterización de las aguas residuales generadas; en segundo lugar, a partir del diagnóstico de funcionamiento, se realizó una revisión bibliográfica de diferentes alternativas para la optimización del sistema séptico y, en tercer lugar, se determinaron las alternativas más viables para lograr el cumplimiento de la normativa en cuanto al vertimiento. En este sentido, en el diagnóstico, se encontraron bajas eficiencias de remoción en los parámetros de DQO 36,9 % y SST 68% y eficiencias nulas en la remoción de los demás parámetros de la resolución 0699 de 2021 que denotan un funcionamiento regular. Posteriormente, en la revisión de alternativas, se identificó que los medios de soporte utilizados en filtros anaerobios pueden influir significativamente en la remoción de contaminantes por lo que se revisó estudios realizados de diversos materiales como PVC, grava, tapas plásticas, espumas y cáscaras de coco, conocidos por promover la formación de biopelículas para el tratamiento. Además, se consultó con un profesor experto en tratamiento de aguas residuales, quien sugirió de duplicar la capacidad del sistema de acuerdo con el bajo tiempo de retención hidráulico. Como última alternativa, se propuso verter el efluente a un cuerpo de agua superficial en lugar del suelo, que, aunque no mejora la calidad del agua residual, permite cumplir con la mayoría de parámetros normativos aplicables al vertido en agua en lugar de suelo, especialmente el cumplimiento de nutrientes. Finalmente, se encontró que la alternativa más pertinente es aumentar la capacidad del sistema e implementar medios de soporte de tapas plásticas para el FAFA.

**Palabras clave:** Sistema séptico, soluciones individuales, optimización, vertimiento, aguas residuales.

## **1. Introducción**

En Colombia existe una notoria problemática asociada al manejo y control de los vertimientos de aguas residuales en contextos rurales, principalmente asociado a las dificultades en la construcción y ejecución de los proyectos, ya que se requieren altos costos de inversión por dispersión de la población (Guzmán, 2020). La empresa Calcáreos Industriales y Agrícolas Ltda al operar en localidades rurales donde no existe infraestructura de alcantarillado también debe enfrentar este desafío, y como respuesta a esta problemática y en cumplimiento con las regulaciones ambientales, opta por la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas no convencional con el fin de minimizar el impacto de sus vertimientos.

En particular, la mina La Peña ubicada en Río Claro, cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas conformado por un sistema de trampa de grasas, un tanque séptico con dos compartimentos y FAFA, asociado a este sistema posee un permiso de vertimiento de aguas residuales al suelo, el cual debe ser renovado e incluido dentro de la licencia ambiental, sin embargo, el sistema de tratamiento presenta dificultades en la remoción efectiva de carga contaminante.

Con el objetivo de abordar estas dificultades en este proyecto se pretende presentar medidas de corrección y optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas. De esta manera se garantiza el cumplimiento de los parámetros DQO, SST, SAAM, fósforo total y nitrógeno total Kjeldahl de acuerdo con la Resolución 0699 del 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ya que, el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en esta resolución es uno de los criterios principales que evalúa la Autoridad Ambiental al momento de otorgar, renovar o modificar permisos de vertimiento al suelo.

Este proyecto se aborda partir de la evaluación del sistema de tratamiento existente, la revisión bibliográfica en bases de datos, artículos, revistas científicas, entre otras, con el fin de obtener la o las alternativa más viable a implementar, y así seguir posicionando a la empresa como líder en el sector gracias a su firme compromiso de minimizar los impactos ambientales

asociados a su actividad, y además al cumplir con los compromisos derivados de las licencias y permisos ambientales, la empresa establece un estándar de responsabilidad corporativa y legal.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Optimizar el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas generadas en las unidades sanitarias y cocineta de la mina La Peña.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento existente de acuerdo con la caracterización de las aguas residuales generadas.
- Realizar una revisión bibliográfica de diferentes alternativas para la optimización del sistema de tratamiento de ARD.
- Determinar la o las alternativas más viables para la optimización del sistema.

## **3 Marco teórico**

Las aguas residuales domésticas son aquellas que se generan como resultado de actividades domésticas, como el uso de unidades sanitarias, cocina, lavandería, entre otros, estas aguas residuales están compuestas principalmente por sustancias orgánicas e inorgánicas, tanto suspendidas como disueltas (Díaz et al., 2012). Por ende, es fundamental realizar inversiones en sistemas de tratamiento de aguas residuales y otras infraestructuras de saneamiento con el fin de prevenir afectaciones a la salud pública, así como para promover la protección del medio ambiente (Banco Mundial, 2020).

No obstante, la prestación del servicio de alcantarillado en zonas rurales enfrenta desafíos, debido a particularidades que involucran condiciones técnicas que afectan la prestación del servicio público (Conpes 3810, 2014). Ante esta realidad y la necesidad de gestionar eficazmente las aguas residuales se ha optado por implementar soluciones individuales de saneamiento, que hacen referencia a sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales en el sitio de origen (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2018). En Colombia las soluciones individuales de



---

saneamiento están autorizadas para viviendas rurales dispersas o construcciones independientes, bajo la condición de que se cumplan con los criterios técnicos establecidos en el RAS para el tratamiento y disposición de aguas servidas en los sistemas descentralizados (Bernal, 2021).

Dentro de este marco, es importante considerar los permisos de vertimiento a las aguas superficiales, marinas o al suelo, otorgados por las Autoridades Ambientales para la disposición final de los residuos líquidos generados en el desarrollo de actividades o servicios, frente al cumplimiento de las normas contempladas en el decreto único reglamentario del Sector Ambiental 1076 de 2015 (ANLA, s. f.) con el fin de minimizar los impactos ambientales negativos.

Por consiguiente, cuando la autoridad ambiental concede un permiso de vertimiento al suelo a usuarios cuyas actividades generan vertimientos, se garantiza la vigilancia y control de dicho vertimiento de manera que este cumpla con las condiciones aceptables para preservar las propiedades del suelo (Cornare, 2022). En este sentido, la Resolución 0699 de 2021 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia cobra relevancia, ya que en este se establecen los límites máximos permisibles de los parámetros en vertimientos de aguas residuales domésticas tratadas al suelo, entre los parámetros reglamentados se encuentran DQO, SST, SAAM, fósforo total y el Nitrógeno Total Kjeldahl, los cuales son indicadores importantes de la calidad del agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

De esta manera, el Ministerio de Medio ambiente y Desarrollo sostenible (2015) introduce la definición de carga contaminante como el producto de la concentración de un contaminante por el caudal del líquido que lo contiene, expresado en unidades de masa sobre tiempo, como se observa en la Ecuación 1.

$$L = C_i \times Q_i$$

**Ecuación 1.** *Carga contaminante*

Donde:

L: Carga contaminante (kg/día)

$Q_i$ : Caudal que contine el contaminante

$C_i$ : Concentración del contaminante

Así pues, la definición de carga contaminante es aplicable para el parámetro DBO<sub>5</sub>, se puede expresar como kilogramos de DBO por día (kg DBO/d), y se calcula de acuerdo con:

$$L_{DBO_5} = C_{DBO_5} \times Q \times 10^{-3}$$

**Ecuación 2. Carga de DBO5**

Donde:

$L_{DBO_5}$ : Carga de DBO<sub>5</sub> (kg/día)

$Q$ : Caudal de agua residual (m<sup>3</sup>/d)

$C_{DBO_5}$ : Concentración de DBO<sub>5</sub> (mg/L)

$10^{-3}$ : Factor de conversión

Teniendo en cuenta que las aguas residuales son una mezcla de diferentes sustancias y microorganismos, las aguas residuales domésticas varían dependiendo de la ubicación geográfica y los hábitos de sus habitantes, se han establecidos diferentes características del agua residual dependiendo del nivel de desarrollo de los países. En la siguiente tabla se presentan las principales características del agua residual doméstica en países en desarrollo.

**Tabla 1.**

*Principales características del agua residual doméstica en países en desarrollo*

Parámetro	Producción per-cápita g·hab <sup>-1</sup> ·día <sup>-1</sup>		Concentración mg·L <sup>-1</sup>	
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico
<b>Sólidos totales</b>	120-220	180	700-1350	1100
Suspendidos	35-70	60	200-450	350
• Fijos	7-14	10	40-100	80
• Volátiles	25-60	50	165-350	320
Disueltos	85-150	120	500-900	700
• Fijos	50-90	70	300-550	400
• Volátiles	35-60	50	200-350	300
Sedimentables	--	--	10-20	15
<b>Materia orgánica</b>				
DBO <sub>5</sub>	40-60	50	250-400	300
DQO	80-120	100	450-800	600
DBO última	60-90	75	350-600	450
<b>Nitrógeno total</b>	6,0-10,0	8,0	35-60	45
Nitrógeno orgánico	2,5-4,0	3,5	15-25	20
Nitrógeno amoniacal	3,5-6,0	4,5	20-35	25
Nitritos	0	0	0	0
Nitratos	0,0-0,3	0	0-2	0
<b>Fósforo</b>	0,7-2,5	1,0	4-15	7
Fósforo orgánico	0,7-1,0	0,3	1-6	2
Fósforo inorgánico	0,5-1,5	0,7	3-9	5
<b>pH</b>	--	--	6,7-8,0	7,0
<b>Alcalinidad</b>	20-40	30	100-250	200

Nota. Adaptado de Von Sperling y Chernicharo (2005)

De esta manera, teniendo presente la definición de carga contaminante es posible realizar el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción de un contaminante representado como el balance de masa entre la entrada y la salida de un sistema. Utilizando la Ecuación 3 cuando existen variaciones entre el caudal de entrada y salida (Francisco Molina & Rodriguez, 2017).

$$E(\%) = \frac{Q_i C_i - Q_e C_e}{Q_i C_i} \times 100$$

**Ecuación 3** *Eficiencia de remoción*

Donde:

$E$ : Eficiencia de remoción en %

$C_e$ : Concentración efluente del contaminante

$C_i$ : Concentración influente del  
contaminante (mg/L)

(mg/L)

$Q_i$ : Caudal influente (L/s)

$Q_e$ : Caudal efluente (L/s)

#### 4 Metodología

A continuación, se presenta la metodología que se siguió con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en la práctica, la cual se llevó a cabo en tres etapas:

##### **Etapa 1. Diagnóstico**

Esta etapa consistió en realizar el diagnóstico del funcionamiento del sistema a partir información proporcionada por parte de la empresa, además de buscar información sobre caracterización y monitoreos realizados al sistema anteriormente, recolectar información de planos y especificaciones técnicas, revisar registros de mantenimiento del sistema en caso de que hubiere. De esta manera, se le solicitó al área de gestión ambiental las especificaciones técnicas del sistema séptico implementado, a lo cual la líder ambiental proporcionó un manual de RotoPlast de sistemas sépticos horizontales en el cual se mencionan algunas de las especificaciones del sistema.

Por otro lado, se solicitó información acerca de caracterizaciones del vertimiento del sistema de agua residual, en el cual se pudiera evidenciar mediciones de parámetros relacionados con el cumplimiento de la resolución 0699 de 2021. Ante esta solicitud, el área ambiental

---

manifestó que se ha realizado un único monitoreo el 27 de julio de 2023 a través de un contratista certificado, este monitoreo se llevó a cabo de acuerdo con la resolución 0699 de 2021 Artículo 4. "Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD-T al suelo." pertenecientes a la Tabla 1: Parámetros para usuarios equiparables a usuarios de vivienda rural dispersa". Cabe aclarar, que anteriormente no se realizaban monitoreos debido a que la empresa no estaba obligada a caracterizar su vertimiento al suelo, sin embargo, con la expedición de la resolución 0699 la autoridad ambiental CORNARE les requirió presentar monitoreo y caracterización de sus vertimientos con una frecuencia bianual.

Adicionalmente, se revisó el concepto de carga contaminante de acuerdo con la normativa ambiental nacional, es decir en el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. También se revisaron otros términos de uso común en el diseño y operación de sistemas de tratamiento aguas residuales como lo es la eficiencia de remoción, este concepto se revisó en el manual de procesos biológicos utilizado en el curso de procesos biológicos del programa de Ingeniería Sanitaria.

## **Etapas 2. Revisión de alternativas**

Con fin de obtener alternativas se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos y material bibliográfico en las bases de datos proporcionadas por la universidad y otros buscadores como Google Académico. La búsqueda bibliográfica en las bases de datos suscritas de la Universidad de Antioquia se llevó a cabo a partir de la base de datos *Access Engineering*, *Scopus* y *Science Direct*, filtrando por los temas “*environmental engineering*” y “*wastewater engineering*”, utilizando las palabras claves “*wastewater*” y “*pollutant load*”, “*biofilm*”, “*upflow anaerobic filter*”, “*decentralized*”. Posteriormente, se seleccionaron los artículos de acuerdo con los títulos y resúmenes más acordes al proyecto.

Por otra parte, se realizó una consulta con un experto con el fin de tener una apreciación o recomendación sobre cómo mejorar la eficiencia del sistema, a lo cual el profesor experto manifestó que las concentraciones de los contaminantes mencionados en este proyecto son difíciles de remover a través de un sistema séptico y un FAF. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se plantean opciones como realizar la descarga directamente a un

cuerpo de agua cercano y no al suelo, ya que, en la normativa para vertimiento a aguas superficiales la resolución 0330 de 2015 se permiten concentraciones más altas de los contaminantes.

Además, por recomendación se verificó el tiempo de retención hidráulico del sistema y evaluar el uso del agua y la posibilidad de reducir los consumos, por último, se debe evaluar la posibilidad de complementar o ampliar el sistema para mejorar la eficiencia. Al no tener, datos reales de las concentraciones del agua cruda a la entrada se dificulta realizar el diagnóstico del sistema, sin embargo, de acuerdo con los valores de los parámetros en el efluente se denota que el sistema no opera adecuadamente.

Por otro lado, a partir de la consulta con el experto por recomendación, se revisó información los volúmenes de agua residual a partir de los valores de consumo de agua doméstica de un año completo, en este caso del año 2023. De esta manera, a partir del registro de consumo mensual se calculó el caudal promedio de aguas residuales considerando un coeficiente de retorno del 85%, a partir de este valor y del volumen del sistema de tratamiento se calculó el TRH para verificar que el tiempo de retención fuese adecuado.

### **Etapas 3. Determinación de alternativas viables**

La selección de la alternativa o alternativas viables en el mejoramiento del sistema séptico a partir de la identificación de opciones potenciales se realizó a partir de los criterios de evaluación que incluyen el costo de implementación y la facilidad percibida de implementación. En los cuales se realizó un análisis del costo directo e indirecto de cada alternativa, así como de la complejidad técnica y logística involucrada.

## 5 Resultados y discusión

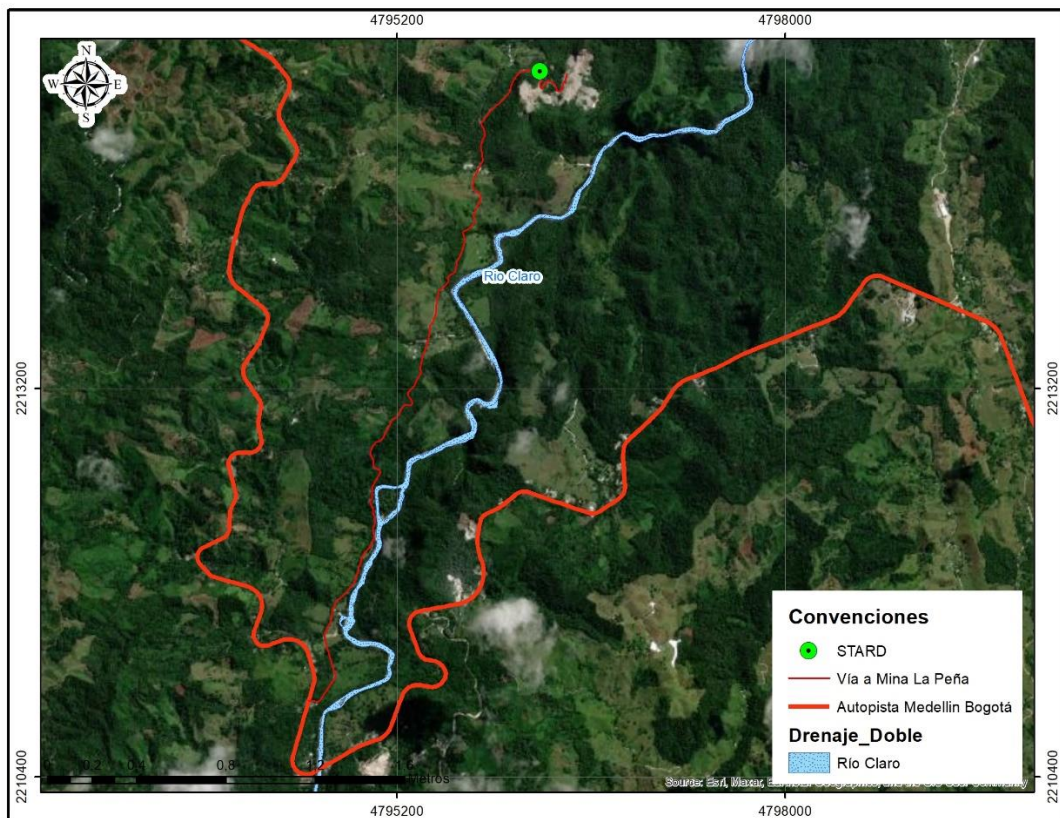
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en aras del cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto.

### 5.1. Resultados del diagnóstico de funcionamiento del sistema

La mina La Peña se encuentra ubicada en jurisdicción del municipio de San Luis al costado izquierdo del Río Claro, aproximadamente a 7 kilómetros de distancia de la autopista Medellín- Bogotá, donde se llevan cabo procesos de minería y trituración de caliza y dolomita.

#### **Figura 1.**

*Ubicación del sitio de interés.*

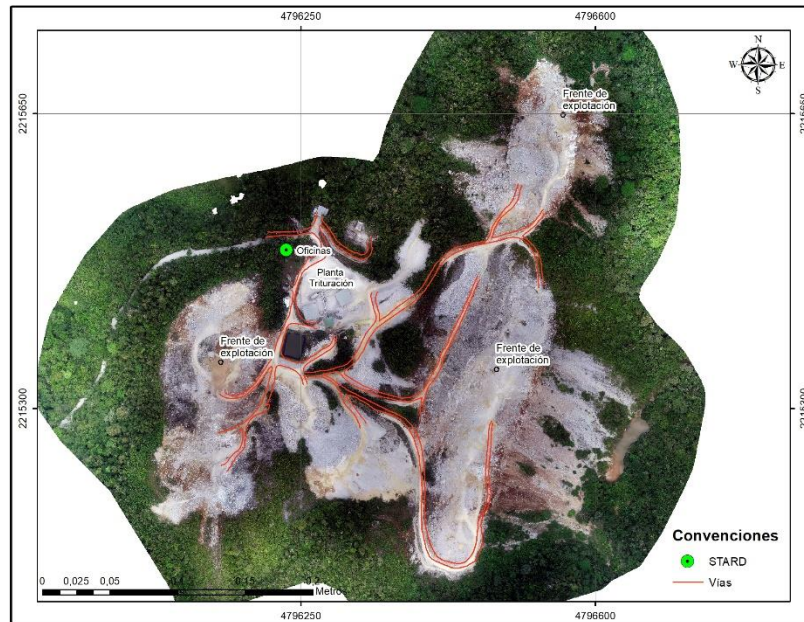


De acuerdo con los procesos que se llevan cabo en la mina, se tiene un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, generadas por el uso de las unidades sanitarias de los

trabajadores. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el detalle de la ubicación del vertimiento al interior de la mina.

**Figura 2.**

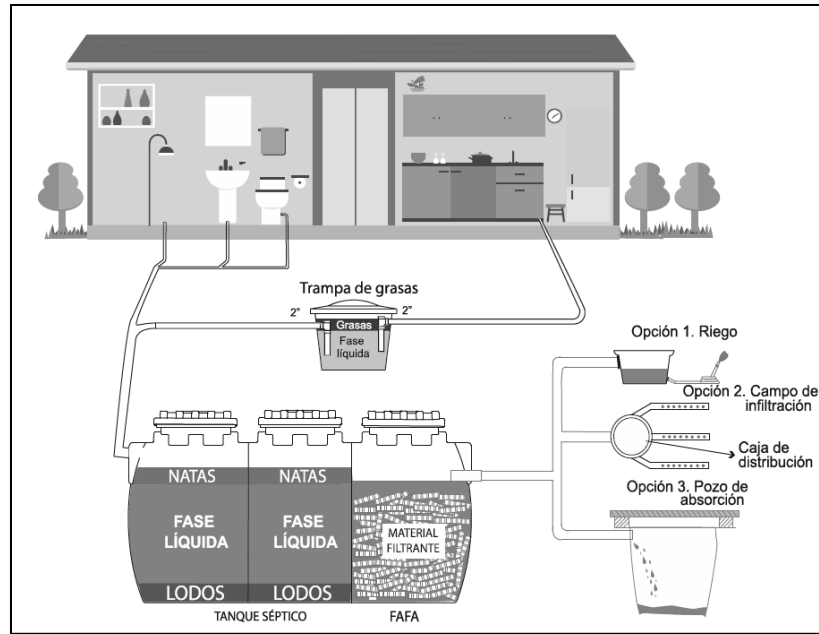
*Detalle de ubicación del vertimiento al interior de mina La Peña.*



- **Especificaciones del sistema séptico implementado**

El sistema séptico adoptado para el tratamiento de las aguas residuales corresponde a un sistema séptico integrado prefabricado marca Rotoplas de capacidad nominal de 2000 litros, el cual consiste en un tanque cilíndrico horizontal con refuerzos internos, fabricados con polietileno lineal de alta resistencia al impacto, divididos en su interior en cámaras que conforman un tanque séptico y un FAFA. El sistema además consta trampa de grasas y campo de infiltración.

**Figura 3.**  
*Diagrama de instalación del sistema séptico.*



*Nota.* Fuente (Tanques de Agua - Pozos Séptico I RotoPlast, 2023)

- **Resultados de monitoreo y caracterización agua residual**

A continuación, se presentan las mediciones instantáneas de campo a la salida del sistema séptico de calina Ltda.

**Tabla 2.**  
*Resultados in situ de la caracterización a la salida del sistema séptico.*

Parámetro	Unidades	Valor promedio	Límite Resolución 0699 de 2021
pH	Unidades de pH	7,38	6,5-8,5
Temperatura	°C	23,57	± 5°C que el rango de temperatura media anual multianual del lugar
Conductividad	µS/cm	498,77	700,0
Sólidos sedimentables	ml/L/h	0,04	1,5
Caudal	L/s	0,1	---

*Nota.* Adaptado del informe de caracterización de agua residual mina La Peña

De acuerdo con la Tabla 2 se puede observar que los parámetros in situ cumplen a cabalidad con los límites permisibles establecidos en la norma de vertimiento al suelo- Resolución 0699 de 2021. Además, la temperatura media del lugar es de 27°C por lo que la



temperatura media del agua residual cumple con los establecido en la norma. Así mismo, para la caracterización se realizaron análisis fisicoquímicos los cuales se relacionan en la Tabla 3 y se realizó el cálculo de las cargas de cada uno de los parámetros.

**Tabla 3.**

*Consolidado de parámetros a la salida del sistema analizados en laboratorio.*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor promedio efluente</b>	<b>Límite Resolución 0699 de 2021</b>	<b>Carga (Kg/d)</b>
Cloruros (Cl)	mg/L	54,94	140,0 mg/L	0,475
DQO (O <sub>2</sub> )	mg/L	378,58	200,0 mg/L	3,271
Fósforo total (P)	mg/L	7,18	2,0 mg/L	0,062
Grasa y aceites	mg/L	16,32	20,0 mg/L	0,141
Nitrógeno Kjeldahl (N)	mg/L	100,14	20,0 mg/L	0,865
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	112,0	50,0 mg/L	0,968
Sustancias activas de azul de metileno (SAAM)	mg/L	0,84	0,5 mg/L	0,007

*Nota.* Adaptado del Informe de caracterización de agua residual Mina La Peña

En la Tabla 3 se puede observar que el vertimiento no cumple con los parámetros de DQO, fósforo total, nitrógeno total Kjeldahl, SST y SAAM. Esto se puede deber a que los sistemas anaerobios como el FAFA no eliminan los sólidos suspendidos inorgánicos y los sólidos suspendidos orgánicos se degradan lentamente en condiciones anaeróbicas, de manera que estos deben ser retirados anteriormente en el tanque séptico. De acuerdo con esto, podemos inferir que los sólidos del efluente del sistema de tratamiento no están siendo removidos eficientemente en el tanque séptico. En cuanto a las SAMM, están directamente relacionadas con el uso de detergentes en la limpieza de las unidades sanitarias.

Dado que en el monitoreo del vertimiento no se realizó caracterización del agua residual a la entrada del sistema, no fue posible calcular la eficiencia del sistema en la remoción de contaminantes a partir de información primaria. Sin embargo, se indagó información de los usuarios de las unidades sanitarias en la mina con el fin de calcular las cargas contaminantes antes del tratamiento a partir de aporte típicos per cápita de acuerdo con lo establecido en el artículo 169 de la resolución 0330 de 2017.

**Tabla 4.***Número de empleados que hacen uso del sistema séptico por jornadas.*

<b>Jornada</b>	<b>Horario</b>	<b>Número de empleados</b>
Administrativos	7 am-5 pm	4
Jornada 1°	6am-2pm	16
Jornada 2°	2pm-10pm	13
Jornada 3°	10pm-6am	10
<b>Total</b>		<b>43</b>

*Nota. Elaboración propia*

Teniendo en cuenta que los empleados no se encuentran laborando al mismo tiempo, se calculó el número de personas que en promedio hacen uso del sistema séptico en 24 horas a partir de un promedio ponderado. En la Tabla 5. se observa la distribución del número de empleados a lo largo del día y el valor promedio en 24 horas.

**Tabla 5.***Promedio ponderado de empleados por día.*

<b>Hora</b>	<b>Número de empleados</b>	<b># horas laboradas</b>	<b>(Número de empleados) * (# de horas laboradas)</b>
6am-7pm	16	1	16
7am-2pm	20	7	140
2pm-5pm	17	3	51
5pm-10pm	13	5	65
10pm-6am	10	8	80
Total		24	352
<b>Promedio ponderado de por día</b>			<b>15</b>

*Nota. Elaboración propia*

Teniendo en cuenta que el número de personas que en promedio aportan agua residual al sistema de tratamiento por día es 15 personas, se calcularon las cargas contaminantes aproximadas de los principales parámetros en la entrada del sistema de acuerdo con los valores de aportes per cápita consignados en el artículo 169 de la resolución 0330 de 2017 para los parámetros SST y nitrógeno total Kjeldahl, y para aquellos parámetros que no se encontraban en la resolución se tomaron los valores típicos de la

Tabla 1 tales como DQO y fósforo total.

**Tabla 6.***Cargas contaminantes calculadas a partir de aportes per cápita a la entrada del sistema.*

<b>Parámetro</b>	<b>Aporte per cápita (g/hab/día)</b>	<b>Carga (kg/día)</b>
DQO (O <sub>2</sub> )	100,0	1,5
Fósforo total (P)	1,0	0,015
Nitrógeno Kjeldahl (N)	12,0	0,18
Sólidos suspendidos totales (SST)	50,0	0,75

*Nota.* Elaboración propia

Teniendo las cargas contaminantes a la entrada y la salida del sistema se calculó la eficiencia de remoción del sistema para algunos parámetros a partir de la Ecuación 3.

**Tabla 7.***Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de contaminantes por el método 1.*

<b>Parámetro</b>	<b>Carga entrada (Kg/d)</b>	<b>Carga salida (Kg/d)</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
DQO (O <sub>2</sub> )	1,500	3,271	-118,067
Fósforo total (P)	0,015	0,062	-313,333
Nitrógeno Kjeldahl (N)	0,180	0,865	-380,556
Sólidos suspendidos totales (SST)	0,750	0,968	-29,067

*Nota.* Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 7, las cargas calculadas en la entrada del sistema son menores que las cargas a la salida, por lo tanto, los valores de la eficiencia toman valores negativos, lo cual no tiene mucho sentido debido a que el objetivo principal del sistema de tratamiento es disminuir esa carga contaminante antes del vertimiento, por lo tanto, estos valores denotan un funcionamiento deficiente del sistema de tratamiento. Es importante mencionar que la carga a la entrada del sistema no es un reflejo absoluto de la realidad sino una aproximación.

Teniendo en cuenta los valores de eficiencia tan sesgados, se optó por calcular la eficiencia del sistema suponiendo que el caudal de entrada y salida son iguales (continuidad), debido a que el sistema cuenta con una única entrada y salida sin derivaciones que dividan el caudal de salida. De esta manera la Ecuación 3 (Eficiencia de remoción), solo dependería de las concentraciones de entrada y salida. Para la entrada del sistema se tuvo en cuenta los valores típicos de concentración de la

Tabla 1. y para la salida los valores correspondientes de la caracterización del efluente de aguas residuales.

**Tabla 8.**

*Eficiencia del sistema de tratamiento en la remoción de contaminantes método 2.*

<b>Parámetro</b>	<b>Concentración entrada (mg/L)</b>	<b>Concentración salida (mg/L)</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
DQO (O <sub>2</sub> )	600,0	378,58	36,90%
Fósforo total (P)	7,0	7,18	-2,57%
Nitrógeno Kjeldahl (N)	45,0	100,14	-122,53%
Sólidos suspendidos totales (SST)	350,0	112,0	68,00%

*Nota.* Elaboración propia

Por esta razón, al no cumplir con la normativa y reflejar concentraciones altas de los contaminantes se denota un funcionamiento deficiente del sistema de depuración del agua residual, por lo tanto, es importante plantear e implementar alternativas que optimicen y mejoren el funcionamiento del sistema.

## 5.2. Resultados de revisión de alternativas

Debido a la baja eficiencia de remoción de contaminantes se buscó alternativas de medios de soporte adecuados a implementar en el filtro anaerobio, con el fin de mejorar la eficiencia de remoción estimulando la formación de biopelículas para el tratamiento. Esta información se indagó en las bases de datos de la universidad y en otras fuentes como Google Académico, se encontraron los siguientes resultados.

**Tabla 9.**

*Alternativas de medios de soportes para FFAFA's.*

<b>Medio de soporte implementado</b>	<b>Eficiencia de remoción DQO (%)</b>	<b>Remoción de DBO5 (%)</b>	<b>Eficiencia de remoción SST (%)</b>	<b>Fuente</b>
Lecho sintético (Tubos de PVC)	39,05%	-	36,05%	(Guevara. et al., 2017)
Lecho de grava	49,84%	-	43,32%	
Tapas plásticas de botellas	72,95%	31,97 %	-	(Alvarado, 2011)
Cilindros de espuma utilizados en el embalaje de artículos electrónicos	52,40	42,06	-	

Cáscara de coco	41%	72%	70,00%	(Mattos de Oliveira Cruz et al., 2019)
-----------------	-----	-----	--------	--

*Nota.* Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior, las tapas plásticas de botellas son una excelente opción de bajo costo y alta durabilidad, que puede ser ideal para proyectos de presupuestos ilimitados, dado que, en las pruebas de las investigaciones presentó la eficiencia de remoción más elevada de DQO, por otra parte, la cáscara de coco presentó mayor eficiencias de remoción de DBO, sin embargo, este parámetro no se evalúa en la resolución 0631 de 2021 por lo que no se tuvo en cuenta para la selección de alternativa de medio de soporte. Finalmente, también se encontró que la implementación de cáscara de coco como medio de soporte conseguía eficiencias de remoción más altas para los parámetros de DBO y SST que los demás materiales, pero con la desventaja de requerir mantenimiento frecuente debido a que las cáscaras siguen su proceso natural de descomposición y puede generar aumento de DQO, DBO y SST si no se realiza la renovación de las cáscaras de coco. Los demás medios de soporte tubos de PVC, cilindros de espuma y el lecho de grava presentaron eficiencias de remoción menores por lo que no se consideraron como alternativa viable. En este caso se seleccionó como alternativa la implementación de tapas plásticas de botella como medio de soporte para el FAFA.

Por otra parte, en la búsqueda de alternativas también se realizó una consulta con el profesor Francisco Molina experto en tratamiento de aguas residuales, y por recomendación se evaluó la capacidad del sistema a partir del cálculo del volumen de agua residual considerando que el 85% del agua de consumo doméstico se convierte en aguas residuales. A continuación, se presenta el registro de consumo de agua para uso doméstico.

**Tabla 10.**

*Registro de consumo de agua doméstica.*

<b>Registro de consumo de agua doméstico (2023)</b>	
Mes	m3
Enero	239
Febrero	236
Marzo	83
Abril	307
Mayo	180

Junio	93
Julio	175
Agosto	144
Septiembre	373
Octubre	85
Noviembre	122
Diciembre	260
<b>Promedio(m3/mes)</b>	<b>191,42</b>

*Nota. Tomado del formulario de autodeclaración y registro de consumo de agua y vertimientos 2023 Calina Ltda.*

A continuación, se presenta el resultado del cálculo de agua residual generada utilizando un coeficiente de retorno del 85% y el tiempo de retención hidráulica en el sistema.

**Tabla 11.**

*Resultados de cálculo del TRH del sistema.*

<b>Resultado Cálculo del caudal de aguas residuales y tiempo de retención hidráulica</b>	
Coefficiente de retorno	0,85 -
Caudal de agua residual	0,23 m <sup>3</sup> /h
Volumen del sistema de tratamiento	2,0 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulica promedio-TRH	8,85 h

*Nota. Elaboración propia*

De acuerdo con la tabla anterior y teniendo en cuenta que el sistema de tratamiento tiene un volumen de 2000 L es decir 2 m<sup>3</sup>, se encontró que el tiempo de retención hidráulica promedio es de 8,85 horas, que es un tiempo muy bajo para un sistema tanque séptico-filtro anaerobio cuyo TRH debería estar entre 12 y 24 horas, bajo esta perspectiva el sistema tiene una capacidad baja por lo que al menos se debe duplicar la capacidad actual del sistema. Ahora bien, duplicando la capacidad del sistema, cada módulo recibiría la mitad del caudal de aguas residuales aumentando la capacidad del sistema como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 12.**

*TRH duplicando la capacidad del sistema.*

<b>Tiempo de retención hidráulica-TRH (h) para un sistema en paralelo (funcionamiento de una unidad de tratamiento)</b>	
Caudal de agua residual	0,11 m <sup>3</sup> /h
volumen del sistema	2 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención hidráulica-TRH	17,70 h

*Nota.* Elaboración propia

De acuerdo con lo establecido en el reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico RAS 2017, el TRH para sistemas sépticos debe estar entre 12 y 24 horas, por lo tanto, 17,7 horas es un tiempo adecuado, para permitir una separación más efectiva de los sólidos y una digestión más completa de la materia orgánica, debido a que aumenta el tiempo de contacto del agua residual y los microorganismos.

Finalmente, se revisó la alternativa de realizar la descarga del vertimiento directamente a un cuerpo de agua y no descargar al suelo, de esta manera se cumplirían los parámetros de vertimiento según la norma de vertimiento para cuerpos de aguas superficiales la Res. 0631 de 2015.

**Tabla 13.**

*Comparación de límites máximos permisibles de la resolución 0699 de 2021 vs resolución 0631 de 2015.*

<b>Parámetro</b>	<b>Parámetros efluente STARD</b>	<b>Resolución 0699 de 2021</b>	<b>Cumplimiento Res. 0699 de 2021</b>	<b>Resolución 0631 de 2015</b>	<b>Cumplimiento Res. 0631/2015</b>
Temperatura (°C)	23,57	± 5°C que el rango de temperatura media anual multianual del lugar	Cumple	40°C	Cumple
pH (unidades)	7,38	6,5 a 8,5	Cumple	6-9	Cumple
DQO (mg/l)	378,58	200,0	No Cumple	180	No Cumple
DBO (mg/l)	-	-	-	90	No Cumple
SST (mg/l)	112,0	50,0	No Cumple	90	No Cumple
SSED	0,04	1,5	Cumple	5.00	Cumple
Grasas y aceites (mg/l)	16,32	20,0	Cumple	Análisis y Reporte	Cumple
SAAM (mg/l)	0,84	0,5	No Cumple	20	Cumple
Conductividad eléctrica	498,77	700,0	Cumple	-	-
Fósforo total (mg/l)	7,18	2,0	No Cumple	Análisis y Reporte	Cumple
Nitrógeno total (mg/l)	100,14	20,0	No Cumple	Análisis y Reporte	Cumple
Cloruros (Cl-)	54,94	140,0	No Cumple	-	-

*Nota.* Elaboración propia

En la tabla anterior, se observa la comparación de los valores de los parámetros registrados en el efluente del sistema de tratamiento versus límites máximos permisibles para vertimiento a suelo y agua, se puede concluir que realizar el vertimiento a un cuerpo de agua superficial permitiría el cumplimiento de la mayoría de los parámetros, cabe resaltar que el alcance de los sistemas descentralizados se limita a la remoción de parámetros como DQO, DBO y SST, sin embargo este alcance no incluye la remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno total, de esta manera es pertinente la aplicabilidad de la normativa de vertimientos a aguas superficiales, ya que, se limita únicamente al análisis y reporte en cuanto a nutrientes.

### 5.3. Resultados de viabilidad de las alternativas

A continuación, se presenta el análisis de cada una de las alternativas encontradas.

#### **Tabla 14.**

*Resultados de viabilidad de alternativas.*

<b>Alternativa</b>	<b>Costo de implementación</b>	<b>Facilidad de implementación</b>
Implementar medios de soporte para el FAFA (Tapas plásticas de botellas)	Bajo, ya que es un material que se puede recuperar de los residuos sólidos generados en la empresa y se evita el costo de comprar materiales de soporte comerciales.	Fácil, es viable técnicamente, debido a que no requiere mano de obra calificada para su implementación.
Duplicar la capacidad del sistema	Medio, debido a que implica la compra de un sistema integrado prefabricado con características similares a original, el costo aproximado es de \$4.941.900, también se tienen gastos de transporte e instalación del sistema.	Fácil, ya que, la instalación es relativamente sencilla, sin embargo, se requiere que la instalación sea realizada por el fabricante o el distribuidor autorizado.



---

Cambiar a vertimiento a aguas superficiales	Alto, debido a que la distancia mínima del cuerpo de agua más cercano es de aproximadamente 250 metros lineales que implicaría 42 unidades de tubería, considerando que las tuberías vienen en longitudes de 6 m, más costos de los accesorios es decir aproximadamente \$ 20.330.010.	Medio, ya que, requiere mano de obra para instalación de la tubería, además, las condiciones del terreno representan un desafío técnico para la instalación de la tubería. Por otra parte, se deben considerar recursos asociados al trámite de modificación del vertimiento a aguas superficiales y modelación del vertimiento, entre otros.
---	--	---

---

*Nota.* Elaboración propia

De acuerdo con el análisis realizado en la tabla anterior, la implementación de medios de soporte de tapas plásticas de botella sería la alternativa más viable, no obstante, esta no resuelve la problemática de la baja capacidad del sistema en cuanto al volumen de agua residual que recibe para que se garantice un tiempo de retención hidráulico adecuado. De esta manera, sería pertinente combinar la alternativa de duplicar la capacidad del sistema e implementar los medios de soporte de tapas plásticas.

## 6 Conclusiones

Un diagnóstico detallado del funcionamiento de un sistema de tratamiento es la clave para proponer soluciones adecuadas a las problemáticas características un sistema. Por lo tanto, se reitera, que la caracterización del vertimiento a la entrada y salida del sistema es crucial para identificar la causa de un mal funcionamiento. A pesar de que se pueden realizar estimaciones, estas presentan incertidumbres y los resultados pueden estar alejados de la realidad.

El alcance de los sistemas sépticos es limitado, incluso si estos son integrados con FAFA's, ya que, estos están diseñados para la remoción de parámetros generales como DQO, DBO y SST, pero son deficientes en la remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno. Esto se vio reflejado en la revisión bibliográfica de alternativas, en donde se evidenció falta de información relacionada con sistemas pequeños rurales y por lo tanto una dificultad para brindar opciones de mejoramiento en el sistema estudiado.

El TRH es una variable a considerar para el buen funcionamiento de los sistemas sépticos, en este proyecto se encontró que el tiempo de retención hidráulico es un factor muy importante para garantizar el tiempo de contacto del agua residual y los microorganismos.

## **7 Recomendaciones**

Se recomienda a la compañía realizar los monitoreos y caracterización del vertimiento de agua residual realizando mediciones de los parámetros a la entrada y salida del sistema de tratamiento, dado que, esto brinda mayor claridad acerca del funcionamiento permitiendo conocer la eficiencia real y detectar si este presenta afectaciones en funcionamiento normal.

Por otra, parte se recomienda implementar un sistema de aprovechamiento de aguas grises, es decir aquellas provenientes de los lavamanos y lavaderos en los cuales se generan los desechos líquidos con contenido de jabón y/o detergentes, con menor contenido de patógenos y materia orgánica, de esta manera disminuir el volumen de aguas residuales que llegan al sistema de tratamiento limitándolo únicamente a las aguas con excretas.

También es necesario realizar charlas de instrucciones de uso adecuado de los aparatos sanitarios, con el fin de evitar que sean arrojadas sustancias que eliminan los microorganismos necesarios en el proceso de degradación tales como ácidos, químicos, excedentes de fumigación, hidrocarburos, y solventes como el thinner. Adicionalmente, evitar que residuos sólidos lleguen al sistema de tratamiento y esto se puede lograr a partir de campañas de sensibilización.

---

## Referencias

- Alvarado, A. (2011). Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- ANLA. (s. f.). Permiso de Vertimiento de Aguas Residuales. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. Recuperado 25 de marzo de 2024, de [https://www.anla.gov.co/01\\_anla/permiso-y-autorizacion-vertimiento-aguas-residuales](https://www.anla.gov.co/01_anla/permiso-y-autorizacion-vertimiento-aguas-residuales)
- Banco Mundial. (2020, marzo 19). El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
- Batero Correa, Y. C., & Cruz Oliveros, E. M. (2007). *Evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFAS) con medio de soporte en guadua para la remoción de materia orgánica de un agua residual sintética*. <https://hdl.handle.net/11059/821>
- Bernal, Y. A. (2021). Soluciones alternativas para el acceso a agua y saneamiento en Colombia. <https://cpctg.manizales.unal.edu.co/documents/Soluciones%20alternativas%20para%20el%20acceso%20a%20agua%20y%20saneamiento%20en%20Colombia.pdf>
- Conpes 3810. (2014). Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3810.pdf>
- Cornare. (2022). Portafolio de Trámites Ambientales. 17.
- Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: El caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Francisco Molina, & Rodríguez, D. (2017). Manual de procesos biológicos.

Guzmán, B. (2020). Saneamiento básico en áreas rurales de Colombia, caso de estudio veredas la Garrucha, Mina Rica y Lisboa del corregimiento de La Cristalina, Manizales – Caldas. [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82531/1053849635.2022.pdf;jsessionid=1325691532E3EAB554A0705CBD5FC6F3?sequence=2>

Mattos de Oliveira Cruz, L. (2019). The influence of an anaerobic filter on maintenance and operational conditions of a sand filter. *Ecological Engineering*, 127, 454-459. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.021>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 0699 de 2021. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-0699-de-2021.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2018). Gestor Normativo de la CRA - Resolución 844 de 2018 MVCT. [https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion\\_minviviendact\\_0844\\_2018.htm](https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minviviendact_0844_2018.htm)

Tanques de agua - Pozos séptico I Rotoplast. (2023). © 2006 MDC. [https://www.rotoplast.com.co/es?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwltKxBhDMARIsAG8KnqXQGBeUMuwgkJQrSU\\_kFvU6OHNQ-4RgiXO\\_7d-C23GWMpmvr99QIXIaAlpBEALw\\_wcB](https://www.rotoplast.com.co/es?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwltKxBhDMARIsAG8KnqXQGBeUMuwgkJQrSU_kFvU6OHNQ-4RgiXO_7d-C23GWMpmvr99QIXIaAlpBEALw_wcB)