

**Validación económica entre implementar un sistema de tratamiento de aguas de condensados y comprar agua potable para autoclaves de residuos hospitalarios**

Elaborado por:

Bryan Andrés Cifuentes Garay

Karen Stefany Rodriguez Castillo

Valentina Forero Saavedra

Universidad Ean

Especialización en gerencia de proyectos

Seminario de Investigación

Bogotá

06/04/2025

## Contenido de la Segunda Entrega

### Resumen

Veolia, tiene una de sus plantas en Medellín, donde esteriliza residuos peligrosos mediante una autoclave usando vapor proveniente de agua potable, la cual es transportada por carrotanques, debido a la falta de suministro en el predio. Los condensados resultantes son dispuestos como residuos peligrosos con un costo representativo. En busca de la optimización del tratamiento, se evaluará la viabilidad económica de tratar y reutilizar estos condensados, comparando el costo del tratamiento con el costo actual de compra de agua potable y disposición de condensados.

*Palabras clave:* esterilización, Condensados, tratamiento de aguas residuales, reúso de agua, análisis de costos.

### Problema de Investigación

La esterilización de residuos peligrosos mediante autoclave es un método ampliamente utilizado en entornos hospitalarios e industriales para eliminar agentes infecciosos. Este proceso utiliza vapor a alta temperatura y presión para destruir microorganismos patógenos, garantizando la seguridad y la reducción de riesgos biológicos (Mendez Gomez, 2014).

Este proceso es llevado a cabo en Veolia Servicios Industriales SAS ESP en el departamento de Antioquia, en donde el autoclave instalado usa vapor de agua, el cual es generado por medio de una caldera a la cual le ingresa agua con características fisicoquímicas específicas, por este motivo se usa agua potable. Cuando el proceso de esterilización finaliza, genera agua contaminada a la que se le denomina “Condensados” los cuales deben disponerse como residuos peligrosos.

Esta planta se encuentra ubicada específicamente a las afueras de la ciudad de Medellín, se tiene una operación continua de 24 horas al día los 7 días a la semana. El predio no cuenta con suministro de agua potable y la compañía debe contratar carrotaques para garantizar el suministro de esta.

En cuanto a las aguas de condensado, el punto de disposición más cercano se encuentra en la ciudad de Manizales y el costo de transporte y disposición son elevados, lo cual encarece en términos generales la operación a ejecutar por la compañía.

Haciendo un balance general del costo por metro cubico de agua utilizada en el proceso, se encuentra que este es muy elevado en comparación a otras ciudades que prestan el mismo servicio, por consiguiente, el servicio de esterilización de residuos hospitalarios se encarece, haciendo menos competitiva y eficiente a la compañía en comparación con otras que se desempeñan en la misma línea de negocio.

En caso de que se continúe adquiriendo el agua potable necesaria para el proceso de esterilización por medio de compra, los costos para la compañía seguirían elevándose, ya que el agua debe ser transportada por carrotaques, los cuales pueda que en ciertas ocasiones no estén disponibles. Igualmente, los costos no solo se elevarían por la compra del agua potable, sino también porque los “condensados” deben disponerse de una manera específica al ser considerados residuos peligrosos, lo cual significaría un aumento en el costo de la disposición debido a el transporte de estos a su lugar de disposición final.

Las aguas de condensado, aunque contaminadas, pueden ser tratadas para eliminar impurezas y ajustar sus características fisicoquímicas, haciéndolas aptas para su reuso en calderas (Malik, 2019). La selección del tratamiento adecuado depende de la composición del condensado y los requisitos de la caldera.

El reuso de agua tratada es una estrategia cada vez más importante para la gestión sostenible del agua, especialmente en industrias con alto consumo (EPA, 2023).

La evaluación económica debe considerar los costos de inversión y operación del sistema de tratamiento, así como los ahorros generados por la reducción en el consumo de agua potable y la disposición de condensados (UNEP, 2021). También se deben considerar los beneficios ambientales, como la reducción de la huella hídrica

Debido a lo anteriormente expuesto, la compañía requiere buscar alternativas para el suministro y disposición del agua, es por esto por lo que se pretende validar económicamente si el reúso de las aguas de condensado en la caldera de la autoclave posterior a un tratamiento que garantice las características de ingreso requeridas es más eficiente a comparación de continuar con el proceso de gestión actual para la esterilización de los residuos hospitalarios.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Validar la viabilidad económica de reutilizar el agua de los condensados generados en proceso de esterilización de la autoclave, posterior a un tratamiento de este, para ser usado como insumo dentro del mismo proceso, para sustituir la compra de agua potable para la caldera y la disposición de los condensados generados del autoclave.

### **Objetivos específicos**

1. Establecer los parámetros fisicoquímicos que debe tener el agua de ingreso de la caldera que suministra el vapor de agua a la autoclave, así como los parámetros de calidad del agua de condensado generado en el proceso de esterilización.
2. Diseñar un tren de tratamiento de acuerdo con los parámetros de salida del condensado generado en la autoclave y los de entrada que debe tener el agua de ingreso a la caldera.
3. Comparar el precio por m<sup>3</sup> del tratamiento y reúso del agua con el costo actual de compra de agua potable y disposición de agua de los condensados generados.

## Justificación

El costo por metro cúbico de agua utilizada en el proceso de esterilización de residuos hospitalarios en la autoclave es muy elevado y se busca optimizarlo. Esto se debe a que el precio del agua potable en el mercado es alto, debido a que no se dispone de un punto de agua potable en el predio y debe ser transportada en carrotaques. Además, es necesario considerar el costo asociado al transporte y disposición del agua residual generada después del tratamiento. Al implementar un tren de tratamiento de agua se garantiza la calidad del recurso requerida por la caldera, se elimina la necesidad de comprar agua potable constantemente para el procesamiento de residuos biológicos e infecciosos, además de eliminar el proceso de transporte y disposición del agua de condensados como residuo peligroso.

## Marco Teórico

### Marco Conceptual

Con el fin de facilitar el entendimiento del proyecto, a continuación, se describirán los conceptos básicos que rodean el desarrollo de la investigación:

**ESTERILIZACIÓN:** La esterilización es proceso mediante el cual se destruye o se elimina la presencia de agentes contaminantes o microorganismos, incluidas las esporas.

**VAPOR DE AGUA:** Es el agua en estado gaseoso. Se obtiene a partir de la ebullición o de la evaporación del agua.

**AUTOCLAVE:** Una autoclave es un recipiente metálico con cierre hermético que posibilita la esterilización de residuos a través del vapor, el cual puede presentarse a altas presiones y temperaturas por un determinado tiempo. Puede emplear vapor húmedo, el cuál reduce el tiempo de operación y vapor seco, el cual aumenta el tiempo de operación. Una autoclave no genera emisiones atmosféricas.

CONDENSADO: El condensado es vapor que pasa de estado gaseoso a líquido. Esto se genera cuando el vapor entra en contacto con superficies frías.

TREN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: Un tren de tratamiento son las técnicas y los equipos usados con el fin de purificar el agua residual de cualquier proceso que la haya contaminado.

El marco teórico en esta investigación tiene como propósito proveer fundamentos y revisión de literatura con respecto a la validación económica entre implementar un tren de tratamiento de aguas de condensados y la compra de agua potable para el proceso de esterilización de residuos hospitalarios. El objetivo de este marco teórico es proporcionar el contexto con respecto a la gestión del agua en procesos de esterilización, la disposición de los condensados, la importancia de implementar una solución sostenible en términos ambientales y de costo y fundamentar la viabilidad del tren de tratamiento a partir del estudio de casos de aplicación de este en otros contextos. Igualmente, se abordarán normativas respectivas al manejo de residuos en Colombia y revisión de literatura afín al tratamiento de aguas residuales.

Acorde a Schneierson (1972), el calor, especialmente en su forma húmeda o vapor, es el método más comúnmente empleado por hospitales para esterilizar materiales o diferentes herramientas para uso en la actividad médica. A esto se le llama esterilización terminal por calor húmedo (Muñoz González, Enriques Gaspar, Díaz Concepción, Cruz Bayo, & Rodríguez Piñero, 2018).

El proceso de esterilización puede completarse por medio de una autoclave, el cual emplea vapor de agua a una alta presión y temperatura para eliminar contaminación presente en la carga a esterilizar. Dado lo anterior, la autoclave necesita de agua potable para su correcto funcionamiento, ya que el agua empleada debe cumplir con ciertos mínimos para que el proceso pueda ejecutarse correctamente (Wasserlab, s.f).

De este proceso de esterilización por medio de una autoclave se originan los condensados, los cuales se generan cuando el agua pasa de su estado gaseoso a su estado líquido y deben ser removidos para evitar que la carga sea contaminada nuevamente. Estos condensados son aguas contaminadas, por lo cual deben ser dispuestos de forma apropiada para evitar contaminación de cuerpos hídricos u otras acciones poco sostenibles. Los condensados generados deben ser transportados a lugares autorizados para su disposición final, por lo cual implica un costo de transporte y de desecho, haciendo valioso e importante el estudio del aprovechamiento de estos condensados y su reúso para el proceso de esterilización de residuos hospitalarios.

Al ser el agua la materia prima del proceso de esterilización por autoclave (Montes, Guerrero, & Mayo, 2018) es clave revisar alternativas que permitan minimizar la compra de agua potable y disminuir los gastos, afectando así positivamente la eficiencia del proceso. Una de estas alternativas es la implementación de una planta de tratamiento de aguas de condensados, lo cual posibilitaría el reúso del agua en el proceso y minimizaría la compra de agua potable. Acorde a Rossi (2015), implementar un sistema de recuperación de condensados es beneficioso ya que pueden emplearse como agua de alimento para la caldera, además de representar un beneficio económico al ser un ahorro directo en materia prima.

En un estudio de viabilidad económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste beneficio, los autores Hernández, Molinos & Sala (2010), indican que la depuración de aguas residuales ha tomado un papel importante durante los últimos años debido a la preocupación de la sociedad por el estado de las fuentes hídricas, asimismo, los autores concluyen que los beneficios ambientales de reutilizar el agua son importantes, ya que reduce la presión sobre las fuentes hídricas y evita que se generen vertimientos contaminantes.

Seguido a esto, en varios sectores industriales la gestión del agua se ha vuelto una necesidad en temas de sostenibilidad ambiental y económica, por lo que, la implementación de tecnologías de agua residuales no solo ofrece una respuesta a temas regulatorios, sino que, reduce costos operativos, en resumen, la reutilización de estos condensados en los procesos de esterilización emerge como una estrategia prometedora para minimizar el consumo de agua potable.

En temas regulatorios la normativa colombiana establece parámetros estrictos para la gestión de agua residuales, de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984 se establecen los criterios de calidad para la descarga de aguas residuales a los cuerpos de agua (Bogotá, 1984), sumado a esto, la resolución 631 de 2015 establece los parámetros y valores máximos en los vertimientos puntuales de cuerpos de agua y alcantarillado público (sostenible, 2015).

Algunas normativas adicionales que se consideran para el manejo de residuos hospitalarios, acorde al Manual de Gestión Integral de Residuos (Mora & Berbeo, 2010) son la Ley 9 de 1979 – Ley nacional sanitaria, expedida por el Ministerio de Salud, la cual dicta medidas sanitarias a edificaciones, instituciones públicas, entre otros. El Decreto 1594 de 1984, el cual establece la exigencia del permiso de vertimientos líquidos, Ley 373 de 1993, en la cual se reglamenta el Programa de Ahorro y Uso eficiente del Agua, Decreto 2676 del 2000, en el cual se reglamenta la Gestión Integral de los Residuos Hospitalarios y Similares, entre otros.

Ahora bien en el contexto específico del transporte de agua designada como peligroso, el decreto 4741 de 2005 (pública, 2005) fija las disposiciones para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos, en el caso de los condensados, esta normativa puede ser relevante, ya que, estos contienen contaminantes que requieren un manejo especial para evitar riesgos ambientales y sanitarios, seguido a esto y como razón del 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS donde establece el agua limpia y de saneamiento, en ese orden de ideas, el agua aunque sufre un tratamiento también hace parte como una materia prima empleada para un proceso, lo

que con lleva a la contabilidad de la gestión del agua, esta contabilidad contempla, puntos importantes como la escasez del agua y el agua para las empresas, junto con otras preocupaciones a las que se enfrentan otros países (Olusanmi, Emeni, Uwuigbe, & Oyedayo, 2021).

La reutilización de estos condensados en procesos de esterilización representa un beneficio para optimizar los recursos hídricos, reducir los costos operativos y fortalecer la sostenibilidad ambiental, una de las fuentes de contaminación presente en esta agua de condensado y considerada como desecho peligroso son los patógenos que podría llevar, ya que, el proceso de esterilización se lleva a cabo con residuos hospitalarios, por lo que, el tratamiento de esta agua debe ser una eliminación física y química de contaminantes, eliminación de patógenos y compuestos biodegradables, esto como formación de una barrera de contaminación al medio ambiente (Kirch, 2008).

Para esto se desarrollan diferentes procesos en los cuales se encuentra el tratamiento avanzado que involucra implementación de procesos, y tratamiento secundario donde se reducen las cargas orgánicas, presencia de metales y patógenos del agua residual. Dentro de estos tratamientos existen técnicas como el intercambio iónico, oxidación avanzada y membranas (Ortega & Rodríguez, 2021), el uso adecuado de estos procesos hará que se tenga una buena esterilización, considerándose estéril cuando la probabilidad de encontrar unidades contaminantes es  $\leq 10^{-6}$  (CIB, s.f.), por eso es que mediante un tratamiento del agua residual, puede llevar a una mayor reutilización del agua, por lo que el ministerio de ambiente y del medio Rural y Marino, propone una clasificación de regeneración enmarcada en 4 categorías, donde cada tratamiento puede llevar una serie de procesos, por lo que, si la calidad requerida no es alta, el tratamiento puede reducirse hasta llegar a una simple filtración y desinfección lo que sería el tratamiento 3 (Rodríguez, 2022).

Un caso relevante es el de hospitales europeos donde han desarrollado un sistema de tratamientos de condensados mediante filtración avanzada y membranas, logrando así una reducción del 40%, en el uso de agua en sus procesos de esterilización. (Association, 2022), otro aspecto es la implementación de tecnologías inteligentes en la gestión del agua, cómo sensores LoT y plataformas de análisis de datos, las cuales han sido útiles para garantizar el cumplimiento normativo (Forum, 2023), de acuerdo con el programa de naciones unidas para el medio ambiente, la reutilización de aguas residuales tratadas puede contribuir a la reducción del estrés hídrico (UNEP, 2021).

En cuanto a los términos de viabilidad económica, implementar un tren de tratamiento de aguas condensados para reutilización en autoclaves presenta un entorno atractivo, comparado con los costos actuales de adquisición de agua potable y disposición de condensados, algunos autores como Jonson y Kaplan hablan acerca de los costos indirectos y el nacimiento del ROI (Castillo & Sanchez, 2014), por lo que es importante tener un sentido a bajo coste en dado caso que no se cuente con recursos financieros (Mahmoud & Abdelazim, 2023), esto sumado a un caudal confiable en la implementación del proceso de esterilización (S.A, 2015), todo esto generará una implementación adecuada de estas tecnologías y uso efectivo en el proceso del desarrollo de tren de agua.

Adicionalmente actualmente la forma en cómo se emplean los recursos naturales en las actividades productivas es un tema que ha tomado fuerza en los últimos años, esto debido a que los recursos cada vez son más pocos y las exigencias para aprovecharlos de forma correcta son más altas. Tanto los individuos como las naciones son actores importantes en cuanto al uso y aprovechamiento de los recursos naturales, es por lo que Colombia como nación se ha suscrito a diferentes tratados para la protección de los recursos naturales. Acorde al Ministerio de ambiente, Colombia se encuentra actualmente suscrito a convenios como el Convenio de Diversidad Biológica, el cual tiene como objetivo promover medidas que

conduzcan a un futuro sostenible (Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2020), el Convenio de Basilea sobre el movimiento a través de las fronteras sobre desechos peligrosos y el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Así como las naciones tienen un papel importante en el cambio climático, las organizaciones también lo tienen, al ser estas principales usuarias de los recursos naturales para sus procesos productivos. Según González, Castillo e Ivanova (2019), en el ecosistema empresarial existen organizaciones que aún se resisten a la aplicación de medidas de protección ambiental en sus actividades, otras que son pasivas y otras que actúan de forma comprometida y positiva frente a las acciones de protección. Ahora bien, es crucial entender que los recursos son finitos, por lo cual es importante tomar medidas que mitiguen los impactos y sean sostenibles tanto económica como ambientalmente.

En conclusión, la reutilización de condensados en procesos de esterilización genera una oportunidad para optimizar los recursos hídricos, reducir costos de operación, y fortalecer la sostenibilidad ambiental en el entorno empresarial, por esto es fundamental realizar un análisis integral de viabilidad económica, considerando lo mencionando anteriormente como las regulaciones y estándares de calidad aplicables.

## **Marco institucional**

Veolia, establecida en Aubervilliers, Francia, se erige como una corporación multinacional de vanguardia en la provisión global de soluciones ambientales sostenibles, manteniendo operaciones sustanciales en Colombia. Su enfoque medular se articula en torno a tres dominios estratégicos: la administración del agua, la gestión de residuos y los servicios energéticos, ofreciendo soluciones integrales y personalizadas para los sectores industrial, municipal, comercial y gubernamental. (Veolia, 2025)

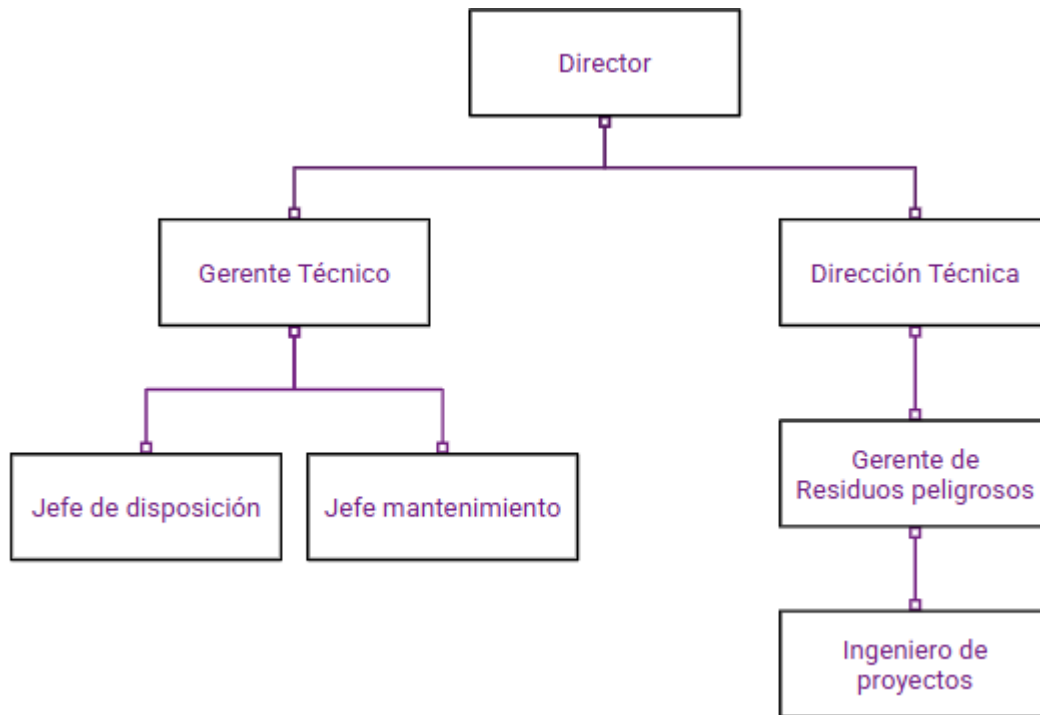
La estructura administrativa de Veolia, al igual que la de cualquier otra organización, representa la jerarquía y las funciones de los departamentos, evidenciando el nivel de autoridad de cada uno.

En Veolia Servicios Industriales, una de las unidades de negocio se especializa en la gestión integral de recursos industriales, incluyendo agua, residuos y energía, con la finalidad de apoyar a las industrias en su transición hacia prácticas sostenibles. La unidad opera bajo una estructura organizacional basada en procesos de tratamiento, agrupando al personal según sus tareas y funciones específicas dentro de cada línea de tratamiento.

Según lo anterior la estructura asignada para la ejecución del proyecto es la siguiente:

## **Figura 1**

*Estructura del proyecto*



La misión primordial de Veolia consiste en dotar al mundo de recursos esenciales, asistiendo a sus clientes en la superación de sus desafíos ambientales y de sostenibilidad en las esferas de la energía, el agua y los residuos. Esto implica la optimización de la eficiencia energética de sus clientes, la gestión mejorada de sus recursos hídricos y aguas residuales, y la recuperación de recursos a partir de sus desechos. (Veolia, 2025)

La visión de Veolia se fundamenta en consolidarse como un aliado estratégico para sus clientes, aportando soluciones sostenibles e innovadoras, y contribuyendo de manera activa al acceso y la renovación de los recursos.

En consonancia con lo expuesto, los objetivos del presente proyecto se alinean de manera precisa con la misión y visión de Veolia, particularmente en lo que respecta a la mejora de la gestión del agua, con el propósito de abordar el desafío del costo de adquisición y disposición que actualmente se enfrenta, mediante la implementación de una solución innovadora para el

reúso del agua que pueda ser aplicable a esta clase de procesos a lo largo del territorio nacional.

En el área de gestión de residuos, Veolia proporciona soluciones seguras y eficientes para el manejo de desechos en los sectores industrial, comercial y gubernamental. Su enfoque se basa en la minimización, el tratamiento, el reciclaje y la disposición final responsable de los residuos, incluyendo aquellos considerados peligrosos y regulados. Con una amplia experiencia y tecnología de vanguardia, la compañía ofrece servicios de valor que protegen tanto a las personas como al medio ambiente. En Colombia, Veolia opera una red de ocho parques a nivel nacional dedicados al almacenamiento y disposición final de residuos peligrosos, brindando a la industria soluciones que cumplen con la normatividad ambiental vigente. Este compromiso con el cumplimiento normativo y la protección ambiental se traduce en una gestión responsable de los residuos, contribuyendo a la creación de un entorno más saludable y sostenible. (Veolia, 2025).

En el ámbito de la gestión del agua, Veolia se destaca por su compromiso con la innovación y la eficiencia. Para el sector industrial, diseña e implementa soluciones a la medida que minimizan el impacto ambiental de las operaciones, promoviendo un crecimiento industrial más ecológico y responsable. Estas soluciones abarcan desde el tratamiento y la reutilización del agua hasta la optimización de los procesos de consumo, contribuyendo a la conservación de este recurso vital. En el sector municipal, Veolia aborda el desafío de la gestión de los recursos hídricos con un enfoque integral que abarca todo el ciclo del agua. Desde la captación y potabilización hasta la recolección, tratamiento y posterior reutilización de aguas residuales, la compañía implementa tecnologías avanzadas y sistemas de monitoreo constante para garantizar la calidad y la disponibilidad del agua para las comunidades. Este enfoque holístico busca no solo satisfacer las demandas actuales, sino también asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo. (Veolia, 2025).

**Figura 2**

*Áreas de gestión de Veolia*



## **Metodología**

### **Primer nivel**

El alcance de la siguiente investigación está en la definición de los parámetros de entrada requeridos en la caldera, el análisis de los parámetros de salida del agua de condensado, el diseño de un tren de tratamiento, definición de costos de la operación del tren de tratamiento y comparación con los costos actuales que tiene la unidad de negocio, referente a la adquisición del agua y el transporte y tratamiento de los residuos generados en la misma, para definir si es viable o no la ejecución de esta. Considerando los objetivos establecidos en la presente

investigación, el enfoque metodológico será de tipo cuantitativo, dado que se centra en la medición y el análisis de variables específicas para determinar la viabilidad del reúso del agua de condensado.

## ***Enfoque, alcance y diseño de la investigación***

### ***Definición de Variables***

A continuación, se definen las variables relevantes para el análisis de información, las cuales son fundamentales para comparar los costos actuales y los costos de la alternativa que se quiere proponer para la optimización de los costos:

- **Costo del metro cúbico en el proceso:** Aquí se definirá el costo que se tiene actualmente por la compra de agua potable, el costo por el transporte del agua de condensado y el costo de disposición de esta.
- **Caudal de tratamiento:** Se analizarán los metros cúbicos (m<sup>3</sup>) generados por hora, día, semana y mes. Esto permitirá conocer el comportamiento de la generación, identificar los puntos de generación máxima y mínima, y definir el caudal de diseño adecuado para el tren de tratamiento de agua, así como evaluar si es suficiente teniendo en cuenta los requerimientos del proceso.
- **Parámetros de diseño de la planta de tratamiento:** Se determinarán las variables características del agua residual a tratar. Esto permitirá evaluar su comportamiento en un período de tiempo específico y seleccionar las unidades de tratamiento adecuadas, de acuerdo con los requerimientos de entrada del agua para caldera. Entre los parámetros a medir se incluyen: acidez, alcalinidad, cobre, conductividad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), cloruros, dureza total, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, pH, fosfatos, hierro y sílice

- **Costo de inversión:** Una vez diseñado el tren de tratamiento, en función de los resultados de los parámetros de diseño, se calculará el costo de inversión, incluyendo equipos de laboratorio.
- **Costos de operación:** Se definirán los costos de operación asociados al tren de tratamiento, que incluyen personal operativo, productos químicos, insumos de laboratorio para análisis, disposición de residuos generados y mantenimiento del tren de tratamiento.

Con base en la medición y definición de estas variables, se comparará el costo actual por metro cúbico en cada una de las plantas, con el costo por metro cúbico tratado. Esto permitirá determinar la viabilidad económica del reúso de agua potable, así como de verificar si es posible su implementación en otras plantas.

## Definición operacional

Dimensión: Colombia – Medellín & Cali

## Figura 3

Definición operacional de las variables a considerar



*Nota:* Unidades monetarias por metro cúbico ( $\$/m^3$ ), unidades monetarias por kilómetro recorrido ( $\$/km$ ), Metros cúbicos generados por año ( $m^3/año$ ), VPN (Valor Presente Neto), OPEX (Operational Expenses – Gastos Operativos)

Figura 4

## Definición operacional de las características del agua

| Variable                                    | Definición operacional                   | Variable                           | Definición operacional          |
|---|--|------------------------------------|---------------------------------|
| <b>ALCALINIDAD TOTAL</b>                    | Titulación con un ácido fuerte           | <b>DUREZA TOTAL</b>                | Fotometría / colorimetría       |
| <b>COBRE TOTAL</b>                          | Colorimetría UV-Vis                      | <b>GRASAS &amp; ACEITES</b>        | Disolvente orgánico             |
| <b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO - DBO5</b> | Método Electrométrico                    | <b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES</b> | Filtración                      |
| <b>DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO-DQO</b>       | Método de Reflujo cerrado - Colorimetría | <b>PH</b>                          | Potenciómetro o papel indicador |
| <b>CLORUROS</b>                             | Colorimetría                             | <b>FOSFATOS</b>                    | Digestión + colorimetría        |
|   | <b>HIERRO</b>                            |                                    | Colorimetría                    |
|   | <b>SÍLICE</b>                            |                                    | Colorimetría                    |

## Población y Muestra

La población que se estudiará en el proyecto son dos plantas de tratamiento de agua, las cuales son proyectos activos de la compañía. Gracias a esto, podemos tomar datos actualizados que permitan una estimación más acertada para efectos del proyecto presente.

### - Planta 1: Ubicación – Medellín

En la planta 1 se ejecutan procesos de esterilización de residuos hospitalarios por medio de una autoclave, se emplea el agua potable para su funcionamiento. El agua potable necesaria para la ejecución se transporta con carrotanques al lugar donde está ubicada la planta. Los condensados deben ser trasladados a Manizales para su disposición final. El agua requerida para el funcionamiento del sistema es de 0,4 m<sup>3</sup>/ton, para esterilizar. En cuanto al agua generada en la planta de tratamiento: 0,3 m<sup>3</sup>/ton esterilizada.

## - **Planta 2: Ubicación – Cali**

En la planta 2 se ejecutan procesos de esterilización de residuos hospitalarios por medio de una autoclave, se emplea el agua potable para su funcionamiento. El agua potable necesaria para la ejecución se transporta con carrotanques al lugar donde está ubicada la planta. Los condensados deben ser trasladados a Manizales para su disposición final.

El agua requerida para el funcionamiento del sistema es de 2 0,5 m<sup>4</sup>/ton, para esterilizar. En cuanto al agua generada en la planta de tratamiento: 0,4 m<sup>3</sup> /ton esterilizada.

## **Segundo nivel**

### ***Selección de métodos o instrumentos para recolección de información***

El siguiente desarrollo de la investigación tiene como enfoque un estudio cuantitativo donde se pueda realizar un análisis estadístico riguroso, para este análisis se han seleccionado tres técnicas principales para la recolección de información de esta, donde se tiene presente:

1. El análisis de contenido: Se empleará con el fin de hacer la revisión de documentos, calidad de agua y salida, caudales requeridos, caudales generados, con la finalidad de establecer frecuencias, categorías y patrones específicos para definir los parámetros de diseño.
2. Evaluación y diseño: Se realizarán por medio de un balance y selección de unidades para obtener el agua a la calidad requerida.

3. Análisis y comparación: Se determinarán los costos y se compararán las variables vistas en la figura 1, para obtener la respuesta a la pregunta de la presente investigación.

***Técnicas de análisis de datos***

De acuerdo con el enfoque de la investigación se llevará a cabo el análisis de datos cuantitativo visto en la siguiente tabla

**Tabla 1**

*Análisis cuantitativo*

| <b>Tipo de análisis</b> | <b>Descripción</b>   | <b>Aplicación de la investigación</b>  |
|-------------------------|--|--|
| Análisis univariado     | Se establece una medida mediante el estudio de tendencia central y dispersión. | Caracterización de variables independientes y dependientes                   |
| Análisis bivariado      | Identifica las relaciones entre dos variables                                  | Relación entre comportamientos observados en las pruebas estandarizadas      |
| Análisis multivariado   | Relaciona el comportamiento entre tres o más variables                         | Evaluación conjunta de variables predictoras y los resultados de las pruebas |
| Prueba de hipótesis     | Determinación de resultados estadísticamente significativos                    | Aplicación de t student, Anova u otro empleando el software ValidaR          |

| Tipo de análisis        | Descripción   | Aplicación de la investigación                                |
|-------------------------|---|---|
| Análisis de frecuencias | Conteo de ocurrencias o categorías                      | Empleo de análisis de contenido y observaciones estructuradas |
| Análisis de regresión   | Predicción de valores de una variable a partir de otras | Uso potencial en dado caso de emplear inferencia descriptiva. |

Cómo se puede apreciar en la tabla 1, se contemplan diferentes tipos de análisis, por lo que, en el **análisis univariado**, se usarán medidas de tendencia central como (media, mediana y moda) y dispersión (desviación estándar, rango y varianza) con la finalidad de caracterizar los parámetros obtenidos en las caracterizaciones realizadas al agua, esto con la finalidad de detectar datos atípicos, adicionalmente se incorporará el uso del percentil 90 (P90), con la finalidad de identificar valores elevados, esto fortalecerá la precisión de análisis, identificando así los extremos superiores, esto es necesario cuando se están evaluando el tratamiento de los condensados o consumos en autoclave (Villegas, 2019). Seguido a esto se contemplan variables como costo del agua potable comprada actualmente lo que permitirá establecer la línea base del gasto actual, otra variable será el costo operativo del tratamiento de condensados donde se podrá observar el gasto continuo, otra variable está el costo de la implementación del sistema de tratamiento de condensados donde se contemplarán costos iniciales como inversión inicial en equipos, instalaciones, entre otros, esto permitirá una panorama de la inversión requerida, el volumen de agua potable utilizada, se analizará la cantidad de agua potable consumida en los autoclaves y contrastará con el volumen de condensados generados . En el **análisis bivariado**, se podrá apreciar las relaciones entre

pares de variables y dependiendo de su escala de medición se aplicarán correlaciones de Pearson o Spearman para establecer la relación entre las variables, para finalizar se usará ANOVA en el desarrollo de análisis experimental en cuanto a las diferencias significativas, en la investigación se verá reflejado en la relación entre volumen de condensados tratados y el ahorro de la compra de agua potable, para ellos se identificará la relación positiva entre la cantidad de condensados que puedan ser empleados, otro tema es la relación entre el cumplimiento del agua en termino de calidad requeridos para el uso en el autoclave, otra parte es la relación entre el tiempo de funcionamiento de las autoclaves y el consumo de agua, allí se podría determinar si existe o no una relación entre la duración de los ciclos de esterilización con la cantidad de agua utilizada. En el **análisis multivariado**, podrá modelar el valor de una variable en dos o más independientes y el análisis de componentes principales (ACP) con el fin de reducir la dimensionalidad sin extraviar información de relevancia, en la investigación se podrán tener presentes variables como modelado de costos totales del sistema de tratamiento, donde se podría desarrollar un modelo de regresión múltiple teniendo como variable dependiente el costo es obtenido mediante variables independientes como la capacidad del sistema, la tecnología utilizada entre otros. El análisis de los factores que influyen en la calidad del agua tratada y reducción de la dimensionalidad de los parámetros de la calidad del agua teniendo presenta la cantidad de análisis o tamaño muestral de estos donde se pueden identificar la mayor variabilidad entre datos simplificando el análisis y la interpretación. Las **pruebas de hipótesis** serán claves para determinar si la calidad del agua tratada es significativamente diferente del agua potable requerida para autoclaves, donde será una hipótesis nula concluyendo así que no hay diferencias significativas utilizando pruebas estadísticas como t-Student determinando el rechazo o no de la hipótesis planteada, otro ítem que se podría contemplar es si la implementación de tratamiento de agua genera ahorros significativos en contraste con el agua comprada, para esto se debe comparar los costos

proyectados del sistema de tratamiento incluyendo la inversión inicial amortizada y costos operativos con los costos actuales de la compra de agua, para finalizar otra prueba de hipótesis que se puede contemplar es compara los costos operativos bajo diferentes condiciones. **Análisis de regresión**, en este análisis se podrá contemplar un técnica de predicción, por lo que, se podrá anticipar valores futuros de una variable dependiente a partir del comportamiento de una independiente, se asegurará mediante el análisis de residuos, la prueba de homocedasticidad (varianza constante de los errores) y la detección de la multicolinealidad (alta correlación entre variables independientes), esto con la finalidad de tener modelos robustos que aseguren la interpretación de los hallazgos en temas de la investigación se podrá comprender la predicción de ahorros a largo plazo, donde se desarrollaría un modelo que predijera los ahorros anuales generados por el sistema de tratamiento en función de las variables del volumen de condensados tratados, el precio del agua potable y valores operativos del sistema, otro tema de investigación contempla el análisis de sensibilidad de los costos, donde se identifican como los cambios en las variables del precio del agua potable, costos de energía o volumen de condensados generados afecta los costos totales y los ahorros en el sistema de tratamiento de agua, un tercer estudio en la investigación sería la optimización del sistema, donde se recopilan datos detallados sobre el rendimiento bajo diferentes condiciones operativas allí se podría identificar las condiciones óptimas que aumentan la eficiencia del tratamiento y minimizan los costos , en conclusión se contempla un análisis donde se puedan abordar diferentes objetivos de la investigación de manera detallada y sistemática. El análisis univariado proporcionara una descripción de las variables clave, el análisis bivariado y multivariado demostrarán las relaciones entre ellas, las pruebas de hipótesis determinarán la significancia estadística entre ellas, el análisis de frecuencias ofrecerá información variables relevantes con los análisis de regresión se observará la sensibilidad de los resultados. Todas estas técnicas proporcionan un soporte para

la validación económica sólida entre la implementación de un sistema de tren de tratamiento de condensados soportando la toma de decisiones y la fiabilidad de los instrumentos y sus conclusiones mediante la evidencia empírica del estudio.

## Análisis y discusión de los resultados

### 1. Definición de parámetros de diseño

Para la definición de los parámetros de diseño, se realizaron tres muestreos compuestos de ocho (8) horas en días no consecutivos, al agua de condensados proveniente del autoclave y se analizaron los parámetros listados en la tabla 2 para la determinación de los parámetros de diseño de la planta de tratamiento.

**Tabla 2**

*Resultados de los muestreos compuestos realizados al agua de condensado proveniente del autoclave*

| Variable   | Unidades                | Toma de muestras 01 | Toma de muestras 02 | Toma de muestras 03 |
|--|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Alcalinidad Total                                | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 105                 | 78,7                | 85                  |
| Cobre Total                                      | mg Cu/L                 | <0,0200             | 0,84                | 0,1                 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO <sub>5</sub> | mg O <sub>2</sub> /L    | 1184                | 835                 | 989                 |
| Demanda Química de Oxígeno–DQO                   | mg O <sub>2</sub> /L    | 2890                | 1820                | 2467                |
| Cloruros   | mg Cl-/L                | 49,7                | 36,7                | 42,1                |
| Dureza Total                                     | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 170                 | 49,5                | 98                  |

|                             |                       |      |        |      |
|-----------------------------|-----------------------|------|--------|------|
| Grasas y Aceites            | mg Aceites y Grasas/L | 6,61 | 29,9   | 15,3 |
| Sólidos Suspendedos Totales | mg SST/L              | 36   | 70,66  | 47   |
| pH                          | Unidades de pH        | 6,63 | 7,01   | 8    |
| Fosfatos                    | mg/l                  | -    | 0,0531 | 0,01 |
| Hierro                      | mg/l                  | -    | 5,91   | 6    |
| Sílice                      | mg/l                  | -    | 14,76  | 12   |

Con base en las directrices internas de la empresa y la información recopilada sobre el comportamiento del agua de condensado producida por el autoclave, se estableció que los parámetros de diseño del sistema de tratamiento de aguas se definirían utilizando el percentil 90 de los datos analíticos históricos. Esta decisión se fundamenta en la necesidad de asegurar una capacidad de tratamiento robusta, capaz de manejar las variaciones en la calidad y cantidad del agua de condensado, considerando así el 90% de los escenarios operativos observados. La aplicación del percentil 90 como criterio de diseño busca un equilibrio entre la optimización de la inversión en la infraestructura de tratamiento y la garantía del cumplimiento normativo y los estándares de calidad del agua tratada, minimizando el riesgo de sobrepasar la capacidad del sistema ante condiciones atípicas pero previsibles dentro del rango del comportamiento histórico del agua de condensado del autoclave.

**Tabla 3:**  
*Parámetros de diseño planta de tratamiento de aguas de condensado*

| Variable   | Unidades                | Percentil 90 |
|--|-------------------------|--------------|
| Alcalinidad Total                                | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 103          |
| Cobre Total                                      | mg Cu/L                 | 0.692        |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO <sub>5</sub> | mg O <sub>2</sub> /L    | 1145         |
| Demanda Química de Oxígeno–DQO                   | mg O <sub>2</sub> /L    | 2805.4       |
| Cloruros   | mg Cl <sup>-</sup> /L   | 48.18        |
| Dureza Total                                     | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 162.8        |
| Grasas y Aceites                                 | mg Aceites y Grasas/L   | 26.98        |

|                             |                |      |
|-----------------------------|----------------|------|
| Sólidos Suspendidos Totales | mg SST/L       | 45.9 |
| pH                          | Unidades de pH | 8    |
| Fosfatos                    | mg/l           | 531  |
| Hierro                      | mg/l           | 5.99 |
| Sílice                      | mg/l           | 12   |

## 2. Diseño del tren de tratamiento

### 2.1. Definición del volumen de tratamiento

De acuerdo con las especificaciones del manual de operación del autoclave utilizado para la esterilización de residuos hospitalarios, se establece un requerimiento de 0,4 metros cúbicos de agua por cada tonelada de residuo procesado. Considerando la capacidad nominal del autoclave, que asciende a 540 toneladas por mes, el volumen de agua necesario para llevar a cabo el tratamiento de la totalidad de los residuos hospitalarios durante un mes se calcula en 216 metros cúbicos. Este cálculo se deriva directamente de la multiplicación del requerimiento unitario de agua (0,4 m<sup>3</sup>/ton) por la capacidad mensual del autoclave (540 ton/mes).

Sin embargo, es importante destacar que el proceso de esterilización en autoclave genera una cantidad significativa de agua de condensado como subproducto. Según los datos proporcionados, la tasa de generación de agua de condensado es de 0,33 metros cúbicos por cada tonelada de residuo esterilizado. Esto implica que, operando a su máxima capacidad mensual de 540 toneladas, el autoclave producirá aproximadamente 178 metros cúbicos de agua de condensado por mes.

Para el diseño del tren de tratamiento de aguas residuales generadas por el autoclave, se ha considerado la implementación de un factor de seguridad del 30%. Este factor de seguridad se aplica al volumen total de agua generada en el proceso de esterilización (178 m<sup>3</sup>/mes), lo que resulta en una capacidad de diseño del tren de tratamiento de 230 metros

cúbicos por mes. La inclusión de este margen de seguridad tiene como objetivo asegurar que el sistema de tratamiento pueda manejar posibles variaciones en la carga de residuos o en los requerimientos de agua del proceso, garantizando así la eficiencia y la confiabilidad del tratamiento a largo plazo.

## 2.2. Parámetros de cumplimiento

Los parámetros requeridos para que el agua pueda ingresar a la caldera del autoclave se basan directamente en las especificaciones proporcionadas en su manual de operación. Este manual detalla las características fisicoquímicas que el agua debe cumplir para asegurar un funcionamiento eficiente, seguro y prolongado de la caldera. Entre los parámetros críticos especificados se encuentran la dureza total, el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de sílice, el oxígeno disuelto y la presencia de otros contaminantes como el hierro y el cobre (Nalco Water, 2009; ASME, 2010).

La dureza total del agua, referida a la concentración de iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), debe ser controlada o eliminada mediante procesos como la desmineralización o el uso de ablandadores de agua, con el fin de prevenir la formación de incrustaciones en las superficies de transferencia de calor de la caldera. Estas incrustaciones actúan como aislantes térmicos, reduciendo la eficiencia del intercambio térmico, aumentando el consumo de energía y pudiendo provocar sobrecalentamiento y fallas en los tubos de la caldera (Sanks et al., 2003).

El pH del agua de alimentación es otro parámetro fundamental. Un pH demasiado bajo puede causar corrosión en los materiales metálicos de la caldera y en las tuberías asociadas, mientras que un pH excesivamente alto puede favorecer la precipitación de compuestos alcalinos, generando depósitos no deseados (Crittenden et al., 2012).

La conductividad del agua es una medida indirecta de la concentración de sales disueltas (sólidos disueltos totales, TDS). Un nivel elevado de conductividad indica una mayor

concentración de TDS, lo que incrementa el riesgo de formación de depósitos y demanda purgas más frecuentes para mantener los sólidos dentro de los límites operativos recomendados (EPA, 2010).

El contenido de sílice es especialmente crítico en calderas de alta presión, ya que este compuesto puede volatilizarse con el vapor y depositarse posteriormente en los álabes de las turbinas, reduciendo su eficiencia, causando desequilibrios y aumentando el desgaste mecánico (Betz Laboratories, 1991).

El incumplimiento de estos parámetros puede comprometer seriamente la integridad de la caldera, acortar su vida útil y aumentar considerablemente los costos de operación y mantenimiento. Por esta razón, el manual de operación de la caldera del autoclave constituye la principal referencia normativa para garantizar la calidad del agua de ingreso.

**Tabla 4:**  
*Parámetros de entrada a la caldera*

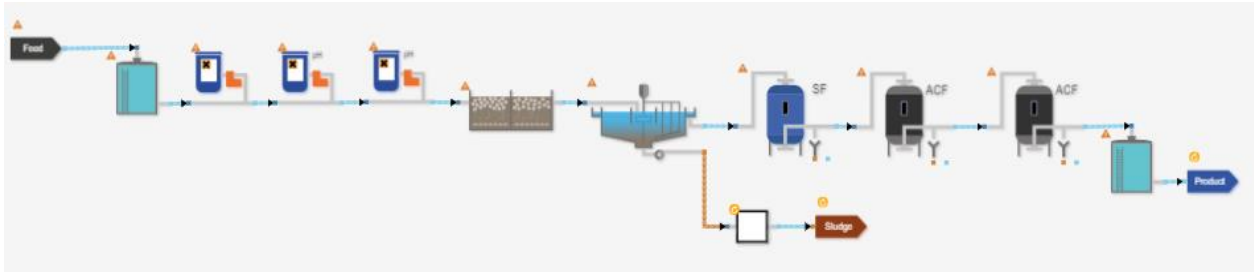
| Variable   | Unidades                | Percentil 90 |
|--|-------------------------|--------------|
| Alcalinidad Total                                | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 103          |
| Cobre Total                                      | mg Cu/L                 | 0.692        |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO <sub>5</sub> | mg O <sub>2</sub> /L    | 1145         |
| Demanda Química de Oxígeno–DQO                   | mg O <sub>2</sub> /L    | 2805.4       |
| Cloruros   | mg Cl-/L                | 48.18        |
| Dureza Total                                     | mg CaCO <sub>3</sub> /L | 162.8        |
| Grasas y Aceites                                 | mg Aceites y Grasas/L   | 26.98        |
| Sólidos Suspendidos Totales                      | mg SST/L                | 45.9         |
| pH   | Unidades de pH          | 8            |
| Fosfatos   | mg/l                    | 531          |
| Hierro   | mg/l                    | 6            |
| Sílice   | mg/l                    | 12           |

### 2.3. Diseño de la planta de tratamiento de aguas de condensado

Teniendo en cuenta los parámetros de entrada y salida descritos anteriormente y el volumen de diseño, se realizó por medio del software “Centaurus” la modelación de las unidades de proceso que se pueden usar para el tratamiento del agua de condensado generado en el autoclave, dando como resultado el siguiente tren de tratamiento:

## Imagen 1:

*Tren de tratamiento para aguas de condensado (Centaurus, 2024)*



El cual está compuesto por

- Tanque de homogenización
- Sistema de dosificación de neutralizante
- Sistema de dosificación
- Reactor MBBR
- Sedimentador
- Filtración de arena
- Filtración de carbón activado

En el tanque homogeneizador se lleva a cabo el proceso de estabilización de las cargas contaminantes y del caudal de agua que ingresará a la planta de tratamiento. La función principal de esta etapa es garantizar un flujo constante y una concentración homogénea de contaminantes, lo que facilita la eficacia de los procesos de tratamiento siguientes (Metcalf &

Eddy, 2014). Además, en este tanque se realizará una dosificación de neutralizante, con el objetivo de ajustar el pH del agua a niveles óptimos para el proceso biológico. También se contempla la adición de nutrientes como urea y ácido fosfórico que pueden ser necesarios para los microorganismos encargados de la remoción de materia orgánica, con el objetivo de asegurar su eficiencia y correcto funcionamiento (Tchobanoglous & Stensel, 2003).

Una vez homogeneizado, el efluente se envía al reactor MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor), donde se lleva a cabo la remoción de materia orgánica disuelta y particulada. En este reactor, la biomasa activa crece adherida a soportes plásticos en constante movimiento. Estos soportes incrementan la superficie disponible para el crecimiento microbiano, lo que mejora la actividad biológica y la eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos. El movimiento continuo de los soportes, generado mediante aireación, asegura una mezcla adecuada y un contacto eficiente entre los microorganismos, la materia orgánica y el oxígeno disuelto necesario para su metabolismo (Grady, Daigger & Love, 2011; Koch & Manser, 2012).

A continuación, el efluente del reactor se dirige al sedimentador, un equipo diseñado para separar los sólidos suspendidos que puedan haberse desprendido del biofilm o que no fueron eliminados en las etapas previas. La separación se realiza por gravedad, aprovechando la diferencia de densidades entre los sólidos y el agua. El diseño del sedimentador permite que el agua fluya a una velocidad lo suficientemente baja para que las partículas sólidas se asienten en el fondo, formando un lodo que posteriormente será retirado y gestionado adecuadamente (Foley & McCabe, 2007).

Finalmente, el agua clarificada pasa al sistema de filtración multimedia, compuesto por varias capas de materiales filtrantes con distintos tamaños de grano, como arena de sílice, grava y carbón activado. Su función es la remoción de partículas finas que pudieron haber quedado después de la sedimentación, así como en la adsorción de compuestos orgánicos residuales. Este proceso de filtración sucesiva garantiza la obtención de un efluente de alta

calidad, que cumple con los estándares requeridos para su reúso (Metcalf & Eddy, 1991; Crittenden et al., 2012).

Adicionalmente para la verificación de la eficiencia del proceso se realizó el balance de cargas, el cual se encuentra detallado en el Anexo I. Según las eficiencias teóricas estimadas para cada una de las unidades de tratamiento, se concluye que la calidad del agua tratada cumple con los requisitos establecidos para el ingreso al suavizador de la caldera, cabe precisar que es suavizador es el encargado de remover la dureza presente en el agua.

### 3. Análisis financiero

#### 3.1. Situación actual

Se reviso con la unidad de negocio los costos que actualmente se tienen por la gestión del agua requerida y generada del autoclave en el proceso de esterilización de residuos, estos incluyen la compra de agua potable, el transporte y disposición de esta dando como resultado los siguientes valores:

**Tabla 5:**

*Costo por m3 del agua usada en el proceso de esterilización*

|                          | Valor (anuales) |
|--------------------------|-----------------|
| Compra de agua           | \$ 202,694,400  |
| Transporte y disposición | \$ 374,892,923  |
| Total año (actual)       | \$ 577,587,323  |
| Caudal (m3/año)          | 2,592           |
| Valor por m3             | \$ 222,835      |

- Compra de agua: Actualmente, la planta no cuenta con un punto de acceso a agua potable, por lo que es necesario adquirirla para el proceso. Dado que la planta se encuentra ubicada en las afueras de la ciudad, el costo por metro cúbico se incrementa debido a los gastos de transporte.

- Transporte y disposición: El agua de condensados se clasifica como un residuo peligroso debido a sus características fisicoquímicas. El punto de disposición autorizado más cercano disponible para la empresa se encuentra en Manizales. El costo por metro cúbico incluye el valor del transporte desde la planta hasta dicho punto de disposición.

### **3.2. Inversión tren de tratamiento**

Se realizó la cotización del tren de tratamiento con un proveedor especializado para este tipo de infraestructuras, así como la estimación de costos de la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento

- CAPEX: En este valor se incluye la construcción, instalación y puesta en marcha de la planta de tratamiento, incluyendo obras civiles y eléctricas, así como los equipos de laboratorio para el seguimiento de los parámetros relevantes para control operativo como las eficiencias de la planta.
- OPEX: En este valor se incluyen los costos relacionados a:
  - o Personal operativo: Se están contemplando un operador en horario administrativo, teniendo en cuenta la automatización de la planta de tratamiento y un operador para el domingo.
  - o Química: En este rubro se están considerando los consumos mensuales de nutrientes (Fosforo y urea) y neutralizantes (Soda) para la operación de la planta.
  - o Análisis de laboratorio interno: En este rubro se incluyen los insumos requeridos para el plan de análisis interno que asegure el funcionamiento de la planta de tratamiento, el cual se detalla a continuación:

#### **Tabla 6:**

*Plan de análisis interno*

| Parámetro                    | Tanque homogenización<br>Frecuencia | MBBR1<br>Frecuencia | MBBR2<br>Frecuencia | sedimentador<br>Frecuencia | Salida Filtro de carbón<br>Frecuencia |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| DQO                          | Diario                              |                     |                     |                            | Diario                                |
| DQO soluble                  |                                     | Semanal             |                     | semanal                    |                                       |
| Dureza                       | Semanal                             |                     |                     |                            |                                       |
| Fosforo total                | Semanal                             |                     |                     | Semanal                    |                                       |
| Nitrógeno amoniacal          | Semanal                             |                     |                     | Semanal                    |                                       |
| Oxígeno Disuelto             |                                     | Diario              | Diario              |                            |                                       |
| Potencial de oxidorreducción |                                     |                     |                     |                            |                                       |
| pH                           | Diario                              | Diario              | Diario              | Diario                     | Diario                                |
| Solidos Sedimentables        | Diario                              |                     |                     | Diario                     |                                       |
| Solidos suspendidos totales  | Diario                              |                     |                     | Diario                     | Diario                                |
| Temperatura                  | Diario                              | Diario              | Diario              | Diario                     | Diario                                |

- o Análisis externo: Mensualmente se les hará seguimiento a los parámetros listados a continuación, así como la caracterización semestral a los parámetros de interés para verificar el cumplimiento de la planta de tratamiento.

**Tabla 7:**

*Plan de análisis externo*

| Medición                              | Cantidad | Frecuencia | Lugar de análisis |
|---------------------------------------|----------|------------|-------------------|
| Muestreo compuesto 8 horas            | 2        | Semestral  | Entrada y salida  |
| Muestreo compuesto 8 horas (DBO, SSV) | 12       | Mensual    | Entrada y salida  |

- o Disposición de lodos: Teniendo en cuenta la generación de lodos determinado por el programa se determinó el costo de transporte y disposición de los lodos generados por la planta de tratamiento.

- o Mantenimiento: En este rubro se tuvo en cuenta el stock de repuestos y el mantenimiento preventivo que se le debe realizar a la planta.
- o Compra de agua potable: Debido a las perdidas por evaporación que tiene el proceso, se debe realizar la compra de un 1,5% del agua requerida.

**Tabla 8:**

*Análisis de volumen*

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| Volumen agua requerida | 2,592.0m3/año |
|                        | 216.0m3/mes   |
|                        | 7.2 m3/día    |
| Volumen agua generada  | 2,119.0m3/año |
|                        | 178m3/mes     |
|                        | 5.9 m3/día    |
| Diferencia de agua     | 38m3/mes      |
|                        | 449.4 m3/año  |

Según lo anterior se realizó el análisis financiero de la implementación del tren de tratamiento dado lo siguiente:

**Tabla 9:**

*Costo por metro cubico después de la inversión*

|                     | Año 1                | Año 2         |
|---------------------|----------------------|---------------|
| Compra de la planta | \$ 200,000,000       | \$ -          |
| CAPEX laboratorio   | \$ 33,847,064        | \$ -          |
| <b>Total CAPEX</b>  | <b>\$233.847.064</b> |               |
| OPEX                |                      |               |
| Personal            | \$ 98,329,128        | \$ 99,819,798 |

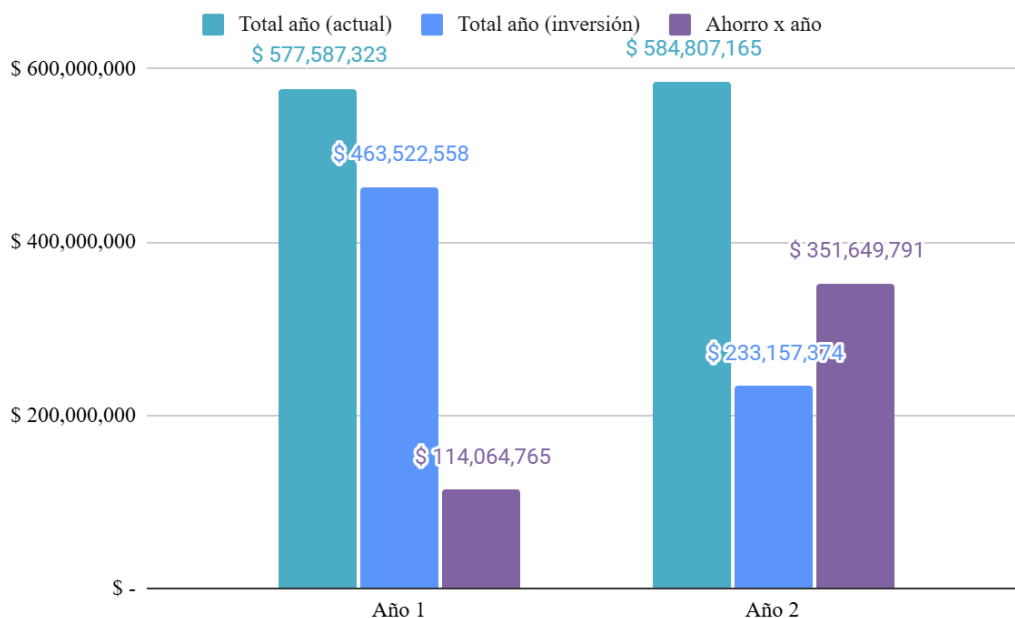
|                          |                       |                       |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Energía                  | \$ 29,250,521         | \$ 29,693,959         |
| Química                  | \$ 4,759,927          | \$ 4,832,087          |
| Plan de análisis interno | \$ 13,354,232         | \$ 13,556,682         |
| Plan de análisis externo | \$ 5,670,325          | \$ 5,756,287          |
| Disposición de lodos     | \$ 6,092,160          | \$ 6,184,517          |
| Mantenimiento            | \$ 37,077,060         | \$ 37,639,148         |
| Compra de agua           | \$ 35,142,142         | \$ 35,674,896         |
| <b>Total año</b>         | <b>\$ 463,522,558</b> | <b>\$ 233,157,374</b> |
| Caudal (m3/año)          | 2,592                 | 2,592                 |
| Valor por m3             | \$ 178,828            | \$ 89,953             |

## Comparación de alternativas

En la gráfica anterior se visualiza el valor por metro cubico el primer año con inversión \$178,828 y el segundo año después de la inversión \$89,953, comparado con el precio por metro cubico que se tiene actualmente el análisis preliminar de la alternativa la hace viable generando ahorros significativos por año, los cuales se visualizan en la gráfica a continuación:

### Gráfica 1:

*Ahorro por metro cubico*



**Tabla 10:**

VPN

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| VPN (Situación actual) | -\$1,763,163,848 |
| VPN (inversión)        | -\$899,061,272   |

Realizando una comparación de los resultados del VPN el mejor escenario es de -\$899,061,272 con respecto a los -\$1.763,163,848 del escenario actual.

Realizando una comparación con otra planta ubicada en Cali se obtiene lo siguiente:

**Tabla 11:**

*Comparación con planta de Cali*

|                          | Valor (anuales) |
|--------------------------|-----------------|
| Agua - Acueducto         | \$ 10,887,496   |
| Transporte y disposición | \$ 4.976.640    |
| Total año (actual)       | \$ 25.864.136   |
| Caudal (m3/año)          | 2,592           |
| Valor por m3             | \$ 9,979        |

### **3.3. Análisis de los resultados financieros**

Como indica la situación actual, el proceso de esterilización de los residuos cuenta con costos operativos anuales elevados, esto debido a que el lugar donde la planta se sitúa no tiene acceso a agua potable de forma directa, esta debe ser adquirida y transportada a la planta para su uso en el proceso. De igual manera, el agua de condensados (producto residual) necesita ser transportada a Manizales para su disposición final, incrementando así los costos asociados.

La implementación de un tren de tratamiento se presenta como una opción importante que ayudaría a reducir los costos operativos en un largo plazo. Durante el año 1, en el cual se pondría en marcha la construcción e implementación del tren de tratamiento, el valor por m<sup>3</sup> del agua sería de \$ 178,828 COP, sin embargo, una vez se completa la fase de construcción e implementación, el valor por m<sup>3</sup> del agua descendería a \$ 89,953 COP. Comparado con el valor actual por m<sup>3</sup> del agua, el ahorro a partir del año dos es superior al 59%, reflejando una mejora significativa en los costos asociados, esto debido a que se eliminarían costos de transporte y disposición final de residuos.

Al calcular el Valor Presente Neto (VPN), se evidencia que el VPN en la situación actual es de -\$1,763,163,848 COP, sin embargo, al ejecutar el proyecto, el VPN se reduce a -\$899,061,272 COP. A pesar de que el VPN es negativo en los dos escenarios debido a que corresponden a costos de la compañía y no ingresos, el VPN después de ejecutada la inversión representa una mejora de más del 49% con respecto al VPN de la situación actual, por lo cual hay ahorros representativos en esta operación y por ende la empresa ubicada en Medellín se ve beneficiada.

En comparación con la planta de tratamiento de Cali, el costo por metro cúbico en la situación actual es de \$ 9,979, mucho menor a la situación actual en Medellín y a la situación

una vez implementada la planta de tratamiento. La reducción significativa se debe a que la planta tiene acceso a un punto de agua potable en la ubicación, lo cual reduce los costos asociados a la operación drásticamente y la implementación de la planta no se hace viable debido a que incrementaría los costos por metro cúbico de agua.

En contraste, la implementación de una planta de tratamiento de agua para la reutilización de condensados en la ciudad de Cali se presenta como una opción económicamente inviable en el contexto actual. El análisis de costos revela que el precio por metro cúbico de agua en esta unidad de negocio es significativamente menor que el costo proyectado por metro cúbico posterior al tratamiento. Esta disparidad económica desaconseja la inversión en infraestructura de tratamiento en Cali, ya que los ahorros potenciales no justificarían la inversión inicial ni los costos operativos asociados. Por lo tanto, mientras que la reutilización del agua de condensado mediante tratamiento se presenta como una estrategia técnica y económicamente ventajosa en Medellín, las condiciones específicas del mercado y los costos del agua en Cali dictan una conclusión diferente. La viabilidad de implementar un sistema de tratamiento de agua para la reutilización de condensados está intrínsecamente ligada a las particularidades económicas y operativas de cada ubicación. En resumen, la reutilización del agua de condensado de la autoclave en Medellín ofrece una alta viabilidad técnica y económica, aportando eficiencia operativa, ahorros sustanciales y sostenibilidad ambiental al proceso industrial, mientras que, en Cali, las condiciones económicas actuales no favorecen esta inversión.

#### **3.4. Análisis de los resultados fisicoquímicos**

De acuerdo con los resultados obtenidos, se identifican varios aspectos en cuanto al desarrollo de este, como primer tema se tiene la comparación entre los parámetros del agua condensada en contraste con el agua de alimentación de caldera, este primer acercamiento muestra que el agua de condensado presenta similitudes al agua de alimentación, aún así, existen desequilibrios en la conductividad eléctrica, seguido a esto, variables como pH y dureza

se encuentre dentro de los rangos aceptables, sin embargo, el contenido de sílice y alcalinidad debe tener ajustes para cumplir con los requerimientos de la caldera, con esto se valida lo parámetros que requieren tratamiento.

En cuanto al diseño del tren de tratamiento, se propone un sistema de tratamiento, que incluye tratamiento biológico y filtración, este tren tiene como finalidad alcanzar los parámetros de calidad necesarios en cuanto a la alimentación de la caldera, teniendo una mayor concentración en la reducción de la demanda química de oxígeno y sólidos totales disueltos.

Para finalizar se identifica que el mecanismo de acción es técnicamente viable reutilizar el agua de condensado, ya que, sus características permiten un tratamiento eficiente y no hay una alteración o contaminación biológica alta, sumado a que esta reutilización reduce la demanda hídrica externa y contribuye a un proceso circular dentro de esta industria.

## Conclusiones

La implementación de un tren de tratamiento de agua para esta planta de esterilización de residuos hospitalarios por autoclave ubicada en la ciudad de Medellín, además de ser una solución técnica también es económicamente viable:

- Reduce costos operativos desde el primer año de puesta en marcha del proyecto, aumentando la reducción en un 59,65% una vez la fase de construcción se complete.
- Impacta positivamente el ambiente al reducir la huella de carbono evitando el transporte del agua potable requerida para el proceso de esterilización y transporte para la disposición final de los condensados.

- Mejora la operatividad y la autonomía de la planta ya que el tratamiento de los condensados se hará in situ, de igual manera, fortalece la sostenibilidad del proceso de esterilización.
- Disminuye los riesgos logísticos que implica el transporte del agua potable y la disposición final de los condensados.
- La viabilidad tanto técnica como económicamente en la reutilización del agua de condensado de la autoclave es alta, aportando eficiencia operativa, un ahorro significativo y sostenibilidad ambiental al proceso industrial.

### **Limitaciones y recomendaciones:**

- Se subraya la importancia de intensificar el seguimiento y análisis detallado de las características del agua de ingreso. Esta profundización en el conocimiento de la materia prima a tratar resulta crucial para llevar a cabo un pulimiento efectivo del tren de tratamiento que ha sido propuesto en la oferta.
- La limitación de tiempo y presupuesto impidió la realización de un mayor número de caracterizaciones durante la etapa de preparación de la oferta. Esta restricción representa una oportunidad de mejora significativa en las fases venideras del proyecto. Al invertir recursos en una caracterización más exhaustiva, se podrán obtener datos más precisos y representativos de la variabilidad en la composición del agua de ingreso.
- Un reto que se debe tener en cuenta es el alto costo de inversión que se debe tener para la implementación del tren de tratamiento
- Cumplimiento de las características de entrada es un reto que se debe tener en cuenta para la ejecución del tratamiento del agua, teniendo en cuenta que el

incumplimiento de los parámetros de entrada generaría sobrecostos en el mantenimiento

## Anexo I

### Cálculos

### Lista de Referencias

ASME (American Society of Mechanical Engineers). (2010). Consensus on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry in Modern Industrial Boilers. ASME Press.

Association, I. W. (2022). *IWA*. Obtenido de <https://iwa-network.org/publications/the-reuse-opportunity/>

Betz Laboratories. (1991). *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning (9th ed.)*. Betz Laboratories, Inc .

Bogota, A. m. (26 de Junio de 1984). *Alcaldíabogota.gov*. Obtenido de <https://www.alcaldíabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=18617>

Caballeros, S. F. (Junio de 2015). *VIABILIDAD ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS*. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/516/1/Sindy%20Fabiola%20Rossi%20Caballeros.pdf>

Castillo, A., & Sanchez, E. (2014). *Fundación universitaria los libertadores*. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/9e6d10c7-5904-4de7-a86d-5911ce34a24d/content>

CIB. (s.f.). *Consejo superior de investigaciones científicas*. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cib.csic.es/sites/default/files/inline-files/Documento%20web%20del%20servicio%20RECORTADO%20definitivo.pdf>

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012).

MWH's Water Treatment: Principles and Design (3rd ed.). Wiley.

Convenio sobre la Diversidad Biológica. (2020). *Decenio de las Naciones Unidas Sobre la*

*Biodiversidad*. Obtenido de Convenio sobre la Diversidad Biológica:

<https://www.cbd.int/undb/media/factsheets/undb-factsheets-es-web.pdf>

EPA. (2023). Water Reuse Action Plan. *United States Environmental Protection Agency*.

EPA (United States Environmental Protection Agency). (2010). Guidelines for Water Reuse.

EPA/600/R-12/618.

Foley, J., & McCabe, C. (2007). The Role of Sedimentation in Wastewater Treatment. *Water*

*Research*, 41(17), 3697-3705.

Forum, S. W. (2023). *Smart Water Networks Forum*. Obtenido de

<https://www.smartwatersummit.com/>

Grady, C. P. L., Daigger, G. T., & Love, N. G. (2011). *Biological Wastewater Treatment*. CRC

Press.

González Acolt, R., Castillo Rodríguez, J., & Ivanova Boncheva, A. (2019). *Prácticas*

*ambientales en empresas manufactureras de equipo de transporte en México*. Obtenido

de Revista Venezolana de Gerencia:

<https://produccioncientificaluz.org/index.php/rvg/article/view/31489/32572>

Hernández Sancho, F., Molinos Senante, M., & Sala Garrido, R. (2010). *Estudio de viabilidad*

*económica para el tratamiento de aguas residuales a través de un análisis coste*

*beneficio*. Obtenido de Research Gate :

[https://www.researchgate.net/publication/47554270\\_Estudio\\_de\\_viabilidad\\_economica\\_](https://www.researchgate.net/publication/47554270_Estudio_de_viabilidad_economica_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales_a_traves_de_un_analisis_coste_beneficio)

[para\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_a\\_traves\\_de\\_un\\_analisis\\_coste\\_beneficio](https://www.researchgate.net/publication/47554270_Estudio_de_viabilidad_economica_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales_a_traves_de_un_analisis_coste_beneficio)

- Kirch, W. (09 de Junio de 2008). *Springer Science+Business Media B.V. 2008*. Obtenido de <https://link-springer-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/referencework/10.1007/978-1-4020-5614-7>
- Koch, M. W., & Manser, S. (2012). *MBBR Technology: Design and Operation*. *Water Environment Federation*.
- Mahmoud, N., & Abdelazim, N. (2023). *Springer international publishing*. Obtenido de [https://bibliotecaean.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=cdi\\_askewsholt\\_s\\_vlebooks\\_9783031129025&context=PC&vid=57EAN\\_INST:57EAN&lang=es&search\\_scope=MyInst\\_and\\_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=any,contains,Cost%20water%20tr](https://bibliotecaean.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?docid=cdi_askewsholt_s_vlebooks_9783031129025&context=PC&vid=57EAN_INST:57EAN&lang=es&search_scope=MyInst_and_CI&adaptor=Primo%20Central&tab=Everything&query=any,contains,Cost%20water%20tr)
- Malik, A. H.-H. (2019). Recent advances in condensate water treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32.
- Mendez Gomez, M. P. (2014). Mejoramiento del tratamiento de desechos hospitalarios por esterilización en autoclaves. *Tesis de Grado para la obtención del Título de Ingeniería Química*. Quito UCE.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Ministerio de Ambiente. (2025). *Ministerio de Ambiente*. Obtenido de *Tratados Internacionales*: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-internacionales/tratados-internacionales/>
- Montes, Y., Guerrero, H., & Mayo, O. (Enero de 2018). Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n1/rtq01118.pdf>
- Muñoz González, E., Enríques Gaspar, A., Díaz Concepción, A., Cruz Bayo, A., & Rodríguez Piñero, A. (2018). *Análisis del proceso de esterilización por vapor*. Obtenido de *Revista Cubana de Ingeniería Vol. IX*: <https://www.researchgate.net/profile/Armando-Diaz->

Concepcion/publication/336774945\_Articulo\_Original\_Analysis\_of\_steam\_sterilization\_p  
rocess\_on\_autoclaves\_Study\_cases\_Este\_documento\_posee\_una\_licencia\_Creative\_C  
ommons\_ReconocimientoNo\_Comercial\_40\_Interna

Nalco Water. (2009). *The Nalco Water Handbook* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Olusanmi, O. A., Emeni, F. K., Uwuigbe, U. 2., & Oyedayo, O. S. (Enero de 2021). Obtenido de  
<https://www.proquest.com/scholarly-journals/bibliometric-study-on-water-management-accounting/docview/2614523992/se-2>

Ortega, A., & Rodriguez, N. (31 de Diciembre de 2021). *Scielo*. Obtenido de  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-81702021000200121](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702021000200121)

pública, F. (30 de Diciembre de 2005). *Función Pública*. Obtenido de  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>

Rodríguez, S. (2022). *Universidad politécnica de Madrid*. Obtenido de chrome-  
extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://oa.upm.es/73589/1/SONIA\_GUER  
RA\_RODRIGUEZ.pdf

Rossi Caballeros, S. F. (Junio de 2015). *VIABILIDAD ECONÓMICA PARA LA  
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS*.  
Obtenido de  
<http://www.repositorio.usac.edu.gt/516/1/Sindy%20Fabiola%20Rossi%20Caballeros.pdf>

Sanks, R. L., Tchobanoglous, G., & Bosserman, B. E. (2003). *Pumping Station Design* (2nd  
ed.). Butterworth-Heinemann.

S.A, I. A. (2015). *Acueducto*. Obtenido de chrome-  
extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-  
content/uploads/dlm\_uploads/2017/01/consultoria-planta-tratamiento-agua-tibitoc.pdf

Schneierson, S. (1972). *Sterilization by Heat*. Obtenido de International Anesthesiology Clinics :  
[https://journals.lww.com/anesthesiaclinics/citation/1972/01020/sterilization\\_by\\_heat.8.aspx](https://journals.lww.com/anesthesiaclinics/citation/1972/01020/sterilization_by_heat.8.aspx)

px

sostenible, M. d. (07 de Marzo de 2015). *Minambientegov*. Obtenido de Minambientegov:

chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf

Tchobanoglous, G., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.

UNEP. (2021). Obtenido de chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8390/-

Water%20and%20Wastewater%20Reuse\_%20An%20Environmentally%20Sound%20Approach%20for%20Sustainable%20Urban%20Water%20Management-20043596.pdf?seque

UNEP. (2021). Global Wastewater and Sludge Management: Policy drivers, technologies and financing. *United Nations Environment Programme*.

Veolia. (2025). *Veolia*. Obtenido de <https://www.latinoamerica.veolia.com/es>

Veolia. (2023). *Veolia*. Obtenido de <https://centaurus.veolia.com/login>

Veolia Water Technologies . (2025). *Recuperación de condensados*. Obtenido de

<https://www.veoliawatertechnologies.es/aplicaciones/recuperacion-de-condensados>

Wasserlab. (s.f). *Wasserlab*. Obtenido de <https://www.wasserlab.com/es/agua-pura/estandares-para-la-calidad-del-agua>