



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA

## Reutilización de agua depurada de la PTAR El Salitre, Bogotá, Colombia.

**Un ejemplo de economía circular.**

Treball realitzat per:

**Michelle Atala Urrea Vivas**

Dirigit per:

**Dr. Luis Seguí Amórtegui**

Màster en:

**Ingeniería Ambiental**

Barcelona, 23 de enero 2019

Departamento de Ingeniería de Proyectos y de la  
Construcción

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**



Nota aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma presidente del jurado

---

Firma presidente del jurado

---

Firma presidente del jurado

## RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”, está encargada de realizar diferentes procesos que permiten hacer una transformación del afluente que llega contaminado y convertirlo en un efluente que este ceñido en virtud de la legislación colombiana con los criterios de calidad para ser vertidos a un medio específico. Esta planta capta todas las aguas residuales de la parte norte de Bogotá las cuales se someten en primer lugar a una etapa inicial de pretratamiento seguido por un tratamiento primario para luego ser vertidas en el río Bogotá. Hasta el momento se tiene instalada una capacidad máxima para un caudal de 13 132 620 (m<sup>3</sup>/año). Esta planta tiene generación de subproductos como lodos y biogás los cuales representan hasta el momento una pérdida económica por ignorar su potencial como productos que pueden volver a un ciclo de suministro como materias primas.

El principal objetivo que plantea el presente trabajo es evaluar la factibilidad técnica- económica de diferentes propuestas de tratamiento de aguas residuales que permitan una regeneración y reutilización de las mismas para sectores industriales, comerciales y especiales (agricultura), los cuales son los que mayor demanda de agua potable utilizan para llevar a cabo su fin económico. Estas propuestas parten de la base de un análisis previo como lo son aspectos regulatorios, sociales, ambientales, tecnológicos y de explotación.

La valoración económica se realiza por el método de Análisis Costo- Beneficio (ACB) y en la técnica de Valor Actual Neto (VAN), el cual consta de poder maximizar todos los beneficios que trae consigo la implementación de tratamientos adicionales, siendo así, previamente se realizó una identificación de los costos privados de explotación y mantenimiento, así como aquellas externalidades positivas y negativas.

Esta tesis de maestría contiene 9 capítulos que desarrollan de primera mano una introducción, un análisis de los diferentes tratamientos existentes en Colombia, el marco normativo que rige el control de calidad de aguas residuales, así mismo, se realiza un análisis de cómo ha ido evolucionando la aplicación del concepto de economía circular y sus ventajas, se expone de igual forma el caso concreto de la planta de tratamiento el salitre y se detalla las propuestas de los diferentes trenes de tratamiento propuestos para desarrollar la metodología de análisis técnico económico que permitan obtener el máximo beneficio discutiendo los resultados obtenidos, para finalizar se plantean las diferentes conclusiones de la investigación que se realizó.

El estudio permitió establecer como principal resultado que el precio mínimo de venta del agua regenerada, necesario para recuperar todos los costos de producir 128 351 520 m<sup>3</sup>/año de agua

regenerada, es de 0,2378 €/m<sup>3</sup>, más sin embargo se optó por una reducción del 15 % sobre el valor actual del agua que pagan por fuente convencional y se obtuvo que de acuerdo a su clasificación de sector comercial deben pagar 5,48€/m<sup>3</sup>, sector industrial 4,79€/m<sup>3</sup> y sector especial 3,66€/m<sup>3</sup>. Este valor permite que la inversión realizada sea rentable según los criterios del valor actual neto (VAN).

La conclusión fundamental de esta tesis es la viabilidad técnica -económica de poder regenerar y reutilizar las aguas residuales, modificando el comportamiento de una economía lineal donde solo se capta, usa y desecha, por una donde se vuelve a incluir el agua ya usada como una nueva fuente de recurso. De esta manera, hay mayor rentabilidad tanto económica y ambientalmente la explotación de fuentes alternativas como lo son las plantas de tratamiento de aguas residuales, al uso de fuentes convencionales.

**Palabras claves:** economía circular, análisis técnico- económico, reutilización de aguas residuales tratadas, externalidades, costos de oportunidad, oferta y demanda de agua regenerada.

## ABSTRACT

The wastewater treatment plant "El Salitre" is responsible for carrying out different processes that allow a transformation of the effluent that arrives contaminated and turn it into an effluent that is tight by virtue of the Colombian legislation with the quality criteria to be discharged to a specific medium. This plant captures all wastewater from the northern part of Bogotá, which undergoes an initial stage of pretreatment followed by a primary treatment to be discharged into the Bogotá river. Up to now, a maximum capacity has been installed for a flow of 13132620 (m<sup>3</sup> / year). This plant has generation of by-products such as sludge and biogas which represent an economic loss so far because they ignore their potential as products that can return to a supply cycle as raw materials.

The main objective proposed by this paper is to evaluate the technical-economic feasibility of different wastewater treatment proposals that allow their regeneration and reuse for industrial, commercial and special sectors (agriculture), which are the ones that demand the most. of drinking water used to carry out its economic purpose. These proposals start from the basis of a previous analysis such as regulatory, social, environmental, technological and exploitation aspects.

The economic valuation is carried out by the Cost-Benefit Analysis (ACB) method and the Net Present Value (VAN) technique, which consists of being able to maximize all the benefits that the implementation of additional treatments brings, thus being previously an identification was made of the private costs of exploitation and maintenance, as well as those positive and negative externalities.

This master's thesis contains 9 chapters that develop first-hand an introduction, an analysis of the different treatments in Colombia, the regulatory framework that governs the quality control of wastewater, and an analysis of how it has evolved. the application of the concept of circular economy and its advantages, exposes in the same way the concrete case of the saltpeter treatment plant and details the proposals of the different treatment trains proposed to develop the methodology of economic technical analysis that will allow obtaining the maximum benefit discussing the results obtained, finally the different conclusions of the research that was carried out are presented.

The study allowed to establish as the main result that the minimum water sale price regenerated, necessary to recover all the costs of producing 128 351 520 m<sup>3</sup>/ year of water

regenerated, it is 0,2378 € / m<sup>3</sup>, but nevertheless we opted for a reduction of 15% on the current value of the water that they pay by conventional source and it was obtained that according to their classification of commercial sector they must pay 5,48 € / m<sup>3</sup>, industrial sector € 4,79 / m<sup>3</sup> and special sector € 3,66 / m<sup>3</sup> This value allows the investment made to be profitable according to the criteria of net present value (NPV).

The fundamental conclusion of this thesis is the technical-economic feasibility of being able to regenerate and reuse wastewater, modifying the behavior of a linear economy where it is only captured, used and disposed of, by one where the water already used as a new resource source. In this way, there is greater profitability both economically and environmentally exploitation of alternative sources such as wastewater treatment plants, to the use of conventional sources.

**Keywords:**

circular economy, technical-economic analysis, reuse of treated wastewater, externalities, opportunity costs, supply and demand of reclaimed water.

## Indice

RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	6
Capítulo 1. Introducción.....	13
Capítulo 2 Objetivos .....	15
2.1 Objetivos específicos:.....	15
Capítulo 3 Introducción al tratamiento de aguas residuales en Colombia .....	16
3.1 Conceptos fundamentales de Aguas residuales. ....	16
3.2 Tratamientos de aguas residuales existentes en Colombia .....	17
3.2.1. Tipos de tratamientos para la línea de agua .....	17
3.2.2. Tipos de tratamientos para la línea de lodos.....	25
3.3 Análisis actual de suministro de agua y alcantarillado.....	26
3.3.1 Red de abastecimiento.....	27
3.1.2 Red de alcantarillado.....	28
3.4 Marco normativo colombiano para tratamiento de aguas residuales .....	29
3.4.1 Decreto 2811 de 1974 .....	29
3.4.2. Ley 9 de 1979 .....	29
3.4.3. Resolución 1096 de 2000 .....	30
3.4.4 Decreto 1207 de 2014.....	31
3.4.5 Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura OMS.....	32
Capítulo 4. Gestión del agua residual en la planta de tratamiento el salitre.....	33
4.1. Sistema de saneamiento y funcionamiento.....	33
4.2 Funcionamiento de la red de saneamiento en Bogotá .....	34
4.2.1 Cuenca Salitre.....	35
4.2.2 Cuenca Fucha .....	35
4.2.3 Cuenca Tunjuelo.....	36
4.3 Descripción y análisis de la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales aplicado por la empresa acueducto agua y alcantarillado de Bogotá.....	36
4.3.1 Características principales de la planta: .....	38
4.3.2. Disposición final del agua tratada en la planta el salitre .....	45
Capítulo 5 Economía circular y gestión de tratamiento de aguas residuales. ....	46
5.1 Consideraciones económicas del tratamiento de aguas residuales con la aplicación del concepto de economía circular. ....	51
5.2 Evolución de la implementación de una economía circular en Bogotá, Colombia.....	52
Capítulo 6 Caso estudio: La reutilización de aguas tratadas en la ciudad de Bogotá .....	57
6.1 Aspectos generales.....	57

6.1.1 Colombia .....	57
6.1.2 Bogotá .....	60
6.2 Exigencias legales para la reutilización de aguas regeneradas en Bogotá .....	62
6.3 Exigencias legales para el uso de los lodos en Bogotá .....	66
6.4 Características del afluente y efluente en la PTAR “El Salitre” .....	67
6.5 Características del lodo de la PTAR “El Salitre” .....	68
Capítulo 7 Metodología.....	69
7.1 Propuesta de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la planta “El Salitre” ..	69
7.2 Selección de trenes de tratamiento .....	73
7.2.1 Funcionamiento de los tratamientos propuestos.....	73
7.3 Aspectos económicos.....	80
7.3.1 Análisis costo beneficio .....	80
7.4 Análisis y valoración de externalidades .....	82
7.5 Costos de la planta de tratamiento “El Salitre” ya existentes. ....	87
7.5.1 Costos de trenes para línea de agua y lodos.....	88
7.5.2 Oferta y demanda del agua regenerada y lodos .....	92
7.5.3 Precios del agua regenerada y lodos.....	94
7.5.4 Incentivos económicos .....	96
7.6 Proyección de posibles áreas para la reutilización del agua y lodos.....	97
7.7 Cálculos del precio mínimo de venta de la propuesta seleccionada .....	100
7.7.1 Infraestructura hidráulica para suministro de agua regenerada .....	101
7.7.2 Mayor disponibilidad de recurso y de subproducto .....	105
7.7.3 Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	106
7.7.4 Precio de venta de lodos .....	106
7.7.5 Costos de oportunidad .....	106
7.7.6 Beneficio total .....	107
Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones.....	110
Referencias.....	113

## Índice de gráficos

<b>Gráfico 3.1</b> Interacción de los servicios de suministro de agua y alcantarillado. ....	28
<b>Gráfico 6.1</b> Cadena de uso de agua. ....	58
<b>Gráfico 6.2</b> Distribución porcentual del uso de agua en Colombia. ....	59
<b>Gráfico 6.3</b> Porcentaje de uso de agua por sectores económicos y por área geográfica.....	59
<b>Gráfico 6.4</b> Ubicación geográfica de Bogotá. Fuente Google maps .....	60

## Índice de tablas

<b>Tabla 3.1</b> Ventajas y desventajas del tratamiento autónomo.....	20
<b>Tabla 3.2</b> . Ventajas y desventajas del tratamiento primario. ....	21
<b>Tabla 3.3</b> Ventajas y desventajas del tratamiento secundario.....	23
<b>Tabla 3.4</b> Ventajas y desventajas del tratamiento terciario. ....	25
<b>Tabla 3.5</b> Directrices recomendadas sobre calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura.....	32
<b>Tabla 6.1</b> Aspectos generales en Bogotá .....	61
<b>Tabla 6.2</b> Actividades económicas predominantes en Bogotá.....	61
<b>Tabla 6.3</b> Criterios de calidad para las alternativas de reutilización.....	64
<b>Tabla 6.4</b> Criterios de calidad para las alternativas de tratamiento de lodos .....	67
<b>Tabla 6.5</b> Caracterización del afluente y efluente 2017. ....	68
<b>Tabla 6.6</b> Caracterización de la salida de los lodos después del tratamiento 2017 .....	68
<b>Tabla 7.1</b> Alternativas para el tratamiento de aguas residuales “El salitre” .....	71
<b>Tabla 7.2</b> Alternativa para el tratamiento de lodos en la planta “El salitre” .....	72
<b>Tabla 7.3</b> Trenes propuestos para el tratamiento de la línea de agua y de lodos para la planta de tratamiento “El salitre” .....	77
<b>Tabla 7.4</b> Análisis de las externalidades consideradas en la propuesta.....	85
<b>Tabla 7.5</b> costo de la fase existente” El salitre” .....	88
<b>Tabla 7.6</b> Costos de ejecución, operación y mantenimiento tanto del agua como de lodos.....	88
<b>Tabla 7.7</b> Costos de inversión, operación, mantenimiento y de regeneración de agua por m <sup>3</sup> , opciones seleccionadas línea agua .....	91
<b>Tabla 7.8</b> Costo final de tratamiento de lodos.....	92
<b>Tabla 7.9</b> Precio por consumo de m <sup>3</sup> sectorizado.....	96
<b>Tabla 7.10</b> Precio por compra de lodos tratados.....	96
<b>Tabla 7.11</b> Alternativas de empresas para reutilización de aguas tratadas. ....	98
<b>Tabla 7.12</b> Alternativas de empresas para reutilización de lodos. ....	99
<b>Tabla 7.13</b> Datos para cálculo de precio mínimo de venta.....	100
<b>Tabla 7.14</b> Costos para la construcción de redes de suministro de agua por fase de 4 km .....	101
<b>Tabla 7.15</b> Costo de inversión total en redes de distribución y costo de distribución. ....	102
<b>Tabla 7.16</b> Costo total de producir y distribuir agua regenerada.....	102
<b>Tabla 7.17</b> Precio de venta de agua regenerada con descuento del 15 %. ....	102
<b>Tabla 7.18</b> Beneficios privados. ....	102
<b>Tabla 7.19</b> Cuantificación económica de las externalidades del proyecto.....	108

## Índice de figuras

<b>Figura 3.1</b> Desbaste de grueso y fino (IDM).....	19
<b>Figura 3.2</b> Columna de sedimentación y sus rendimientos tiempo vs profundidad. ....	21
<b>Figura 4.1</b> Esquema general de las cuencas de drenaje sanitario de Bogotá.....	34
<b>Figura 4.2</b> Ubicación geográfica de la planta el salitre con sus conexiones a las calles más importantes.....	37
<b>Figura 4.3</b> Vista superior de la planta de tratamiento de residuos el salitre.....	38
<b>Figura 4.4</b> Canal de entrada de agua residual de Bogotá. ....	39
<b>Figura 4.5</b> Funcionamiento de la toma de agua y bombeo.. ....	39
<b>Figura 4.6</b> Entrada de toma de agua residual y bombeo.....	39
<b>Figura 4.7</b> Tolva de recolección del proceso de cribado.....	40
<b>Figura 4.8</b> Canales para la extracción de grasa y arenas. ....	41
<b>Figura 4.9</b> Tanques decantadores y su conexión con la red de salida de lodos para espesar....	41
<b>Figura 4.10</b> Vista panorámica de los tanques decantadores.....	42
<b>Figura 4.11</b> Deshidratación del fango por filtro de bandas. ....	43
<b>Figura 4.12</b> Lodos obtenidos próximos a ser destinados para restauración de suelos. ....	43
<b>Figura 4.13</b> Localización unidades de tratamiento e instalaciones complementarias PTAR “El Salitre” .....	45
<b>Figura 5.1</b> Funcionamiento de la economía lineal vs economía circular. ....	47
<b>Figura 5.2</b> Reutilización de aguas residuales en la economía circular .....	50
<b>Figura 6.1</b> Ubicación espacial de Colombia.....	57
<b>Figura 7.1</b> Procesos de fangos activados tratamiento de aguas residuales.....	73
<b>Figura 7.2</b> Procesos de filtros percoladores tratamiento de aguas residuales.....	74
<b>Figura 7.3</b> Procesos de tanque de aireación tratamiento de aguas residuales.....	75
<b>Figura 7.4</b> Procesos de secado térmico de lodos en tambor rotativo.. ....	76
<b>Figura 7.5</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #1.....	78
<b>Figura 7.6</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #2.....	78
<b>Figura 7.7</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #3.....	78
<b>Figura 7.8</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #4.....	79
<b>Figura 7.9</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #5.....	79
<b>Figura 7.10</b> Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #6.....	79
<b>Figura 7.11</b> Etapas para el análisis económico de los diferentes tipos de trenes seleccionados para la regeneración y reutilización de aguas residuales. ....	81
<b>Figura 7.12</b> Distancia y ubicación geográfica de la empresa Sellopack a la planta de tratamiento “El Salitre”. ....	103
<b>Figura 7.13</b> Distancia y ubicación geográfica de la empresa licores de Cundinamarca a la planta de tratamiento “El Salitre” .....	103
<b>Figura 7.14</b> Distancia y ubicación geográfica de la empresa Papeles primavera a la planta de tratamiento “El Salitre” .....	104
<b>Figura 7.15</b> Distancia y ubicación geográfica del Campo de Golf La Florida a la planta de tratamiento “El Salitre” .....	104

## Capítulo 1. Introducción

La existencia del agua como un recurso no renovable abre la puerta al desarrollo de diferentes técnicas que permitan alargar la vida útil de este recurso, a pesar de que el agua es un bien de primera necesidad para todos los seres vivos se malgasta y se contamina de forma indiscriminada, debido a las actividades industriales, comerciales, agrícolas y residenciales que realiza el hombre.

Colombia, es uno de los 3 países junto a Brasil y Perú que se caracteriza por tener gran disponibilidad de recurso hídrico , pero debido a la contaminación ambiental y al cambio climático sea visto afectado el suministro de agua, según la Unesco (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) el manejo del agua no es sostenible esto indica que se consumen grandes cantidades y que a su vez se vierte las aguas residuales contaminadas a otros cuerpos de agua potable, generando un riesgo no solo de salud pública sino de disponibilidad del recurso a mediano plazo.

La Resolución 1096 de 2000 de la república de Colombia surgió como instrumento normativo de obligatoria aplicación dentro del territorio, para prestar un tratamiento a las aguas residuales e incluirlas de nuevo para su reutilización.

Esto trae consigo todo un escenario que permite analizar diferentes procesos para realizar la regeneración y reutilización de las aguas residuales donde logra darles solución a los problemas de contaminación y permite aumentar la disponibilidad de un recurso sin necesidad de sobreexplotar las fuentes convencionales (cuencas hidrográficas). Según afirmaciones del ministerio de agua y saneamiento de básico, Colombia logra realizar solo un 10 % de tratamiento de aguas residuales a pesar de que cuenta con una capacidad instalada de 20 % en las plantas. El verdadero problema radica en que estas plantas solo cuentan con un tratamiento primario donde solo se hace la eliminación de los sólidos la cual está en uso un 80%, seguida por un proceso secundario usadas un 44% (Ministerio del medio ambiente, 2015). Lo anteriormente descrito hace a un modelo de economía lineal donde inicia en un proceso de extracción y captación del agua para luego ser usado y finalmente vertido por medio de redes de alcantarillado o de forma no controlada. Caso contrario sucede con el modelo de economía circular donde el agua se utiliza tantas veces como sea posible, tal como sucede en su ciclo natural, generalmente esta reutilización va direccionada para el riego agrícola para procesos de enfriamiento de torres y para el uso industrial.

La planta de tratamiento “El Salitre” es la única que existe en Bogotá y es la que se encarga de tratar las aguas residuales que llegan por medio de los ductos de alcantarillado, inician con un pretratamiento seguido de un tratamiento primario a las aguas residuales que posteriormente se vierten en el río Bogotá, la capacidad instalada es para tratar un caudal aproximado de 13 132 620 m<sup>3</sup> / año (4,16 m<sup>3</sup>/s). La propuesta que se plantea de instalar un tratamiento secundario y terciario para la línea de aguas y un tratamiento adicional para los lodos obtenidos como subproductos son sometidos a una valoración económica determinando sus impactos asociados a la implementación y explotación, así como, la calidad final del efluente, la garantía de suministro, su distribución y aquellas externalidades que se puedan presentar. No obstante, con todos estos aspectos identificados se logra maximizar el beneficio total al hacer el tratamiento de las aguas residuales a un costo mínimo.

## Capítulo 2 Objetivos

Plantear una alternativa para la regeneración de aguas residuales de la planta de tratamiento “El Salitre”, evaluando la factibilidad de implementación y generando un análisis de Costo – Beneficio basado en aspectos regulatorios, económicos, sociales y ambientales que permitan hacer tránsito de un modelo económico lineal a un modelo de economía circular.

### 2.1 Objetivos específicos:

- Recopilar y revisar información técnica de la planta de tratamiento de aguas residuales “El Salitre”.
- Identificar y analizar diferentes metodologías para la aplicación de regeneración y reutilización de aguas residuales y sus subproductos derivados del proceso.
- Analizar cómo es el paso de un modelo lineal de tratamiento de aguas residuales a un modelo circular.
- Identificar y valorar los costos privados de la planta de tratamiento “El Salitre”
- Identificar y analizar las externalidades del sistema propuesto para el tratamiento de la Ptar.
- Determinar la viabilidad técnico-económica de la reutilización de agua regenerada de la planta de tratamiento “El Salitre” bajo un modelo de economía circular.
- Analizar la oferta y demanda actual por el agua regenerada y lodos así como sus posibles precios de venta.
- Establecer, analizar, cuantificar y valorar monetariamente las externalidades positivas y negativas del sistema de regeneración y reutilización de aguas residuales de la planta el Salitre.

## Capítulo 3 Introducción al tratamiento de aguas residuales en Colombia

### 3.1 Conceptos fundamentales de Aguas residuales.

Según la legislación Colombia, en su artículo 79 y 80 se establece la obligación que debe tener el estado con la protección e integridad del medio ambiente, conservando los recursos naturales y fomentando diferentes estrategias y métodos que permitan gozar de un equilibrio entre las personas y el medio ambiente que los rodea. Siendo así, se desprende el **Decreto 3930 de 2010**, relativa al tratamiento que se debe efectuar a las aguas residuales sin importar si son empresas públicas o privadas. Se establecen las siguientes definiciones:

- **Vertimiento:** Descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.
- **Vertimiento puntual:** El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo.
- **Vertimiento no puntual:** Aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua o al suelo, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.

Estos vertidos pueden tener tres tipos de procedencia las cuales son:

- Aguas residuales urbanas:** son aguas residuales domésticas, también se puede presentar como una mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas lluvias.
- Aguas residuales domésticas:** son aguas residuales procedentes de zonas de vivienda, dadas por las actividades domésticas.
- Aguas residuales no domésticas:** son aguas residuales vertidas por cualquier empresa que cumple una actividad comercial o industrial.

El término que se adecua al caso en concreto es “agua residual urbanas y domesticas”, ya que como se mencionó anteriormente, estas zonas no solo tienen un régimen residencial, sino que se establecen empresas artesanales.

Contaminantes que contienen las aguas residuales urbanas y domesticas

Generalmente las aguas domesticas están constituidas por:

- **Aguas que se generan en la cocina:** sólidos, materia orgánica, grasas, sales.
- **Aguas que se generan en lavados:** detergentes, nutrientes.
- **Aguas que se generan en los baños:** jabones, geles, champús.
- **Aguas negras, procedentes del metabolismo humano:** sólidos, materia orgánica, nutrientes, sales, organismos patógenos.

Contaminantes que contienen las aguas residuales industriales

**Aguas residuales industriales:** resultantes de actividades industriales que descargan sus vertidos a la red de alcantarillado municipal. Estas aguas presentan una composición muy variable dependiendo de cada tipo de industria.

## 3.2 Tratamientos de aguas residuales existentes en Colombia

Colombia es un país cuyo tratamiento de aguas residuales no es tan avanzado en comparación con otros países, se cuenta con un proceso de pretratamiento, un tratamiento primario y en muy pocos casos un tratamiento secundario. Partiendo de este hecho, se hace una revisión detallada de los diferentes tipos de tratamientos existentes en Colombia, identificando las ventajas y desventajas

### 3.2.1. Tipos de tratamientos para la línea de agua

El tratamiento de aguas residuales, es muy importante realizarlo debido a que luego del uso del agua, en actividades domésticas, agrícolas e industriales, su composición biológica se afecta.

La selección del tipo de tratamiento radica en la identificación de la concentración promedio de los diferentes contaminantes ya bien sea agua residual doméstica, industrial o agrícola, y a su vez los requisitos de cumplimiento establecidos en la ley colombiana.

Hoy en día, a nivel mundial se hace uso de un tipo de tratamiento, que consiste en hacer uso de microorganismos ósea bacterias que son las que se encargan de consumir la materia orgánica que contiene el agua y así mismo transformarla en lodos los cuales contienen más bacterias y generan a su vez dióxido de carbono. Antiguamente los lodos eran enviados a rellenos sanitarios, y hacía que el ciclo fuera lineal logrando solo reducir el uso de energía y de asegurar el envío de lodos a zonas adecuadas.

Con la aplicación del concepto de economía circular se logra conseguir que un bien llamado “agua residual” después de ser tratada vuelva a reintegrarse el ciclo hidrológico convirtiéndose nuevamente en recurso. Lo anteriormente dicho, aplica para los lodos obtenidos después del proceso de tratamiento de aguas residuales, los principales procesos asociados son el espesamiento que logra eliminar fracción líquida y aumentando el contenido sólido del fango y el proceso de estabilización logra reducir el volumen al digerirse la materia orgánica y hacer una producción de biogás por medio de un proceso de digestión anaerobia permitiendo que este fango sea reutilizado en actividades agrícolas, en industrias cementeras como combustible energético y en compostaje que se utiliza como fertilizante (Metcalf & Eddy, 2013). Esto fomenta e impulsa a que la reutilización del agua y sus derivados se convierta en nuevos recursos, generando un desarrollo sostenible y disminuyendo el impacto microeconómico de un gobierno que debe de invertir en la compra de los recursos hídricos.

Con la anterior explicación, es preciso definir aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos se conocen como operaciones unitarias, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza con base en procesos químicos o biológicos. Es preciso aclarar que las operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los tratamientos primario, secundario y terciario.

Es preciso aclarar que los procesos se clasifican de acuerdo con:

- **Procesos físicos:** son aquellos que logran la remoción de un porcentaje alto de material en suspensión por medio de rejillas, trituradores, sedimentador primario, espesadores y filtradores.
- **Procesos químicos:** es aquel proceso que involucra la aplicación de productos químicos para la eliminación o transformación de los contaminantes que se presentan en las aguas residuales, generalmente son procesos de precipitación, adsorción y desinfección.
- **Procesos biológicos:** este proceso se caracteriza gracias a la actividad biológica de los microorganismos la cual permite la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables, el nitrógeno y fósforo y ayuda a la producción de gases que posteriormente pueden ser reutilizados (Facultad de ingeniería sanitaria, 2016).

*3.2.1.1 Tratamiento preliminar:* Aunque no es un proceso en sí, sirven para aumentar la efectividad de los tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Las aguas residuales que fluyen desde los alcantarillados a las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), son muy variables en su flujo y contienen gran cantidad de objetos, en muchos casos voluminosos y abrasivos, que por ningún motivo deben llegar a las diferentes unidades donde se realizan los

tratamientos y deben ser removidos (Russell,2012). Para esto son utilizado los tamices, las rejas, los microfiltros, entre otros.

- **Desbaste de grueso y fino:** Los tamices están contruidos con mallas dispuestas en una inclinación particular que deja atravesar el agua y obliga a deslizarse a la materia sólida retenida hasta caer fuera de la malla por sí sola. La gran ventaja de este equipo es que es barato, no tiene partes móviles y el mantenimiento es mínimo, pero necesita un desnivel importante entre el punto de alimentación del agua y el de salida, (Torres,2010), tal como se ilustra en la figura 3.1.



**Figura 3.1** Desbaste de grueso y fino (IDM)

- **Canal de trampa de grasas y desarenador:** Una trampa o interceptor de grasa se diseña para separar físicamente la grasa y los sólidos de las aguas residuales. Las aguas residuales entran en una trampa o interceptor, el agua se va más despacio y las partículas de la grasa, que son menos densas que el agua, se unen y flotan dentro el tanque, (Degrémont,1999). Las partículas sólidas más pesadas decantan. El orificio de la trampa o interceptor se localiza cerca del centro del tanque para evitar que la grasa y los sólidos pasen a través del tanque.
- **Trituradores de canal:** Reduce los sólidos de aguas servidas con sus poderosos trituradores dobles y una avanzada tecnología de barrido. Se emplean para triturar los sólidos gruesos con objeto de mejorar las operaciones y procesos que se llevan luego a cabo y para eliminar los problemas que producen los diferentes tamaños de los sólidos presentes en el agua residual. Los sólidos se Trituran para conseguir partículas de tamaño menor y más uniforme.

3.2.1.2. *Tratamientos autónomos*: son procesos sencillos para pequeñas y medianas comunidades. Los sistemas pueden bien sea ser un tanque Imhoff o una Fosa séptica, este método se caracteriza ya que combina una zona de sedimentación en la parte superior, removiendo los sólidos suspendidos del afluente y en su parte inferior tiene una zona de digestión de lodos en donde se realiza la estabilización biológica de los mismos a través de un proceso anaerobio, y una zona de ventilación en donde se liberan los gases producidos por la digestión realizada en el fondo del tanque o de la fosa. Este proceso autónomo va acompañado posteriormente de un sistema de franjas de infiltración que contribuye por medio de su medio poroso (grava), y finalmente un lecho de secado de lodos que va drenando el agua que sale de estos para pasar por un medio poroso para ser direccionado a las franjas de infiltración.

Ventajas	Desventajas
Bajos costos	Difícil construcción en suelos muy permeables o con mucha roca
Mantenimiento no es riguroso	Grandes profundidades
El lodo generado tiene un menor contenido de humedad y puede ser dispuesto en lechos de secado	Se requiere un tratamiento posterior al efluente de salida
Los tiempos de retención hidráulica son bajos	Solo se aplica para poblaciones inferiores a 2000 habitantes
Contribuye a la estabilización del lodo teniendo también un efecto en la calidad del efluente líquido	Requieren de tratamientos posteriores para lograr una buena calidad del efluente.

**Tabla 3.1** Ventajas y desventajas del tratamiento autónomo. *Elaboración propia.*

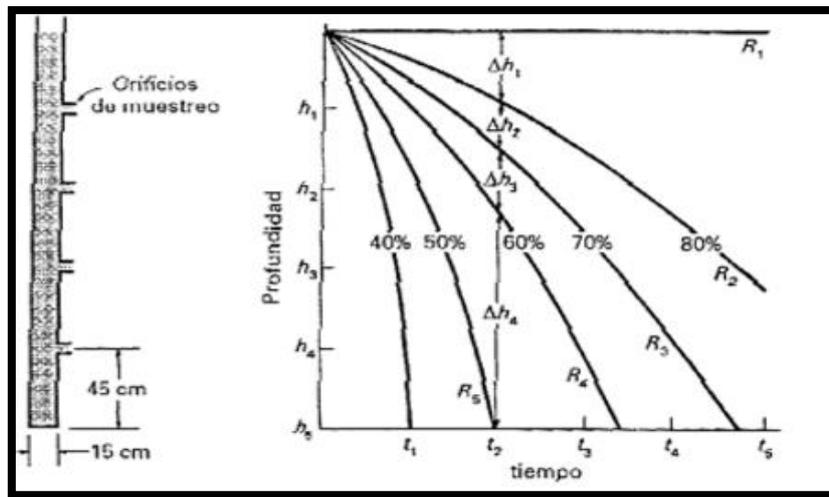
3.2.1.3. *Tratamientos primarios*: es aquel proceso que remueve aquellos contaminantes que pueden sedimentar, como por ejemplo los sólidos sedimentables y algunos suspendidos o aquellos que pueden flotar como las grasas.

El tratamiento primario presenta diferentes alternativas según la configuración general y el tipo de tratamiento que se haya adoptado. Se puede hablar de una sedimentación primaria como último tratamiento o precediendo un tratamiento biológico, de una coagulación cuando se opta por tratamientos de tipo fisicoquímico (Muñoz,2004).

En el tratamiento primario se puede tener:

**1.Sedimentador convencional:** tiene una estructura basada en la velocidad a la cual pueden ser decantados los sólidos que se desean retirar. Puede ser rectangular o circular, dependiendo de

la selección del diseñador en distribuir el flujo horizontal o verticalmente. Debe ser construida con una pendiente de fondo que proporcione la geometría adecuada para la recolección de lodos generados. La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando tienen mayor diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Este proceso se realiza para retirar la materia sólida fina, orgánica o no, aquí el agua pasa por un dispositivo donde se depositan los materiales para su posterior eliminación, El proceso de sedimentación puede reducir de un 20 a un 40% la DBO5 y de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión, (Reynolds,1996).



**Figura 3.2** Columna de sedimentación y sus rendimientos tiempo vs profundidad. (Metcalf 2013).

En la figura 3.2 se ilustra que entre mayor sea el tiempo de sedimentación, mayor sedimentación se presenta.

Ventajas	Desventajas
Reducción de sólidos suspendidos	No se pueden tener temperaturas bajas
Reducción de grasas	Se debe tener cuidado ya que se crean espacios muertos en los laterales donde no circula el agua.
Operación sencilla	Necesidad de tener floculante y coagulante.

**Tabla 3.2 . Ventajas y desventajas del tratamiento primario. Elaboración propia.**

*3.2.1.4. Tratamientos secundarios:* El objetivo de este tratamiento es remover la demanda biológica de oxígeno (DBO) soluble que escapa a un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables.

La ventaja es que en ese proceso el fenómeno se realiza con más velocidad para facilitar la descomposición de los contaminantes orgánicos en períodos cortos de tiempo. Un tratamiento secundario remueve aproximadamente 85% de la DBO y los sólidos en suspensión, aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados, demanda química de oxígeno (DQO) y bacterias patógenas, (Ronzando,2008). Para llevar a efecto el proceso anterior se usan varios mecanismos tales como: lodos activados, biodisco, lagunaje, filtro biológico.

- **Reactor biológico:** Reservorio donde se lleva a cabo un proceso que se presenta en una cavidad biológicamente activa donde se forma una mezcla uniforme del agua y los microorganismos a través de agitación, allí la materia orgánica se degrada a través de microorganismos anaerobios (bacterias) allí presentes, (Torres,2010).
- **Fangos activados:** es un proceso biológico aerobio en el cual microorganismos de diferentes clases degradan la materia orgánica diluida en el agua residual resultante del tratamiento primario. El proceso consta de un tanque de aireación y un posterior sedimentador secundario. El tanque de aireación es una estructura rectangular o circular en donde se realiza una mezcla completa entre los microorganismos y el agua a tratar. Se debe asegurar una inyección continua a los microorganismos con el objetivo de mantener la eficiencia del proceso y evitar la presencia de organismos anaerobios, que pueden perjudicar la operación. (Metcalf, 2013).
- **Digestión:** Se presenta un metabolismo que da paso a la descomposición de material orgánico usando bacterias que catabolizan a través de un reactor cerrado en ausencia de oxígeno, produciendo en ocasiones una fuente de energía puede ser Metano o Dióxido de Carbono.
- **Filtro biológico:** Está formado por un reactor, en el cual se ha situado un material de relleno sobre el cual crece una película de microorganismos aeróbicos con aspecto de limos. El agua residual se descarga en la parte superior mediante un distribuidor rotativo cuando se trata de un tanque circular. A medida que el líquido desciende a través del relleno entra en contacto con la corriente de aire ascendente y los microorganismos. La materia orgánica se descompone lo mismo que con los lodos activados, dando más material y CO<sub>2</sub>, (Torres,2010).
- **Lagunas de estabilización:** Las lagunas son reactores construidos mediante excavación, compactación e impermeabilizados donde tiene lugar el tratamiento biológico del agua

residual. Las obras necesarias de una laguna normalmente consisten en la excavación y el acondicionamiento de los taludes (movimiento de tierras), la impermeabilización (arcillas o material plástico externo), tuberías y un poco de hormigón (arquetas, reparto de caudales, desagüe). Para esta laguna se recomienda que las temperaturas no sean inferiores a 5 °C y requiere grandes extensiones de tierra. Las lagunas anaerobias se utilizan para el tratamiento de altas cargas orgánicas, principalmente en zonas rurales (Metcalf,1995).

Ventajas	Desventajas
Alta eliminación de DBO que quedo del tratamiento primario.	Se necesita de supervisión constante.
Eliminación de aquellos solidos sedimentables que quedaron del tratamiento primario.	Alto consumo de energía debido a que se requiere aireación
Se produce una fuente de energía ya bien sea metano o dióxido de carbono.	Alta producción de lodos que puede generar inconvenientes si no se tiene una planificación.

**Tabla 3.3** Ventajas y desventajas del tratamiento secundario.

*3.2.1.5. Tratamientos terciarios:* este proceso tiene como objetivo remover contaminantes específicos, usualmente tóxicos o compuestos no biodegradables o aún la remoción complementaria de contaminantes no suficientemente removidos en el tratamiento secundario.

Como medio de filtración se puede emplear arena, grava antracita o una combinación de ellas. El pulido de efluentes de tratamiento biológico se suele hacer con capas de granulometría creciente, duales o multimedia, filtrando en arena fina trabajando en superficie (Osorio, 2010). Los filtros de arena fina son preferibles cuando hay que filtrar flóculos formados químicamente y aunque su ciclo sea más corto pueden limpiarse con menos agua.

- **Desinfección:** permite hacer eliminación de ella microorganismos capaces de producir enfermedades. El proceso de desinfección puede llevarse a cabo por agentes físicos y agentes químicos (Barrenechea, 2004). Existen determinadas sustancias químicas que pueden actuar sobre los microorganismos, con una acción no selectiva sobre las células en las que actúan, conocidas como desinfectantes y antisépticos. El desinfectante se utiliza para el control de microorganismos sobre objetos inanimados que pueden causar enfermedades; remueven parte o la totalidad de ellos. Estos agentes destruyen las formas vegetativas de los microorganismos, pero no necesariamente sus esporas

(Rodríguez, 2004). Tradicionalmente un desinfectante tiene las siguientes propiedades ideales:

- A) Debe tener un amplio rango para inactivar bacterias, hongos, virus y esporas
  - B) Acción rápida y prolongada
  - C) No debe ser inactivado por la materia orgánica
  - D) Compatible con detergentes
  - E) Estable a la concentración y dilución recomendada
  - F) No tóxico, no potencial alergénico, no corrosivo
  - G) Fácil de preparar y usar
  - H) Inodoro
  - I) Con efecto residual
  - J) Económico.
- **Adsorción:** Por su tamaño, las partículas coloidales tienen una relación área/masa extremadamente grande, por ello son excelentes materiales adsorbentes, (Degrémont, G,1999).
  - **Luz ultravioleta:** Se basa en la acción de una parte del espectro electromagnético sobre ácidos nucleicos y proteínas, con lo que se altera la reproducción de determinados patógenos. Se emplea la radiación a 253,7 nm, que se considera la más adecuada para el proceso. Es activo especialmente contra bacterias y virus y se describe con lámparas de media intensidad una acción contra Giardia y Cryptosporidium. Se emplean lámparas de alta, media y baja presión. Hasta el momento las más utilizadas en desinfección de aguas residuales son las de baja presión. Es importante que el efluente a desinfectar tenga pocos sólidos en suspensión. Uno de los problemas más importantes de esta tecnología es la limpieza de las lámparas.

**Filtración:** Es un tratamiento similar al de ósmosis inversa. Es un sistema que trabaja a altas velocidades y baja presión, es un medio poroso de menos de 0,01 micras. Los sistemas de filtración son capaces de remover por encima del 90% de los contaminantes (Osorio, 2010). El agua anteriormente filtrada entra en el medio a presión y en la membrana quedan capturadas las sustancias no deseadas en el agua. Los filtros se clasifican:

- **Filtros lentos de arena:** Los filtros lentos de arena se utilizan para el tratamiento de las aguas ligeramente turbias y generalmente no poseen coagulación ni sedimentación previa. Estos filtros están constituidos de un estanque con una capa de arena de 0,60 a 1,00 m. de espesor, soportada por una capa de grava de 0,30 a 0,40 m. de altura, cuya granulometría creciente hacia el fondo varía desde arena gruesa hasta  $\frac{3}{4}$  " o más de

tamaño. Bajo la capa de grava existe un sistema de drenaje colector del agua filtrada. Completan el filtro, un sistema de control de entrada y salida del agua que permite mantener constante la carga de agua sobre la arena y regular el gasto de salida y un sistema que indica la pérdida de carga del filtro. La tasa de filtración de estos filtros es de 1,3 a 6,5 l/m<sup>2</sup>/min, (Metcalf,2013).

- **Filtros rápidos de arena:** La velocidad de filtración es muy superior a la de filtración lenta varia 5 a 7 – 8 m<sup>3</sup>/ hora. No tienen la misma eficiencia que el lento, sobre todo desde el punto de vista bacteriológico, (Metcalf,2013). Se necesita mayor cuidado en la desinfección, el agua que se trata en un filtro rápido debe estar previamente coagulada, floculada y sedimentada.

Ventajas	Desventajas
Alto nivel de eliminación de contaminantes que puede llegar hasta un 99%.	Altos costos de inversión
Trabajan a altas velocidades y baja presión	Se puede generar corrientes de rechazo y por tal se debe tratar correctamente.
No tiene altos consumo de energía	La lámpara de luz ultravioleta necesita ser revisadas constantemente
Se pueden combinar con otros tipos de proceso sin ningún inconveniente.	

**Tabla 3.4** Ventajas y desventajas del tratamiento terciario. Elaboración propia.

### 3.2.2. Tipos de tratamientos para la línea de lodos.

El tratamiento de los lodos depende del origen del lodo, se obtienen lodos primarios que son aquellos que proceden del tratamiento primario del agua,

los lodos secundarios que se obtienen del tratamiento secundario y el fango mixto que es una mezcla de los lodos primarios y secundarios.

*3.2.2.1 Tratamiento por espesamiento por gravedad:* este tratamiento se caracteriza por ser económico, generalmente se utiliza para fangos primarios o mixtos. Este espesamiento se emplea para aumentar la cantidad de fracción sólida de lodo mediante la reducción del porcentaje de agua que contienen. Una vez el lodo este seco se retiene en la parte inferior y se conduce a un digestor.

*3.2.2.2 Tratamiento de espesado por centrifugación:* este tratamiento se caracteriza ya que realiza tanto un espesamiento como una deshidratación. Este proceso necesita una

sedimentación de las partículas de lodo bajo el efecto de la fuerza centrífuga. Este tratamiento se caracteriza porque requiere un alto consumo energético de entre 800 a 1500 Wh/m<sup>3</sup> de fango. Así mismo requiere una inversión alta en el costo de explotación

*3.2.2.3 Tratamiento por bandas de deshidratación:* Este tratamiento es el más empleado actualmente ya que permite realizar un proceso mecánico que permite la reducción del contenido del agua en los lodos. La deshidratación por bandas parte en dos etapas, la primera etapa consta de un drenaje libre de los lodos y la segunda es un prensado sucesivo que logra convertir los lodos en materia seca de 25 a 35 %. este tratamiento se caracteriza por sus bajos costos de implementación, pero se requiere espacio suficiente ya que la maquinaria ya que ocupa espacio y necesita constante limpieza.

*3.2.2.4 Tratamiento por secado térmico de tambor rotativo:* esta opción realiza la reducción del contenido de agua que tiene los fangos por aplicación de calor que vaporiza, también se caracteriza porque elimina sustancias volátiles, el producto final se pueden valorizar como sólidos secos para la fertilización (uso agrícola) o combustible (combustible "verde"). Este tratamiento tiene un alto consumo energético que fluctúa en 750 kcal/kg de agua evaporada.

### 3.3 Análisis actual de suministro de agua y alcantarillado.

El recurso hídrico es un elemento esencial para la vida, por lo cual las antiguas civilizaciones se asentaban siempre en cercanías a los ríos. Conforme pasaba el tiempo, las poblaciones implementaron estrategias que permitían transportar y almacenar el agua, así la extracción del agua de los acuíferos. Dado al incremento poblacional se comenzó a implementar sistemas de abastecimientos de agua que partían de un proceso de captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución. Según la organización mundial de la salud mundo (OMS), no todos los países cuentan con una economía en desarrollo y este factor no permite que se lleven a cabo planes de construcción de infraestructura inmediatos, sumado a desigualdades e inequidades tanto en zonas urbanas y rurales (Lomanaco,2008).

El verdadero reto radica en qué hacer con las aguas ya utilizadas por la población, y haciendo una mirada retrospectiva del comienzo de la civilización donde se han encontrado instalaciones de alcantarillado tales como en Creta y en las antiguas ciudades asirias, claro está que su función original era el drenaje donde se captaba el agua de lluvia y las corrientes del terreno para reducir el nivel freático.

A finales de la edad media se comenzó a utilizar los pozos negros en Europa, su contenido era utilizado como fertilizante, o era vertido en los cursos de agua y tierras no explotadas. Aun con

este gran avance se concluyó que no era apto, ya que traía consigo el fomento de enfermedades, de tal manera que se decidió hacer la misma red para drenaje de agua ya utilizada para su posterior direccionamiento a un pozo para su almacenamiento.

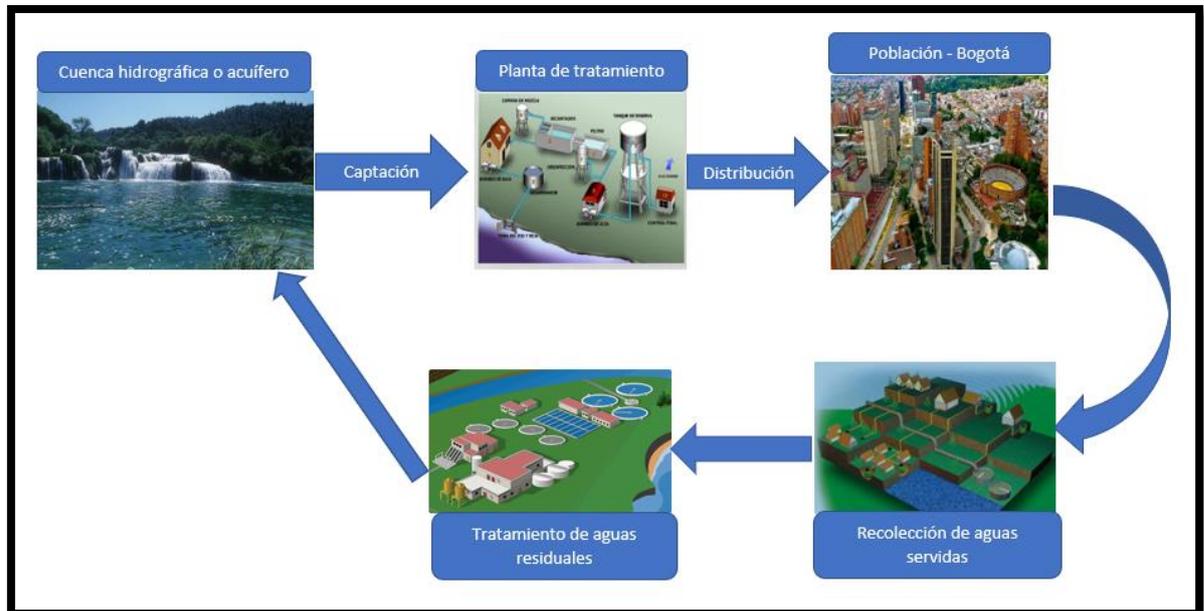
Actualmente, en el territorio colombiano el servicio de “acueducto y alcantarillado” (más reconocido internacionalmente como de “agua potable y alcantarillado” o “agua potable y saneamiento básico”), de acuerdo con lo establecido en la **Ley 142 de 1994** y **Ley 632 del 2000** colombiana, está compuesto por las actividades de aducción, tratamiento, almacenamiento, conducción, transporte y distribución de agua potable (en lo que se refiere a acueducto) y las actividades de recolección, transporte y tratamiento de los residuos líquidos (en lo que se refiere a alcantarillado).

El sistema de gestión de abastecimiento y de alcantarillado consta de 6 componentes que son los siguientes:

### 3.3.1 Red de abastecimiento

- **Fuente de abastecimiento:** Es el sitio de donde se capta el agua que es por lo general una cuenca hidrográfica o un acuífero. La selección de esta depende de factores como accesibilidad, localización, cantidad y calidad.
- **Obras de captación:** El tipo de estructura a utilizar depende del tipo de fuente utilizada. Si la fuente es superficial la captación se hace mediante una estructura de “bocatoma” y si la fuente es subterránea se hace mediante “pozos”.
- **Obras de Aducción:** Son las obras para el transporte del agua desde el sitio de captación hasta la planta de tratamiento. Generalmente la conducción se realiza por tubería a presión o por gravedad y por canales abiertos o cerrados.
- **Tratamiento del agua:** Es el proceso por medio del cual se transforma la calidad del agua presente en la fuente de abastecimiento a una calidad adecuada para su consumo humano de acuerdo con la normatividad vigente.
- **Almacenamiento:** Es la capacidad que debe tener el sistema, de almacenar agua tratada para poder suplir la demanda en las horas pico y proveer unas reservas para situaciones de emergencia como es el caso de almacenamiento de agua contra incendio, o en periodos de mantenimiento de redes.
- **Distribución:** Es el proceso por medio del cual se conduce el agua desde los sitios de almacenamiento hasta los predios de los usuarios del servicio. Los elementos principales de la conducción son las redes matrices, las cuales tienen como función conducir

grandes volúmenes de agua hacia todas las zonas de la ciudad, y redes secundarias, que distribuyen el agua en cada calle y sobre las cuales están instaladas las acometidas.



**Gráfico 3.1** Interacción de los servicios de suministro de agua y alcantarillado. Elaboración propia. Imágenes: Viola diseños y Fernando Suarez.

- **Tratamiento de aguas residuales:** es un conjunto de procesos, donde se somete el agua residual que un tratamiento que permite adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.
- **Posterior uso del agua:** usos recreativos (riego de campos de golf, viveros), usos industriales (para etapas de procesos de lavados, para lavados de fachadas exteriores, centros de refrigeración).

### 3.1.2 Red de alcantarillado

Para el proceso de regeneración de aguas residuales ha de tenerse en cuenta dos conceptos importantes según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Departamento Nacional de Planeación en su plan de manejo *Plan Nacional De Manejo De Aguas Residuales*:

- **Agua depurada:** es aquella agua que es captada por medio del alcantarillado, donde se mezclan aguas lluvias, domestica e industriales y que es sometida a tratamiento que permite adecuar su calidad para ser vertidas (depende de las características finales se decide cuál es su uso).

- **Agua regenerada:** es aquella agua residual que ha tenido un proceso de depuración y que adicionalmente se somete a otros procesos de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destina.

### 3.4 Marco normativo colombiano para tratamiento de aguas residuales

El marco normativo colombiano referente a las generalidades de agua se fundamentan en la carta de navegación de todo país la constitución política, seguida por las leyes, decretos y resoluciones que van surgiendo debido a los avances que se realicen en la materia.

#### 3.4.1 Decreto 2811 de 1974

El decreto 2811 de 1974 es estipulado por medio del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente donde se parte del fundamento que el ambiente es patrimonio común y por tal hay que velar su preservación y manejo, que son de utilidad pública e interés social. Este decreto permite que se desarrolle el bien “agua” como un patrimonio que gira en torno a la supervivencia humana y que impulsa el desarrollo económico y social del territorio colombiano.

El principio rector que rige este decreto es asegurar la disponibilidad del recurso y fomentar nuevos métodos que permitan ver las aguas residuales como una herramienta para ayudar a mantener y preservar el agua potable sin importar la actividad que se realice.

#### 3.4.2. Ley 9 de 1979

Esta ley establece la protección que se debe dar al medio ambiente en protección directa a la calidad del agua y del control sanitario. Para los efectos del control sanitario del uso se tendrán en cuenta las siguientes opciones, sin que su enunciación indique orden de prioridad.

- a) Consumo humano;
- b) Doméstico;
- c) Preservación de la flora y fauna;
- d) Agrícola y pecuario;
- e) Recreativo;
- f) Industrial;
- g) Transporte.

El Ministerio de Salud establecerá cuales usos que produzcan o puedan producir contaminación de las aguas, requerirán su autorización previa a la concesión o permiso que otorgue la autoridad competente para el uso del recurso.

El Ministerio de Salud queda facultado para establecer las características deseables y admisibles que deben tener las aguas para efectos del control sanitario. En la determinación de las características deseables y admisibles de las aguas deberá tenerse en cuenta por lo menos, uno de los siguientes criterios:

- a) La preservación de sus características naturales
- b) La conservación de ciertos límites acordes con las necesidades del consumo humano y con el grado de desarrollo previsto en su área de influencia.
- c) El mejoramiento de sus características hasta alcanzar las calidades para consumo humano y las metas propuestas para un conveniente desarrollo en el área de influencia.

Todo usuario de las aguas deberá cumplir, además de las disposiciones que establece la autoridad encargada de administrar los recursos naturales, las especiales que establece el Ministerio de Salud.

La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuentes receptoras.

#### 3.4.3. Resolución 1096 de 2000

Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, "RAS".

Considera que corresponde al Ministerio de Desarrollo Económico, formular la política de gobierno en materia social del país relacionada con la competitividad, integración y desarrollo de los sectores productivos del agua potable y saneamiento básico y expedir resoluciones, circulares y demás actos administrativos de carácter general o particular necesarios para el cumplimiento de sus funciones.

Por tal se sustenta en los artículos enumerados a continuación:

- **ARTICULO 86 y ARTICULO 119**: gestión de tratamiento y manejo de lodos.
- **ARTICULO 121**: Sistemas de instrumentación y control de aguas potable y residual.
- **ARTICULO 175**: Desinfección de los efluentes de las PTAR. El proceso de desinfección debe realizarse en el efluente de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR),

cuando este último pueda crear peligros para la salud de las comunidades aguas abajo de la descarga. El proceso de desinfección que se utilice debe seleccionarse después de la debida consideración de: caudal de aguas residuales a tratar; calidad final deseada de desinfección; razón de aplicación y demanda; el pH del agua que va a desinfectarse; costos del equipo y suministros y disponibilidad.

- **ARTICULO 176:** Manejo de lodos en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Todos los niveles de complejidad deben contemplar el manejo de lodos en su sistema de tratamiento de aguas residuales. Para esto, deben presentarse balances de masa de los procesos con los trenes de tratamiento de agua y lodos. Los efluentes líquidos del tren de lodos deben integrarse en los balances de masa del tren líquido. Además, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones: No deben descargarse dichos efluentes a cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Los lodos primarios deben estabilizarse; se debe establecer un programa de control de olores; se debe establecer un programa de control de vectores. Además, se debe hacer una caracterización de los siguientes parámetros en los lodos: sólidos suspendidos, sólidos totales, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo y metales; adicionalmente para el nivel alto de complejidad, cromo, plomo, mercurio, cadmio, níquel, cobre y zinc.

#### 3.4.4 Decreto 1207 de 2014

Este decreto fundamenta todos las leyes, decretos y resoluciones anteriores conforme al recurso hídrico, dando valores precisos que se deben obtener al momento de ejercer cualquier tratamiento posterior a las aguas residuales. se especifica los balances de materia o de masa de los vertidos. Por otra parte, se hace indicación de los sectores en los que se puede hacer uso de las aguas regeneradas y los criterios de calidad al realizar las tomas de muestra del efluente final.

La estrategia que plantea el gobierno nacional para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico son las siguientes estrategias: a) aumento de coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado, b) ampliación del tratamiento de aguas residuales, y c) desarrollo de esquemas tarifarios que permitan financiar los costos de inversión y operación de los sistemas de acueducto y alcantarillado.

Ampliación del tratamiento de aguas residuales: Con el fin de avanzar en la descontaminación del recurso hídrico, el ministerio del medio ambiente (MMA) conjuntamente con las Autoridades Ambientales Regionales -CAR- (Corporaciones Autónomas Regionales, Corporaciones para el

Desarrollo Sostenible y Autoridades Ambientales de los Grandes Centro urbanos) apoyan la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

### 3.4.5 Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura OMS

Los lineamientos demarcados por las leyes colombianas se basan de igual forma por las directrices que se estipulan por la Organización Mundial de la Salud (OMS), su objetivo se sustenta en que el tratamiento de las aguas residuales elimine todo agente patógeno que pueda perjudicar al destinatario final. Se resalta la importancia de incorporar el aprovechamiento de aguas residuales a la planificación nacional en materia de recursos hídricos y agricultura, sobre todo donde hay escasez de agua, no sólo para proteger la calidad de ésta sino para minimizar los costos de tratamiento de las aguas residuales, proteger la salud pública y obtener máximos beneficios de los nutrientes que contienen las aguas residuales empleadas en agricultura y acuicultura (OMS,2017). A continuación, se muestra en la tabla 3.5 las exigencias que dependen del tipo de aprovechamiento al que se les da a las aguas regeneradas.

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nemátodos intestinales (N° de huevos por litro)	Coliformes fecales (CF/100ml)	Tratamiento de aguas residuales necesario para lograr la calidad
A	Riego de prados públicos, zonas verdes de contacto directo	Trabajadores y público	≤ 1	≤ 200	Serie de estanques de estabilización que permiten lograr la calidad microbiológica indicada o tratamiento equivalente
	Riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos	Trabajadores y consumidores	≤ 1	≤ 1000	
B	Riego de cultivos de cereales industriales y forraje, praderas y arboles	Trabajadores	≤ 1	No se recomienda ninguna forma	Retención es estanques de estabilización por 8 a 10 días o eliminación equivalente de helmintos y coliformes fecales
C	Riego localizado de cultivos tipo B cuando ni los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	N/A	N/A	Tratamiento previo, según lo exija la tecnología de riego por no menos que sedimentación primaria

**Tabla 3.5** Directrices recomendadas sobre calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura. Fuente: OMS.

## Capítulo 4. Gestión del agua residual en la planta de tratamiento el salitre

### 4.1. Sistema de saneamiento y funcionamiento

El concepto de sistema de saneamiento o red de alcantarillado se refiere a todo un conjunto de técnicas donde se construyen estructuras hidráulicas que permiten la recogida y transporte de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas de una población, iniciando desde el punto en el cual se generan las aguas residuales hasta el sitio en el cual se vierten ya bien sea un medio natural o son dirigidas a plantas de tratamiento.

Hoy en día, se hace direccionamiento a las plantas de tratamientos de aguas residuales en donde su principal función es poder eliminar aquellos residuos sólidos, grasas, jabones, heces y nutrientes que posee el agua cuando ha sido utilizada.

El sistema de saneamiento funciona por medio de presión atmosférica o por el efecto de la gravedad, en algunos tramos de la red se constituyen por tuberías que trabajan bajo presión o por vacío. Generalmente se los conductos son de forma circular y se encuentran por debajo de la vía públicas.

Principalmente los sistemas de saneamiento tienen tres elementos principales, los cuales son:

- Una red de alcantarillado, la cual se puede definir como el conjunto de conductos e instalaciones que sirven para la evacuación de las aguas residuales o pluviales desde el final de la red de saneamiento interior de la edificación o privada, hasta el punto de vertido a la estación depuradora o, en su defecto, a un cauce público.
- Un conjunto de estaciones de bombeo, el cual es solo necesario si el cuerpo receptor está más alto que el de la salida de alcantarillado.
- Y, por último, un conjunto de estaciones depuradoras de aguas residuales con un proceso similar en todas las plantas.

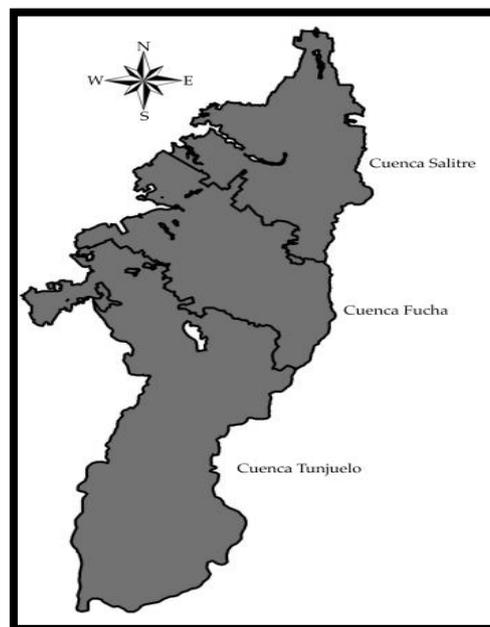
Generalmente se hace uso de dos tipos de sistemas de saneamiento, el primer tipo de saneamiento es de redes unitarias el cual se construye y se extiende para poder recibir un único conducto, donde se presenta una mezcla tanto de las aguas domésticas, industriales, pluviales y agrícolas. El segundo tipo de saneamiento es la red separativa o separadas la cual consiste en la existencia de dos canales independientes, una de las redes es de alcantarillado sanitario transportando las aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas hasta una estación

depuradora y la otra red es de aguas pluviales las cuales se conducen hasta un receptor final que puede ser un río, lago o mar (Charles, 1991).

## 4.2 Funcionamiento de la red de saneamiento en Bogotá

El interés que tuvo la ciudad de Bogotá por el desarrollo de un sistema eficiente de saneamiento se basó principalmente en contribuir en forma determinada en la calidad de vida de la población, mejorando las condiciones de salubridad y el desarrollo económico de cada una de las ciudades donde se implementan, este último factor es variable dependiendo de las condiciones de expansión de la actividad urbana, comercial e industrial de cada ciudad.

De manera introductoria la red de alcantarillado público de la ciudad de Bogotá inicio en 1900 siguiendo hoy en día en crecimiento, se ha logrado una cobertura que casi alcanza el 90 % en el 2017. La infraestructura actual cuenta con estaciones de bombeo, redes de saneamiento, colectores, canales, boxes y una planta de tratamiento de aguas residuales. En la figura 4.1 se observa como la división de las tres cuencas sanitarias de Bogotá, las cuales llevan el nombre de los tres grandes ríos que atraviesan a Bogotá: Salitre, Fucha y Tunjuelo (Rodríguez, 2008). Dentro de estas cuencas existen un total de 65 subcuencas menores, que están divididas en 49 subcuencas sanitarias y 16 subcuencas pluviales (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2011).



**Figura 4.1** Esquema general de las cuencas de drenaje sanitario de Bogotá. Fuente: acueducto de Bogotá.

De manera introductoria se presenta una breve explicación de su extensión, su conexión con parte de la ciudad y la red de alcantarillado existente en Bogotá.

#### 4.2.1 Cuenca Salitre

La cuenca del salitre hace la recolección de las aguas pluviales y sanitarias de la subcuenca del río Torca y la cuenca del río Salitre, teniendo un área cubierta de la parte norte de la ciudad desde la calle 200 hasta la calle 26 y desde los cerros orientales hasta el río Bogotá, como ya anteriormente se había descrito, el área aproximada es de 11 883.57 ha para aguas residuales y 16 863.68 ha para agua de lluvia (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2011).

La combinación que se presenta en esta cuenca es de una pare central donde el sistema de alcantarillado es combinado con un total de 33.5 km<sup>2</sup>, que es proveniente de las subcuencas Arzobispo, Sears, Las Delicias, La Vieja, río Negro y río Nuevo.

Según la alcaldía y la entidad de saneamiento básico es la cuenca que más desarrollo de infraestructura tiene, ya que es la única que tiene conexión con la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad “**Planta El Salitre**”.

La subcuenca del Torca es un canal que posee una longitud de 4.24 km. Nace en los cerros orientales y desemboca en el humedal Torca - Guaymaral. El área de drenaje total es de aproximadamente 2 078 ha (González, 2011).

#### 4.2.2 Cuenca Fucha

La cuenca Fucha se encuentra localizada en la zona centro-sur de la ciudad. La división del drenaje parte por el norte desde los límites de la cuenca del río Salitre, así mismo, por el suroriente recibe las aguas desde el barrio Santa Inés, San Blas la cuales se reconectan con la recolección de las aguas de Sur desde el Barrio San Benito y por el occidente con las aguas drenadas del interceptor Kennedy, para un total de área de 14 024.61 ha para aguas residuales y 3 824.67 ha para agua de lluvia (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2011).

Esta cuenca se caracteriza ya que cuenta con la recolección de la mayor parte de industria de la ciudad, pero que no ha previsto que se está empresas también se encuentran en la parte norte y oriental de la ciudad, las principales empresas que se sitúan son tintorerías, curtiembres, sectores alimentarios, metalmecánica y químicos.

Así mismo, se presenta una combinación de la cuenca por su lado oriental, con un total de 40.5 km<sup>2</sup>, pero, sin embargo, todos los datos son aproximaciones de los sistemas combinados (González, 2011).

#### 4.2.3 Cuenca Tunjuelo

La cuenca Tunjuelo se encuentra ubicada al sur de la ciudad, captando las aguas que drenan por el sur desde los límites de la cuenca del río Fucha. Se caracteriza por ser una zona altamente rural y residencial, y por ser la única cuenca sanitaria completamente separada. El área total es de 21 956.69 ha de aguas residuales y 62 606.85 ha para agua de lluvia (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2011).

A pesar de la existencia de estas áreas de drenaje, es la cuenca con más baja cobertura, pues sobre la cuenca existen grandes problemas sociales, como áreas invadidas por diferentes sectores sociales, que da como resultado la creación de barrios ilegales y extrema pobreza.

En las tres cuencas hidrográficas se evidencian que las principales que la fuente de contaminación son aguas residuales domésticas e industriales. En su mayoría de puntos de vertimientos que descargan mediante el sistema de alcantarillado público aportan entre otras cargas de materia orgánica, sólidos suspendidos totales (SST), fósforo total, nitrógeno total y coliformes fecales (Alcaldía mayor de Bogotá, 2016).

#### 4.3 Descripción y análisis de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales aplicado por la empresa acueducto agua y alcantarillado de Bogotá.

Bogotá cuenta con una sola empresa que es la que realiza el suministro y tratamiento de aguas residuales, la empresa se llama Acueducto de Bogotá (agua, alcantarillado y aseo) y en asociación con la secretaria distrital del medio ambiente teniendo una figura pública - privada (APP), cuya antigüedad aproximadamente es de 129 años.

Esta planta se encuentra ubicada en el noroccidente de la ciudad entre la parte norte de suba, y al occidente del cortijo y ciudadela Colsubsidio, y colinda con las desembocaduras del río Salitre y el río Bogotá. Las conexiones de la red de tuberías de aguas residuales están conectan directamente con la planta, su extensión abarca desde la calle 26 hasta la calle 220 de la capital.

Bogotá solo tiene una planta de tratamiento de aguas residual (PTAR) **“El Salitre”** la cual inició su construcción en 1997 y entró en funcionamiento en 2000. Se ubica en la desembocadura del río Salitre con el río Bogotá y actualmente sólo cuenta con un tratamiento primario y capacidad

de tratamiento de 4 m<sup>3</sup> /s. Esta planta recibe las aguas residuales de unos 2 200 000 habitantes del área norte del distrito capital, pertenecientes a la cuenca del Salitre, lo que representa un 25% de las aguas residuales de la ciudad (De Meulder, 2015). La ley Colombia estipula que el tratamiento de que se le da a las aguas residuales debe de tener un porcentaje de remoción de la demanda biológica de oxígeno (DBO)de 40% y de solidos suspendidos totales (SST) de 60%.

Hoy en día, la administración nacional de Colombia está llevando a cabo el desarrollo de una propuesta para la ampliación el cual cubrirá un caudal de entrada de 8 m<sup>3</sup> /s y un sistema de tratamiento secundario.

Así mismo, se está llevando a cabo la propuesta para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales para las cuencas Fucha y Tunjuelo de Bogotá. Se parte del hecho que pueda tener una capacidad de 12 m<sup>3</sup> /s mediante un sistema de lodos activados (ministerio del medio ambiente, 2016).

En las figuras 4.2 y 4.3 se observa la ubicación geográfica de la planta de tratamiento de aguas residuales el salitre con sus respectivas conexiones con las calles más importantes, así como la vista superior de la "Ptar".



**Figura 4.2** Ubicación geográfica de la planta el salitre con sus conexiones a las calles más importantes. Fuente: Corporación autónoma regional.



**Figura 4.3** Vista superior de la planta de tratamiento de residuos el salitre. Fuente: Corporación autónoma regional.

A continuación, se realiza una breve descripción y caracterización de la planta de tratamiento de agua residual el salitre, permitiendo tener una visión más clara de su funcionamiento y de las técnicas utilizadas para poder reincorporar el agua a su ciclo natural.

#### 4.3.1 Características principales de la planta:

La planta de tratamiento de aguas residual el salitre cuenta con la siguiente caracterización:

- Tiene un funcionamiento semiautomático.
- Se trata 4 m<sup>3</sup> por segundo
- Funcionamiento 24 horas – 7 días a la semana.
- Alcanzar la remoción exigidas en la Licencia Ambiental las cuales corresponden a 40% en DBO<sub>5</sub> (carga orgánica) y 60% en SST (sólidos suspendidos).
- Los lodos generados con el tratamiento se someten a operaciones de espesamiento, digestión y deshidratación.
- El área de drenaje que atiende la PTAR El Salitre es de 13 815 (Ha) aproximadamente.

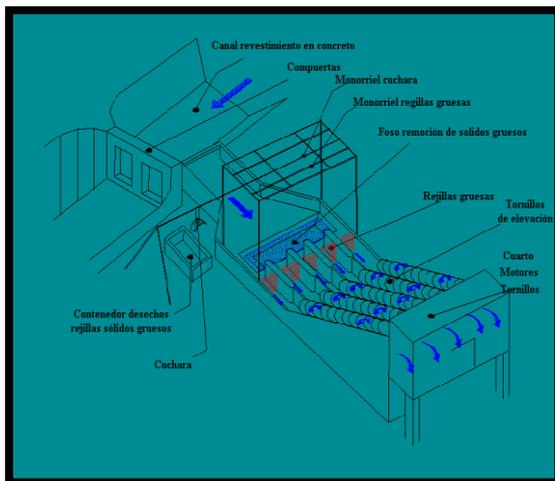
##### 4.3.1.1 Inicio del proceso

- **Canal de entra de aguas residuales:** en este canal desembocan las aguas residuales ya bien sea de tipo industrial o doméstico, figura 4.4.



**Figura 4.4** Canal de entrada de agua residual de Bogotá. Fuente: Fotografía de elaboración propia.

- **Toma de agua y bombeo:** Toda la red está conectada a un pozo de llegada del agua, donde hay una compuerta de 5 metros de altura que permite la entrada del agua residual tal como se ilustra en la figura 4.5 y 4.6.



**Figura 4.5** Funcionamiento de la toma de agua y bombeo. Fuente: Ptar “El Salitre”.



**Figura 4.6** Entrada de toma de agua residual y bombeo. Fuente: Fotografía de elaboración propia.

**-Fase 1: Proceso de cribado:** Consta de un sistema de rejillas que a manera de un colador va reteniendo residuos gruesos como bolsas, palos, plásticos y otras basuras. El agua que pasa por

las rejas es elevada hasta 9 m, por medio de unos tornillos llamados Arquímedes, observar figura 4.6.

**-Fase 2: segundo proceso de cribado:** a diferencia de la fase 1, este se basa en retirar basura de pequeño tamaño, observar figura 4.7.



**Figura 4.7** Tolva de recolección del proceso de cribado. Fuente: Fotografía de elaboración propia.

**-Fase 3: Extracción de arenas y grasas:** este proceso dura de 7 – 12 minutos, es conducido por medio de tres canales, donde se hace una inyección de aire inferior para que la grasa flote y la arena se retenga en la parte inferior, tal como se ilustra en la figura 4.8.

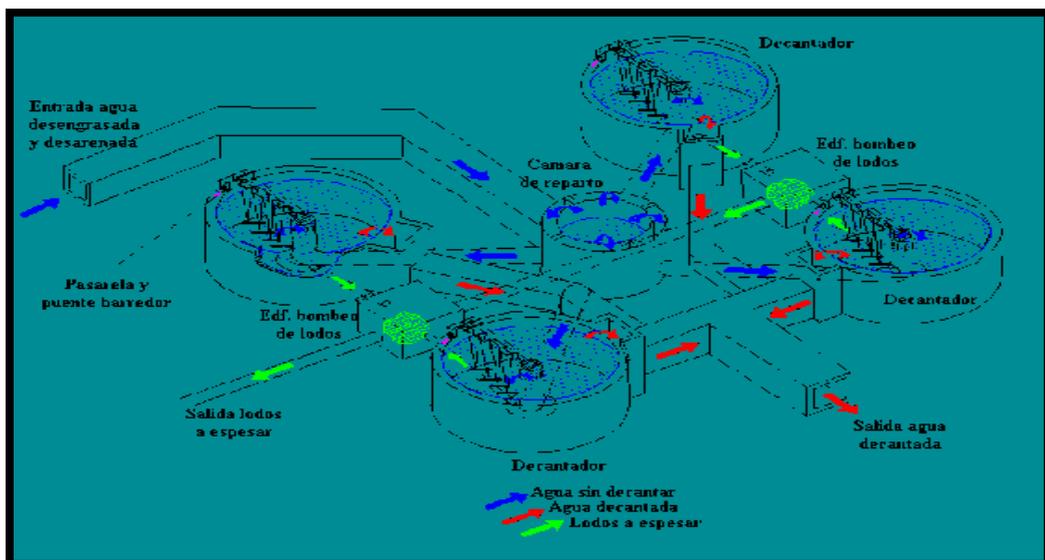
- Se hace uso de algunos químicos que no pueden ser removidos por los sistemas de rejillas, estos químicos (coagulantes y floculantes) ayudan al proceso de sedimentación.
- En la fase 1 y 2 se obtienen en total 60 toneladas mensuales en lo que son residuos gruesos y finos, que finalmente van a parar al relleno sanitario del botadero de doña Juana.
- En la fase 3 las grasas y arenas son llevadas a unos contenedores para su posterior tratamiento.



**Figura 4.8** Canales para la extracción de grasa y arenas. Fuente: Fotografía de elaboración propia

**-Fase 4: sedimentadores:** se tiene destinados ocho (8) tanque sedimentadores donde el agua permanece alrededor de 3 horas y medias, generando que las partículas que aún no han decantado se asienten.

- Los lodos resultantes de los sedimentadores pasan a dos (2) tanques espesadores donde se va retirando el agua para poder alcanzar que se más seco, el agua obtenida en este proceso vuelve a ser tratada. Figura 4.9 y 4.10.



**Figura 4.9** Tanques decantadores y su conexión con la red de salida de lodos para espesar. Fuente: PTAR "El salitre".



**Figura 4.10** Vista panorámica de los tanques decantadores. Fuente: Fotografía de elaboración propia.

**-Fase 5: digestores:** Una vez espesado los lodos pasan a tres (3) tanques llamados digestores, allí permanecen entre 17- 22 días, a una temperatura de 35 °C, donde se genera un proceso de digestión anaerobia, esto quiere decir que hay ausencia de oxígeno, de esta forma se reduce la cantidad de material infeccioso y de parásitos. Este proceso produce biogás el cual está compuesto por gas metano, dióxido de carbono y agua. Una parte del gas es usado en el calentamiento de los digestores de los lodos, generando una aportación de 40 % de la energía requerida por la planta.

**-Fase 6: deshidratación:** Para finalizar el tratamiento de los lodos, termina con una deshidratación de los lodos por filtro de banda que permite retirar el agua que aun contiene, esta agua resultante vuelve al proceso de tratamiento de aguas residuales.

Como resultado final se hace una extracción 4200 toneladas/ mes de biosólido el cual se destina principalmente para el tratamiento de revitalización y restauración de suelos, así mismo para la producción de fertilizantes.

En conclusión, se tiene un tratamiento de lodos primarios que consiste:

- Espesamiento en 2 espesadores con barredor, diámetro de 29 metros y altura cilíndrica de 4 metros.
- Digestión: 3 digestores de volúmenes de 8 500 m<sup>3</sup> cada uno
- Almacenamiento de lodo digerido volumen de 2 700 m<sup>3</sup>
- Deshidratación 5 filtros banda (4+1 en stand by) de 3 metros de ancho
- Evacuación de lodos deshidratados y disposición final



**Figura 4.11** Deshidratación del fango por filtro de bandas. Fuente: Fotografía de elaboración propia.



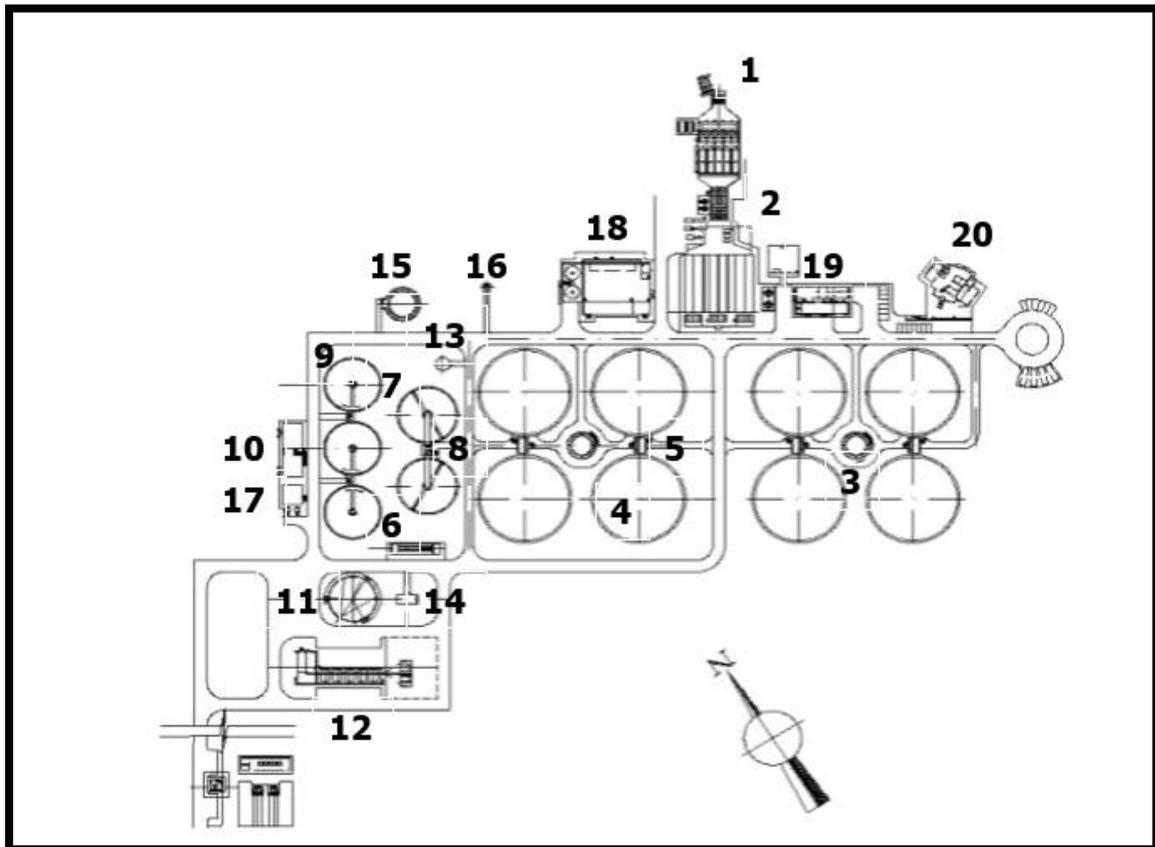
**Figura 4.12** Lodos obtenidos próximos a ser destinados para restauración de suelos. Fuente: Fotografía de elaboración propia.

La planta actual “El Salitre” tiene la siguiente distribución, tal como se observar en la figura 4.13, donde se muestra su respectiva numeración entre paréntesis correspondiente en la figura de localización.

Lo que a continuación se nombra fue obtenido por documento suministrado por el área de distribución de planta (DISPLAN) de la planta “El Salitre”.

- Toma de Agua y Puesto de Bombeo (1)
- Pretratamiento (2)

- 2 cámaras de Reparto de Aguas Residuales (3)
- 8 clarificadores (4)
- 4 estaciones de bombeo de lodos decantados (5)
- Canal de medición de agua tratada (6)
- 2 espesadores de Lodos Primarios (7)
- Estación de Bombeo de Lodos Espesados (8)
- 3 digestores de Lodos (9)
- Edificio de Calentamiento de Lodos (10)
- Tanque de almacenamiento de Lodos Digeridos (11)
- Estación de Deshidratación de Lodos (12)
- Puesto de Elevación de todas las Aguas (13)
- Puesto de Elevación de Agua Industrial (14)
- Gasómetro (15)
- Tea (16)
- Subestación Eléctrica (17)
- Edificio de Grupos Electrónicos (18)
- Edificio de Talleres (19)
- Edificio Administrativo (20)
- Garita y Acceso Principal (21)
- Estructura de Elevación de Aguas Pluviales (22)
- Estructura de Elevación de Aguas Tratadas (23), (Planta de Tratamiento el Salitre, 2017).



**Figura 4.13** Localización unidades de tratamiento e instalaciones complementarias PTAR “El Salitre”. Fuente: Planta de tratamiento “El Salitre”.

#### 4.3.2. Disposición final del agua tratada en la planta el salitre

El proceso de caracterización del agua residuales es un proceso importante, ya que permite establecer todos aquellos parámetros que se encuentran estipulados en la Resolución No. 1096 del 17 de noviembre de 2000, en su título 1 “Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico”.

El control de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos es muy importante tanto en los sistemas de potabilización como de depuración del agua. Sin embargo, en los lugares donde el agua es consumida por el hombre o es reutilizada, el factor de riesgo más importante está asociado con la exposición a agentes biológicos que incluyen bacterias patógenas, helmintos, protozoos y virus entéricos (Asano, 1998).

Actualmente, la planta de tratamiento el salitre no dispone de un uso de la misma, solo es introducida al río Bogotá sin tener un proceso de potabilización o de desinfección para un uso diferente al del consumo humano.

## Capítulo 5 Economía circular y gestión de tratamiento de aguas residuales.

Muchos países se están viendo en la necesidad de poder adoptar nuevas estrategias que les permita hacer un uso póstumo a las aguas residuales, tanto domesticas como industriales, y han evidenciado que la reutilización de estas es una de las alternativas más económicas y eficientes. Esta reutilización es fundamental para aquellas zonas que son áridas, semiáridas o que simplemente no cuentan con gran cantidad del recurso hídrico. A manera de ejemplo se puede nombrar a Reino Unido, Europa y Estados Unidos que fueron los que iniciaron con procesos que eliminase los excesos de nitrógeno y de fosforo, así mismo aquellos contaminantes emergentes y micro contaminantes que debido a su direccionamiento podían contaminar aguas receptoras que son destinadas al uso potable.

Al hacer un tratamiento especial a las aguas residuales que eran vertidas a las zonas costeras o a los ríos, se observó y determino que el agua tratada proporciona no solo una gran fuente de agua alternativa, sino que a su vez se podía obtener productos derivados tales como fango cuyo uso puede ser para compostaje, como combustible seco para las cementeras, para la agricultura como aporte de nutrientes al suelo y aparte se genera biogás por la digestión anaerobia de los fangos.

Actualmente, el uso del nuevo concepto de economía circular se basa en el uso eficaz de los recursos naturales, pretendiendo de tal forma desarrollar dos aspectos primordiales tal como un crecimiento inteligente que a su vez sea integrador y sostenible tanto económica, social y ambientalmente. El concepto tomado de la unión europea lo enfoca a un cambio, fortalecimiento de la economía basada en una sociedad del reciclado cuya finalidad es la reducción de la producción de residuos e incluirlos nuevamente en la cadena de producción como recurso. De esta forma, se consigue que el comportamiento de producción no sea de forma lineal, sino que por el contrario se cierre el ciclo de vida de los productos, servicio, agua, energía y de materiales. Esto permite que se puedan convertir los residuos en materias primas, y mantenerlas en la cadena de producción el mayor tiempo posible (Melgarejo, 2015).

En la figura 5.1 se ilustra cómo es el funcionamiento de la economía lineal donde se basa principalmente en una extracción y captación del recurso para luego ser transformado en el producto, bien o servicio, y finalmente, siguiendo con el uso que le da un individuo para ser posteriormente desechado. La economía lineal tiene fundamento en dos aspectos esenciales, el primero es el impulso de un crecimiento económico de manera permanente que tiene en

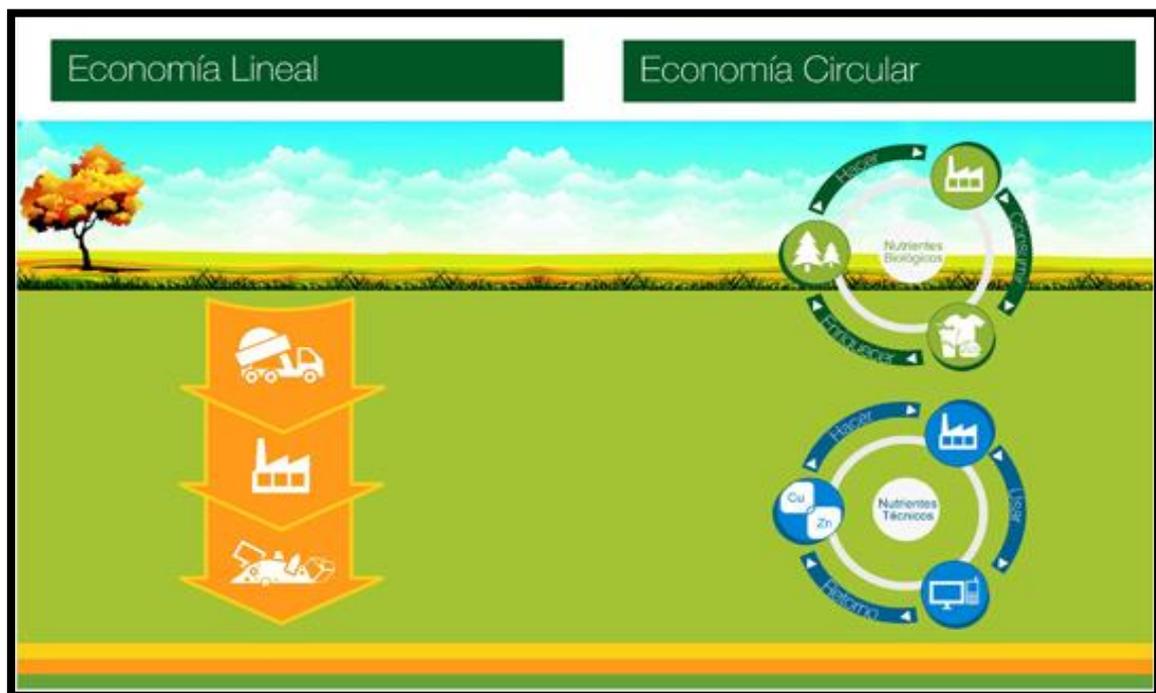
cuenta el impacto y el deterioro medio ambiental, y el segundo aspecto hace referencia a un consumo constante tanto de recursos de aquellos que adquieren el producto, bien o servicio (Newcombe, 2009).

Los dos aspectos expuestos anteriormente ponen límites a una economía que día a día se va globalizando cada vez más, y esto indica que al tener un comportamiento lineal aumenta los riesgos de las empresas al no ser competitivas, ya bien sea por los beneficios de carga tributaria que ofrece el gobierno o por el simple hecho que las personas se ven atraídas por aquellas empresas que tienen un proceso más amigable con el medio ambiente.

Ahora bien, la economía circular gira entorno a reducir el consumo de materias prima, así como reducir al mínimo la generación de residuos y poder reutilizar, reacondicionar o reparar aquel producto, bien o servicio que ya ha sido usado.

Los beneficios que trae consigo la implementación de una economía circular se fundamenta en:

- Reducir los costos de compra de recursos y los gastos de disposición del producto final.
- Genera nuevas oportunidades de crecimiento económico que va acompañado de innovación y competitividad.
- Contribuye a que se extienda la vida de los recursos no renovables y renovables.
- Se contrarrestar el daño contra el cambio climático.



**Figura 5.1** Funcionamiento de la economía lineal vs economía circular. Fuente: Fundación Ellen Macarhur.

Ahora bien, Colombia es un país que se encuentra entre los tres países con mayor cantidad de agua en el mundo, con Brasil y Perú según la revista Global Water Partnership (GWP), así mismo se afirma que solo el 3% del agua en el mundo es dulce, apta para el consumo de los seres vivos, y sur américo cuenta con el 20% del agua dulce del mundo. A pesar de contar con tal excepcional recurso no se cuenta con una infraestructura adecuada para el suministro y reutilización de estas. Caso específico el que se evidencia en Bogotá, Colombia, donde los sectores de bajo estrato (gente de bajos recursos) no cuentan con un sistema de alcantarillado y por tal, el agua suministrada no cuenta con las normas sanitarias nacionales y su disposición final son pozos sépticos artesanales que no cumplen su función adecuada por el aumento poblacional que se da en estas zonas.

El agua es un recurso de primera necesidad para el ser humano, pero poco a poco se han incentivado nuevas estrategias y uso de tecnologías que a mediano plazo pueden funcionar de manera homogénea para todos los sectores. Las iniciativas propuestas por el estado colombiano se debaten en políticas intervencionistas donde aplican un concepto de reutilización “economía circular” reduciendo la producción de residuos y optimizándolos para su posterior reutilización como materias primas. Este concepto no hace referencia a un uso eterno, si no a un uso que se prolonga durante un tiempo hasta que ya no puede volver a ser utilizado, generando un equilibrio sostenible entre factores económicos, sociales y ambientales.

El fundamento radica en que el agua es esencial para la supervivencia y el bienestar de los humanos y se desempeña como factor importante en muchos sectores de la economía. Sin embargo, los recursos hídricos están distribuidos irregularmente en el espacio y el tiempo, y están bajo presión debido a la actividad humana y el desarrollo económico (Forslund, 2009).

Bogotá, Colombia ha presentado un crecimiento urbanístico acelerado y que cada vez más va en expansión con sus tasas de crecimiento poblacional, lo cual obliga a cada una de las ciudades a tener sistemas de abastecimiento de aguas y más aun de su posterior saneamiento. La necesidad de implementar nuevas estrategias para el tratamiento de aquellos residuos que genera la humanidad radica en los cambios ambientales que se proyectan con variaciones espaciales y temporales de la dinámica del ciclo del agua, lo que exacerba las discrepancias entre el suministro y la demanda de agua (Evans, 1996) (ONU, 2017).

La implementación del concepto de economía circular que en este caso es el recurso hídrico, se concreta en una reutilización continua del agua, en donde la regeneración de las aguas residuales permite mitigar el consumo neto del mismo, reutilizándola en diferentes escenarios, como en riego agrícola, aguas de proceso, limpieza, torres de refrigeración, cisternas de

inodoros, carros de bomberos, lavado de carros. Todas estas posibles aplicaciones, permiten hacer una reducción notable del impacto ambiental que están generando estas zonas al suelo y los acuíferos que están interconectados con las cuencas hídricas están siendo infectadas con sólidos en suspensión, presentando un alto grado de turbidez, de bacterias entre otros.

El uso que se le da al agua dulce va dirigida a la producción de alimentos, la cual constituye una de las mayores presiones sobre los recursos de agua dulce, representando más del 70% de las extracciones mundiales de agua dulce y hasta el 90% en algunas economías de rápido crecimiento (ONU, 2017).

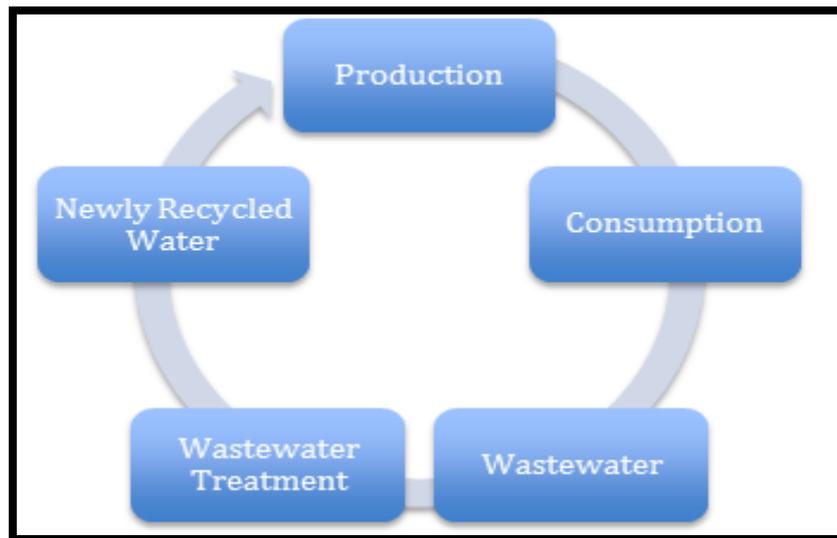
Según informe realizado por Global de Riesgos del Foro Económico Mundial (GRFEM,2015), estiman que la escasez de agua representada en un déficit del 40% a nivel mundial para el año 2030, siendo este el futuro si no se toman medidas inmediatas que ayuden a mitigar la gestión desenfrenada del agua.

Sumado al consumo indiscriminado de agua se encuentra que los vertidos de las mismas aguas, pero contaminadas, los tratamientos inadecuados y la percolación que se produce por la actividad agrícola los cuales generan una degradación directa no solo de la calidad del agua si no de los suelos. (Índice de Desempeño Ambiental, 2017).

Al día de hoy, Colombia es un país que ha tomado conciencia del gran impacto que se ha causado durante décadas al medio ambiente y es de esta necesidad que se ha comenzado a adoptar el concepto de economía circular adaptada al tratamiento de aguas residuales.

En primer lugar, es necesario hacer una breve explicación de la integración de los dos conceptos anteriormente nombrados. En la figura 5.2 se observa cómo es la dinámica de la reutilización de las aguas residuales en la economía circular. En primer lugar, se encuentra la etapa de extracción del recurso hídrico con su proceso de potabilización, seguido por el consumo por parte de los habitantes e industrias, después de este se obtiene las aguas residuales las cuales se conducen por medio de una red de alcantarillado a una planta especializada que realiza la regeneración cumpliendo con los estándares de calidad que exige la normatividad de vertidos aplicable a cada una de las zonas, y como etapa final, se hace uso del agua tratada, dependiendo de su destino.

Este ciclo consecutivo hace las veces de regeneración hidrológica, haciendo que sea tan eficiente y sostenible como se pueda. Por tal, se puede afirmar que la economía circular del agua tiene como objetivo principal convertir el agua ya usada en una nueva fuente del recurso.



**Figura 5.2** Reutilización de aguas residuales en la economía circular

Según estadísticas que se ha realizado por parte del gobierno nacional en el 2017, denotan los grandes avances en el tratamiento de aguas residuales en todo Colombia, el cual paso de un 37% en el 2005 a un 42 % en el 2017, pero este porcentaje solo hace referencia a las aguas que entran a la red de alcantarillado.

Como ya se ha afirmado anteriormente, Bogotá solo cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual inicio sus actividades a partir del 2000, esta planta solo realiza un tratamiento primario y vierte las aguas que ya han pasado por este tratamiento al río Bogotá.

Realmente, la implementación de esta estrategia de reutilización de aguas residuales surgió como una práctica que se ha globalizado y que permite darle a Colombia la oportunidad de optimizar los recursos reduciendo el impacto negativo que se ha generado durante más de 80 años. Es primordial partir de una explicación retrospectiva para poder entender porque Bogotá cuenta con un excelente recurso hídrico y como se ha ido deteriorando el mismo por la mano indelicada de los habitantes que allí residen y que debido a esto se vio la necesidad de poder plantear estrategias que mitigaran el daño ya causado.

Siendo así, se plantea un diseño que tenga la finalidad de producir agua regenerada de una calidad suficiente para poder ser utilizadas en el riego de campos que debido a su tipo de suelo requieren se irrigados constantes. Al hacer esta sustitución de caudales permite eliminar la contaminación que se presenta en los suelos y se hace ahorro de agua potable.

Hoy en día, el consumo per cápita de agua en Bogotá fluctúa entre 90 a 120 l/hab·día, pero se asume que generalmente es de 98.2 l/hab·día, si se hace una comparación con otros países se determina que es relativamente bajo el consumo. La toma de consumo de agua está dada en

función del número de usuarios existentes y del costo de la tarifa, para lo cual se ha planteado fraccionar a la ciudad en los siguientes usos del suelo: industrial, comercial, oficial, especial y residencial. Además, este último uso se diferencia socioeconómicamente en seis estratos, donde los más altos pagan un precio más elevado por el mismo servicio que los más bajos, a los que subsidian (Mallarino, 2008).

La limitación que hoy en día se presenta no solo en Bogotá si no que a nivel nacional es la disponibilidad del recursos hídricos (agua dulce) y esto se debe a que este bien se ha convertido en un factor primordial que impulsa el desarrollo económico, siendo así, que las tecnologías como la desalinización llevada generalmente por una osmosis inversa o el proceso de reutilización de aguas se convierten en soluciones factibles para poder disminuir la relación entre la oferta y demanda (IWA, 2015).

El enfoque paralelo que se incluye en el concepto de economía circular radica en los costos asociados a las estrategias de tratamiento de aguas residuales y en la falla que se tiene en abordarlas como una problemática social y ambiental Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2017).

### 5.1 Consideraciones económicas del tratamiento de aguas residuales con la aplicación del concepto de economía circular.

Abordando los aspectos económicos desde la aplicación de economía circular a la reutilización del agua residual es una relación win to win (ganar para ganar), es preciso aclarar que el ciclo de la gestión de agua residual tiene una serie de componentes que inicia desde el punto de extracción pasando por una distribución , una posterior recolección cuando el agua ya ha sido utilizada (por medio de una red de alcantarillado) y que posteriormente se direcciona a un sitio para que se dé un proceso de tratamiento. Durante este proceso también se logra hacer la recuperación de nutrientes, producción de biogás y la generación de energía que hoy en día es una idea innovadora para un mundo que agoniza por la escasez de recurso y el uso excesivo.

Ahora bien, la economía circular presenta la opción de extender la vida útil de los materiales proporcionando una alternativa sostenible a la extracción de recursos naturales, pero actualmente a las empresas no les importa mucho las prácticas de reutilización, ya que si el recurso es barato mayor será el consumismo para luego ser desechado.

En el caso concreto del agua, se presenta que si se obtiene el recurso o se presta el servicio de forma gratuita no importara el destino final después de su uso y más aún cuando el recurso es ilimitado según los que la consumen y se evidencia un acceso al mismo sin ningún tipo de

inconveniente. La discusión comienza a presentarse cuando un país comienza a determinar los beneficios potenciales que trae el tratamiento de aguas residuales o la inversión de dicho capital en otra infraestructura, donde se evalúan diferentes alternativas que permitan tener un agua regenerada de alta calidad pero que proporcione el máximo rendimiento y beneficio.

Es fundamental partir del principio que la reutilización del agua es visto como un bien económico, tal como se reconoce en la Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible de 1992: "El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos a los que se destina y debería reconocerse como un bien económico". Una vez afirmado que el agua es un bien económico se ha de hacer una distinción entre conceptos de valor, costo y precio, los cuales son muy distintos unos de otros. El valor económico del agua depende de las situaciones de escasez que se de en cada territorio y a su vez por los diferentes usos a los que se destinan, en cuanto el costo económico se refiere al usuario particular donde el bien es suministrado en un lugar específico por lo que conlleva a una relación entre beneficio y costo específico cuyo fin es la base de la justificación económica de abastecer al usuario. Finalmente, el precio del agua es una transacción financiera entre el proveedor y el usuario, la cual generalmente está controlada por las autoridades públicas y a veces tiene poca relación con su valor en usos específicos o con su costo de suministro (FAO,2016).

Para determinar los costos en los que se incurren, es necesario identificar cuáles son los usos más comunes que se le pueden dar al agua residual que ha sido tratada. En un principio, la mayoría de los países hacen uso de esas aguas regeneradas para el uso agrícola, recreativo (para campos de golf o estanques ornamentales), en procesos industriales (limpiezas de exteriores o para torres de refrigeración).

Cabe aclarar que el agua residual que ha sido previamente tratada solo tendrá los usos nombrados anteriormente y que está prohibido el consumo para humanos salvo que sea en una emergencia y tampoco podrá ser utilizada en la industria alimentaria u hospitalaria según la Organización Mundial de la Salud (OMS,2015).

## 5.2 Evolución de la implementación de una economía circular en Bogotá, Colombia

Históricamente, la economía colombiana ha sido influenciada por un modelo económico lineal basado en "Take-Make-Dispose". Este modelo ha resultado, en cierta medida, en el crecimiento económico al utilizar los recursos naturales ampliamente disponibles a través de las industrias extractivas. Sin embargo, los actuales desafíos económicos, tecnológicos, ambientales y sociales plantean la cuestión de si este camino de desarrollo económico ha sido realmente efectivo para

crear riqueza y un ambiente saludable para toda la población y qué estrategias son adecuadas para enfrentar los desafíos actuales del Desarrollo Sostenible.

La gran necesidad que se presenta en implementar estrategias de desarrollo sostenible en Colombia surgió del cuestionamiento en cómo hacer para relacionar nuevos conceptos que se aplican a nivel mundial con un país cuya riqueza energética y de recursos naturales es bastante grande. La primera observación general que se tiene es el comportamiento lineal de la economía el cual refleja una desaceleración en la economía nacional por la caída de los precios de productos fuertes en el mercado tanto nacional e internacional.

Para entrar en un análisis profundo de la aplicación del concepto de economía circular vs medio ambiente, aclarando las interacciones o interrogarse como es la interacción de las tendencias económicas con la dinámica de las de los precios de aquellos productos tangibles e intangibles.

La campana que alerto a Colombia fue por la alta generación de residuos que es directamente proporcional a su crecimiento poblacional el cual tendrá un aumento de 20% en el 2025, con un 80% de urbanización en áreas centrales (urbanas) con lo cual lleva a 1,5 kg de residuos/por persona/día (Hoornweg,2012) sumado a un amento mayor de consumo de agua. Actualmente, no se tiene ningún proceso que permita hacer un uso póstumo del agua y de los residuos sólidos por el país no cuenta con la infraestructura para poder volverlos a incluir dentro de la cadena de valor. Es evidente que Colombia necesita la implementación de nuevas estrategias efectivas para eliminar los impactos ambientales actuales a la vez que crece de manera sostenible la economía nacional.

Para Colombia, la economía circular significa un modelo favorable para reducir la dependencia del sector extractivo, crear una economía diversificada explorando otras oportunidades económicas como la bioeconomía y diferentes modelos de negocios circulares, mejorar la competitividad a través de la innovación, crear seguros y gratificantes oportunidades de trabajo para todas las personas involucradas en el sector informal de reciclaje e inducir a una economía que regenera la biocapacidad de la Tierra y logra un verdadero Desarrollo Sostenible en el país.

La evolución del concepto de economía circular sigue unos principios básicos descritos por la Fundación Ellen MacArthur (MacArthur,2016):

- Preservar y mejorar el capital natural mediante el control de existencias finitas y equilibrar los flujos de recursos renovables.

- Optimizar los rendimientos de los recursos haciendo circular productos, componentes y materiales en la máxima utilidad en todo momento tanto en ciclos técnicos como biológicos.
- Fomentar la efectividad del sistema al revelar y diseñar externalidades negativas. Donde las externalidades negativas se entienden como aquellos costos que la empresa productora o prestadora de servicio asume solamente los costos y beneficios sin tener en cuenta los costos indirectos los cuales son transferidos al consumidor.

El desarrollo del concepto de economía circular ha impulsado una nueva forma de percepción en el ámbito de las relaciones comerciales con los clientes y las materias primas que se utilizan (recursos naturales), esto se debe a la promoción de diversas políticas que permiten tener practicas sostenibles durante todo un proceso productivo con un uso eficiente de los recursos. Esta técnica comenzó a presentarse bajo el nombre de logística inversa en las empresas, donde permite que su economía crezca, reduciendo la cantidad de recursos que se extraen, esto quiere decir que motivan a sus consumidores a que cuando hagan uso del producto que han comprado lo vuelvan a reintegrar a la cadena de valor para volver a ser utilizado como materia prima. Esto permite que el modelo de producción y de consumo no sean lineales, si no que por el contrario tengan un comportamiento circular. Estas actuaciones conducen a salir de un comportamiento de economía contaminante y direccionarla hacia una economía limpia.

Ahora bien, el concepto de economía circular aplicado a al uso eficiente del agua y combinado con incentivos estratégicos para la innovación, ayuda a mejorar la capacidad de una economía para manejar las demandas del creciente desequilibrio entre el suministro y la demanda de agua (Kearney, 2014).

Los obstáculos que se presenta en el proceso de reutilización del agua están direccionados con la percepción pública donde la gente cree que al ser aguas residuales tratadas no pueden lograr tener los mismos estándares de calidad que el agua dulce natural o que pueden verse deteriorada la salud por presencia de bacterias, virus entre otros (National Research Council, 1998). Por otra parte, se tiene que los desafíos tecnológicos donde muchas veces no se cuenta con la tecnología apta para que tenga un funcionamiento adecuado y por último tenemos desafíos en la seguridad y normatividad regulatoria. De estos obstáculos están surgiendo estrategias geográficas y sectoriales que sustentan la economía circular y tienen el potencial de transformar algunas de las principales barreras para la reutilización del agua.

Generalmente, se tiene una percepción en cuanto las medidas tomadas para la aplicación del concepto de economía circular son factibles vistas de una forma aislada, más, sin embargo, esta

requiere un enfoque de sistema que permita incluir de manera sistemática las medidas efectivas y que sean evaluables. Un ejemplo claro es en donde se tiene un proceso de tratamiento de aguas residuales y posteriormente se instala un sistema de riego en zonas donde el suelo tiene un alto nivel de permeabilidad, esto causaría que se genere un impacto negativo en los niveles del agua subterránea, afectando aún más la escasez de agua; visto de esta forma es necesario evaluar todos los factores que puedan incidir directa o indirectamente (Asano,1998).

Entrando a las consideraciones económicas desde la aplicación concreta de la economía circular, se puede afirmar que la reutilización de agua es una de las opciones más beneficiosas que se puede tener, ya que no solo restablece un recurso a un estado de utilización, si no que genera otros productos como el biogás que puede ser utilizado como fuente de energía y los fangos que sirven para compostaje o al igual que fuente de energía. El inicio del manejo de las aguas residuales parte desde el punto de distribución, recolección por medios de redes de alcantarillado y para terminar están los tratamientos de eliminación y reutilización, la cual incluye la recuperación de nutrientes, energía y de agua (SIWI, 2017). Con este ciclo se da la alternativa sostenible para frenar la extracción de recursos.

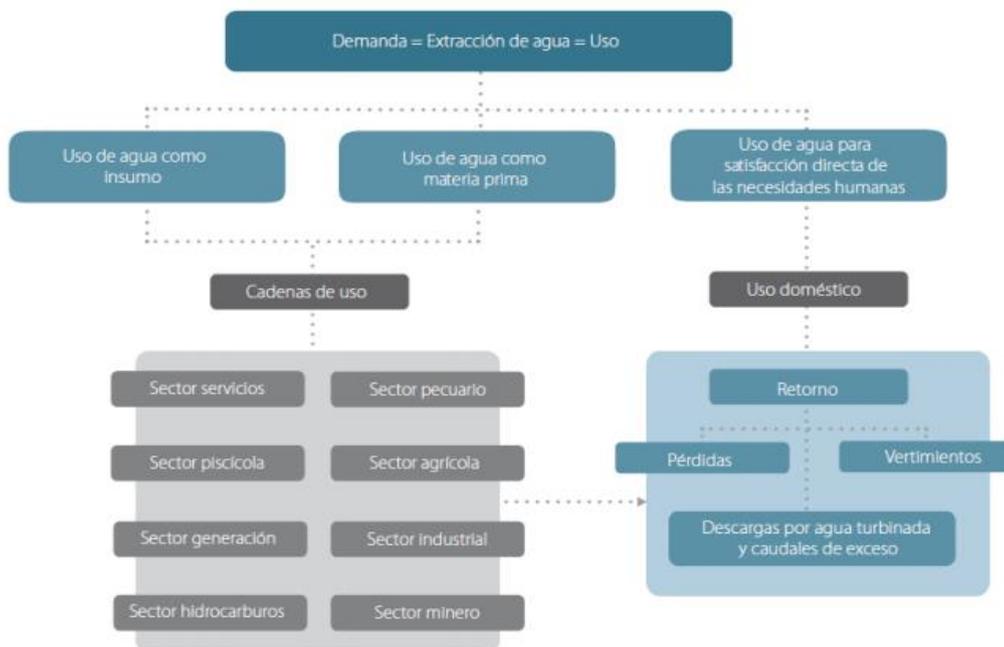
Hoy en día, la economía circular es aplicada de manera mínima por las entidades públicas prestadoras de servicio, en el caso del agua solo se hace un tratamiento del 10 % a nivel nacional, a pesar de que las plantas instaladas sobre el territorio cuentan para tratar hasta un 20% y se sigue con la descarga de agua contaminada a las fuentes hídricas, el ministerio de planeación y del medio ambiente afirmó que para el 2035 será necesario recurrir a la compra del recurso. Por otra parte, se tiene que Colombia genera 12 millones de toneladas de basura al año y solo se hace reciclaje de un 17%, y el porcentaje restante va a parar a rellenos sanitarios. Ahora bien, en el caso que realmente compete, es la reutilización de las aguas residuales, donde las construcciones que se han realizado para el tratamiento de aguas residuales son relativamente nuevas ya que no tienen de antigüedad más de 20 años. Colombia hace el tratamiento del 10% de las aguas residuales a pesar de contar con una capacidad instalada que alcanza el 20%. Según estudio que realizó la Unicef, determino que en el país solo existen 562 sistemas de tratamientos instalados y lamentablemente no todos funcionan para la finalidad que fueron hechos. Se hacen estimaciones que solo el 10 % de las plantas tienen un adecuado funcionamiento. Generalmente, se tiene una un tratamiento primario donde solo se hace la eliminación de los sólidos (decantación) la cual está en uso un 80%, seguida por un proceso secundario (lagunas) usadas un 44%, o los sistemas de aireación extendida 9,4% y el menos usados los filtros biológicos equivalentes a un 4%. Por tal, las plantas existentes solo alcanzan a hacer un tratamiento primario y algunas plantas como es el caso de Medellín que hacen tratamiento

secundario que remueven hasta un 80% de los contaminantes para luego verter las aguas tratadas a los ríos con mayor afluente (Ministerio del medio ambiente, 2015).



Actualmente, Colombia cuenta con una clasificación de uso consuntivo y no consuntivo, el uso consuntivo del agua es considerado como la utilización o alteración de la condición natural de ésta, con la intención de aumentar la producción de bienes y servicios, por ejemplo, para uso doméstico, agricultura y ganadería, industria y minería o generación de energía térmica. Este uso se caracteriza por la extracción del recurso de su lugar de origen, caso contrario sucede con el uso no consuntivo del agua es aquel que tiene lugar en la propia corriente, y ocurre en el ambiente natural de la fuente de agua, por ejemplo, la generación hidroeléctrica, la navegación, la mejora de la calidad del agua, la acuicultura y los fines recreativos (IDEAM, 2017).

Es importante tener presente el comportamiento de la demanda hídrica que se presenta a nivel Colombia, el cual determina los comportamientos para el desarrollo económico y social del país.



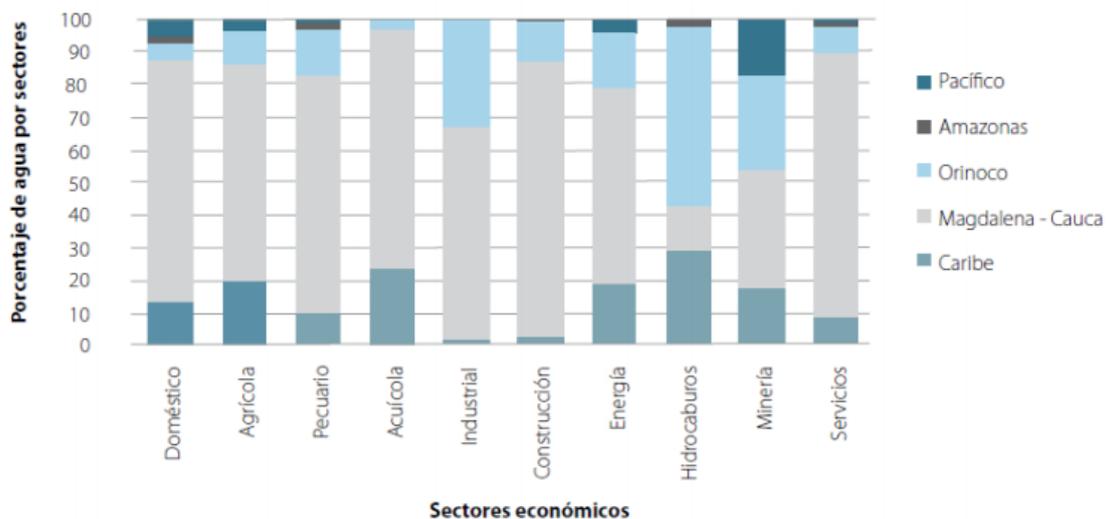
**Gráfico 6.1** Cadena de uso de agua. Fuente: IDEAM 2017

En relación con las cadenas de uso pertinente a cada uno de los sectores, se hace necesario saber de qué manera impactan con su uso. Como se ilustra en la gráfica 6.2 el porcentaje anual que se le atribuye, teniendo el primer lugar la agricultura (46,6%), energía (21,5%), pecuario (8,5%), domestico (8,2%), industrial (5,9%), acuícola (4,6%) y los sectores de hidrocarburos, minería y servicios son los que menos consumo generan.



**Gráfico 6.2** Distribución porcentual del uso de agua en Colombia. Fuente: IDEAM 2015

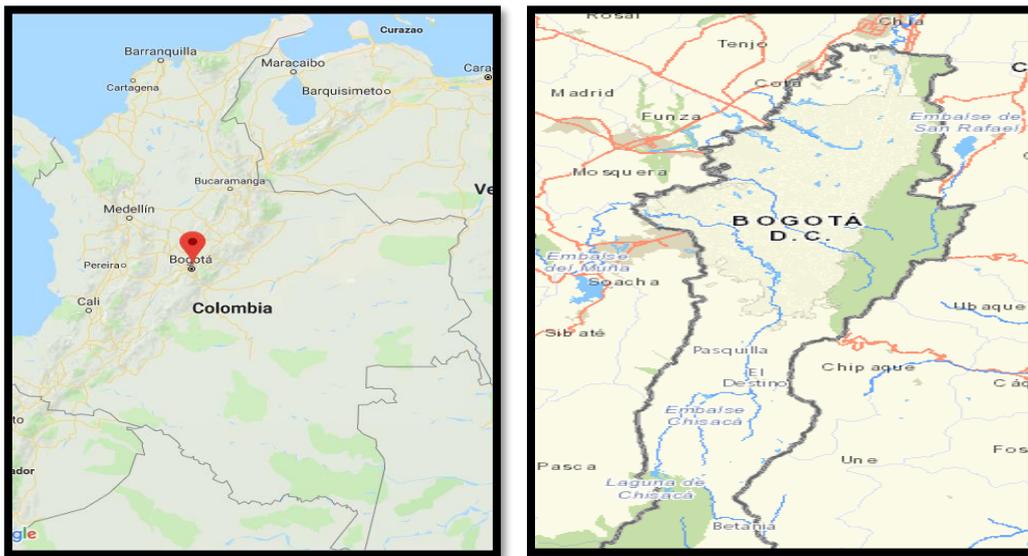
A nivel nacional se presenta una mayor presión de demanda por el recurso hídrico por áreas geográficas, Colombia se divide en 5 macrocuencas o áreas hidrográficas que permite identificar cual posee mayor consumo o cual está en riesgo de sequía. En la gráfica 6.3 se observa que aquellos sectores que tienen un mayor uso sobre los sistemas hídricos son Magdalena – Cauca, Caribe y Pacífico concentran el 98% del uso de agua en minería. El de hidrocarburos en el Orinoco alcanza el 76,3% y, en las áreas Magdalena y Cauca los sectores agrícola, pecuario y acuícola demandan el 55% del agua seguido de energía con el 29% (IDEAM, 2017).



**Gráfico 6.3** Porcentaje de uso de agua por sectores económicos y por área geográfica. Fuente: IDEAM 2017.

### 6.1.2 Bogotá

Bogotá es la capital de Colombia, cuenta actualmente con una población de con 8 080 734 habitantes, así mismo tiene una extensión territorial de total de 1 776 km<sup>2</sup> y un área urbana de 307 km<sup>2</sup>. Esta delimita al sur con los departamentos del Meta y del Huila al norte con el municipio de Chía, al oeste con el río Bogotá y los municipios de Cota, Funza, Mosquera, Soacha, por el este llega hasta los cerros de Choachí. Cuenta con 32 departamentos y el distrito capital de Bogotá.



**Gráfico 6.4** Ubicación geográfica de Bogotá. Fuente Google maps

El territorio donde se asienta la ciudad fue antiguamente un lago, por lo cual se afirma que más del 60% de la construcción se encuentran ubicados sobre humedales, un ejemplos son los humedales que cubren algunos sectores no urbanizados de la Sabana. Esta es una de las razones por las que se afirma que el recurso hídrico en Colombia es de 12 % del mundial. Ciertamente, al tener gran cantidad de este recurso hídrico no indica que todos tengan acceso ya bien sea en Bogotá u otras partes de Colombia.

Bogotá pertenece a la macrocuenca o zona hidrográfica del Orinoco, donde gran parte del suministro nacen en la cordillera Oriental, en los departamentos de Boyacá, Meta y Cundinamarca; luego transcurren a través de los llanos orientales por corrientes de grandes caudales como las de los ríos Meta, Guaviare, Inírida, Arauca, Vichada, Guayabero y Upía. El régimen hidrológico en toda el área es de tipo monomodal, con caudales máximos entre junio y agosto, mientras que los caudales mínimos tienen lugar entre enero y marzo. (ENA,2016).

Con la contextualización anterior, actualmente Bogotá presenta un crecimiento poblacional y desarrollo urbano e industrial a gran escala, lo cual ha provocado un aumento desmedido en la demanda de agua y por tal aumenta el volumen de aguas residuales, según el Ministerio del Medio Ambiente y la comisión reguladora de agua potable y saneamiento básico, más del 35% de agua residual tiene una disposición inadecuada o en el peor de los casos, van directamente a cuencas que suministran el recurso a otras áreas del país.

En la tabla 6.1, se presentan una caracterización general de Bogotá y a su vez se resaltan las actividades económicas predominantes.

<b>Aspectos generales de Bogotá</b>		<b>Unidades</b>
<b>Área urbana</b>	307	km <sup>2</sup> .
<b>Extensión territorial</b>	1 776	km <sup>2</sup> .
<b>Población</b>	8 080 734	Habitantes
<b>Uso de suelos</b>	Agrícola: 2 320	ha
	Ganadero: 1 684	ha
	Industrial: 2 980	ha
<b>Cobertura de red de agua potable</b>	97,5	%
<b>Cobertura de red de alcantarillado</b>	90,2	%
<b>Plantas disponibles para tratamiento de aguas residuales</b>	1	

*Tabla 6.1 Aspectos generales en Bogotá. Fuente: Elaboración propia.*

<b>Actividades económicas de Bogotá</b>		<b>Aporte %</b>
<b>Sector primario</b>	<b>Agricultura:</b> papa, cubios, ajos, hortalizas, viveros ornamentales y de floricultura.	23,6
	<b>Fruticultura:</b> fresa, mora, curuba, tomate de árbol, feijoa, breva y uchuva.	
	<b>Ganadería:</b> pollo, cerdo y bovino.	
<b>Sector secundario</b>	<b>Industrias:</b> alimentos, construcción, textiles, curtiembres e insumos de aseo	40
<b>Sector terciario</b>	Actividad financiera, turismo y hotelería y comercio establecido	36,3

*Tabla 6.2 Actividades económicas predominantes en Bogotá. Fuente: Elaboración propia.*

Todas las actividades económicas que se desarrollan en Bogotá hacen uso exclusivo de agua con los más altos estándares de calidad, según el Ministerio de Salud quien es el encargado de inspeccionar, controlar y vigilar que el agua esté libre de todo aquel patógeno y de sustancias tóxicas que puedan implicar un factor de riesgo para el individuo, con estos controles afirma que el agua tiene niveles bajos de coliformes totales y de E.Coli en cuanto características

microbianas y en características fisicoquímicas como color, turbidez, pH y cloro residual están por debajo de los límites que se permiten.

Debido a un crecimiento exponencial de la población que es directamente proporcional a la necesidad de producir más alimentos se hace necesario implementar nuevas estrategias que permitan regenerar y reutilizar el agua residual para incluirlas nuevamente dentro de la cadena de suministro y así tener soluciones inmediatas para las sequías que se están desde hace más de 3 años y que contribuyan a su vez al saneamiento de las cuencas hidrográficas.

## 6.2 Exigencias legales para la reutilización de aguas regeneradas en Bogotá

El reuso de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2001). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales el sector industrial, en el que ha sido muy empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias, y el agrícola, en la irrigación de cultivos.

El gobierno colombiano ha venido implementando desde las 2004 estrategias que permita sustituir el suministro de agua potable para la actividad agrícola, la causa principal como anteriormente se explico es la escasez del recurso por causa de la estacionalidad o la distribución irregular de la oferta y la demanda existente del recurso. Por otra parte, se incentiva ya que el uso de aguas residuales regeneradas presenta múltiples beneficios que van asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N y P) y oligoelementos, como Na y K, permitiendo reducir, y en algunos casos eliminar, la necesidad del uso de fertilizantes químicos y trayendo beneficios económicos al sector (Medeiros, 2005). Este tipo de estrategias se denomina economía circular donde sus pilares reposan en conceptos de sostenibilidad, durabilidad y reducción máxima de los residuos.

Con la definición anterior se logra impactos positivos, donde el medio ambiente es receptor de las aguas tratadas que se unen nuevamente al ciclo hídrico, por otra parte, se evita el vertimiento directo de las aguas residuales que pueden llegar a recargar acuíferos de aguas subterráneas reduciendo los costos de tratamiento de dichas aguas y de contaminación de suelos al reducir (Cepis, 2004).

Con el fin de limitar el ámbito de aplicación de las aguas regeneradas en Bogotá se ha de cumplir con la legislación vigente en materia de control de aquel cuerpo receptor de agua tratada. En la

Resolución 1207 /2014 dispone, en su artículo 6 los usos a los que pueden ir direccionada las aguas regeneradas. En primer lugar, se puede hacer uso para:

**a) Uso agrícola:**

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.
- Campos de golf.

Dentro del uso agrícola se incluyen los usos recreativos

**b) Uso industrial:**

- Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
- Descarga de aparatos sanitarios.
- Limpieza mecánica de vías.
- Riego de vías para el control de material particulado.
- Sistemas de redes contra incendios.

Calidad del agua del efluente						
Parámetro	Unidad de medida	Criterio de calidad para la reutilización				
		Agricultura (irrigación)	Industrial			
			<i>Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas</i>	<i>Descarga de aparatos sanitarios</i>	<i>Limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de material particulado</i>	<i>Sistemas de redes contraincendios</i>
pH	E	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
Coliformes termotolerantes	NMP/100mL	1,0*E (+3)	1,0*E(+3)	1,0*E(+4)	1,0*E(+3)	1,0*E (+1)
Enterococos Fecales	NMP/100mL	1,0*E (2)	-	-	-	-
Helmintos parásitos humanos	huevos larvas/L	1	0,1	1	1	0,1
Protozoos parásitos humanos	Quistes/L	1	0	1	1	1
Salmonella sp	NMP/100mL	1	1	1	1	1
DBO 5	mg/L	0	1	1	1	1
Fenoles totales	mg/L	1,5	-	-	-	-
Cianuro libre	mg CN/L	0,2	-	-	-	-
Cloruros		300	-	-	-	-
Sulfatos	mgSO24 -/L	500	-	-	-	-
mercurio	mg Hg/L	0,002	0,001	-	0,001	-
material flotante	-	Ausencia total	Ausencia total	-	-	-
Sólidos en suspendidos	mg/L	Ausencia total	Ausencia total	-	-	-
Grasas y aceites	mg/L	Ausencia total	Ausencia total	-	-	-
Cloro total residual (con mínimo de 30 minutos de contacto)	mgCl2/L	Menor a 1	-	-	-	-
Nitratos (NO3-, N)	mg/L	5	-	-	-	-

**Tabla 6.3** Criterios de calidad para las alternativas de reutilización. Fuente. Resolución 1207/2014.

Como se observa en la tabla 6.3 los criterios de reutilización de agua residual regenerada solo cubren dos sectores en primer lugar está el sector agrícola el cual es el que hace mayor uso de agua seguido por el sector industrial. Esta norma gira entorno a generar conciencia de la escasez de este recurso no renovable, este se empalma directamente con la formulación realizada por el Gobierno Nacional Compes 3177 del 2002 donde se estipula un plan nacional de manejo de agua residuales, dando unas bases y lineamientos para priorizar aquellos procesos que permitan tratar las aguas residuales de ya sean de procedencia doméstica, industrial, comercial, minera entre otras.

Los parámetros más importantes a los cuales se les hace control corresponden principalmente a:

- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Coliformes termotolerantes
- Demanda biológica de oxígeno (DBO5)
- Grasas y aceites
- Nitratos
- Cloro total

A pesar de la existencia de una regulación establecida por el gobierno colombiano se refuerzan bajo las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en cuanto el manejo preventivo de las aguas residuales para asegurar la salud pública, la guía incluye no solo el análisis microbiano del agua regenerada si no que a su vez la composición de los suelos y dependiendo del tipo de cosecha. Esto varía según el tipo de suelo y clima.

Por otra parte, Colombia también sigue lineamientos de la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).

Para finalizar, los requerimientos legales también se tiene la Ley 373 de 1997 que procedió a modificar parcialmente por la Ley 812/2003 y la Ley 1339/2009 donde promueve en su artículo 50 la reutilización obligatoria del agua, pero ha de contar con una cadena de procesos técnicos que aseguren la calidad para ser dispuesta al fin que se le pretende dar; por otra parte, también tiene que ser viable económicamente según el análisis socioeconómico y las normas de calidad ambiental.

Con la implementación de nuevas leyes que rigen en materia medio ambiental se comenzó a proyectar desde el 2004 que todas las granjas agrícolas (cultivos de hortalizas, flores y pastos), ganaderas e industriales deberían hacer uso de aguas residuales previamente tratada.

### 6.3 Exigencias legales para el uso de los lodos en Bogotá

Hoy en día, se está presentando un gran aprovechamiento de aquellos subproductos que se derivan del proceso de tratamiento de aguas residuales, el principal subproducto son los lodos en donde muchos países que no cuentan con la tecnología optan por una incineración, la cual debería ser la última en contemplarse, pero algunas veces se convierte en una única posibilidad ante la ausencia de inversión o de terreno para su aprovechamiento.

La gestión de los lodos en Bogotá, Colombia está regulada en el decreto 1287 del 10 de junio del 2014, donde se pretende darle el mayor uso siempre y cuando cumpla con algunas características de carácter obligatorio.

Los criterios de calidad se describen en la tabla 6.4, donde se clasifican en dos tipos de categorías para la reutilización, la categoría A y B.

Dentro de la categoría A se puede utilizar los lodos para:

- En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos
- Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- En agricultura.
- Los mismos usos de la Categoría B.

Y dentro de la categoría B se pueden disponer para

- En agricultura, se aplicará al suelo.
- En plantaciones forestales.
- En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
- Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original.
- Para remediación de suelos contaminados
- Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.

- En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.
- En la operación de rellenos sanitarios tomo: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.

Calidad de lodos			
Parámetro	Unidad	Criterio de calidad para la reutilización	
		Categoría A	Categoría B
<b>Químicos metales</b>			
Arsénico (As)	mg/Kg de biosólido (base seca)	20	40
Cadmio (Cd)		8	40
Cobre (Cu)		1.000,00	1750
Cromo (Cr)		1.000,00	1500
Mercurio (Hg)		10,0	20,0
Zinc (Zn)		2.000,00	2800,0
<b>Microbiológicos</b>			
Coliformes fecales	(NMP/g)	<1,0 E (+3)	<2,0 E (+6)
Huevos de helminto	(Huevos/4 g)	<1	<10,0
Salmonela	UFC / en 25 g de biosólido (base seca)	Ausente	Ausente

**Tabla 6.4** Criterios de calidad para las alternativas de tratamiento de lodos. Fuente. Decreto 1287 /2004.

Los antecedentes colombianos en cuanto manejo directo de los lodos se regulan por el decreto anteriormente expuesto y por la normativa RAS 2000 que se pasó a nivel de Resolución 1096 de 2000. En este marco legal se estipulan las características finales que deben de tener los lodos y sus posibles usos, pero no hace referencia a ningún tipo de gestión típica.

#### 6.4 Características del afluente y efluente en la PTAR “El Salitre”

Con los procesos que ya se han descrito anteriormente para el tratamiento de aguas residuales se tiene una caracterización del efluente que se obtiene de la PTAR El Salitre, se procede a describirle a continuación, de conformidad con el reporte promedio del año inmediatamente anterior (2017):

Parámetro	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Caudal (m <sup>3</sup> /año)	13 132 620 (4.16 m <sup>3</sup> /s)	127 006 540 (4,06 m <sup>3</sup> /s)
Carga Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5) (Kg/día)	94,412	31,731
Concentración Biológica de Oxígeno (DBO5) (mg/L)	273,28	180,19

**Tabla 6.5** Caracterización del afluente y efluente 2017. Fuente: planta de tratamiento El Salitre.

En comparación con los parámetros estipulados en la tabla 6.5 y el decreto 1207 /2004, se propone un sistema de tratamiento de aguas residuales que se adapte a los requisitos legales, técnicos, económicos, ambientales y sociales los cuales son aspectos de suma importancia para pasar de un modelo lineal a uno circular.

### 6.5 Características del lodo de la PTAR “El Salitre”

Las características finales de los lodos obtenidos “biosólidos” tienen las siguientes características descritas en la tabla 6.6.

Parámetro	Tonelada final de lodos.
Humedad %	59
Sequedad %	41
Producción (tonelada /mes)	4 200
Arsénico (mg/Kg)	0,47
Cadmio (mg/Kg)	2.78
Mercurio (mg/Kg)	0,85
Cromo (mg/Kg)	180

**Tabla 6.6** Caracterización de la salida de los lodos después del tratamiento 2017. Fuente: base de datos “El salitre”.

Estos lodos cumplen con la normatividad vigente ya que se reduce la humedad en un 41% y contiene bajos contenidos de elementos que son críticos para la reutilización, estas pequeñas cantidades permiten que este biosólido sea muy eficiente para la remediación de suelos por su contenido en nutrientes permitiendo que sea fértil.

## Capítulo 7 Metodología

En la búsqueda de la mejor alternativa, se desarrolla un análisis comparativo que inicia con una valoración de la eficiencia y calidad de cada uno de los procesos, seguido se realiza una evaluación de los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento. Así mismo se determina por el análisis de los parámetros técnicos, ambientales y sociales las cuales definen su posibilidad de ejecución como proyecto de éxito en diferentes ámbitos medibles.

Esta propuesta abarca dos tecnologías que se desconocen hasta el día de hoy y las cuales fueron planteadas debido a su alta eficacia a nivel mundial, más sin embargo, acarrear un alto costo. Para calcular los costos, se realizó una combinación de tratamientos, las cuales se llaman trenes de tratamiento. Se realizó el mismo procedimiento para la línea de aguas y lodos.

### 7.1 Propuesta de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la planta “El Salitre”.

La propuesta planteada a continuación se basa en los aspectos y parámetros estipulados por la legislación colombiana y por los convenios adoptados internacionalmente con la organización mundial de la salud y la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura.

La presentación de dichas propuestas pretende trascender más allá de lo exigido ya que como es conocido la ley está en constante cambio y por ende se genera mayor incertidumbre si las tecnologías aplicadas van a cumplir con las nuevas normas, y el aspecto que es más importante es el beneficio que conlleva la implementación de la propuesta para el medio ambiente y su relación costo - beneficio.

Para iniciar la propuesta se ha de seguir con lo que ya se cuenta en la planta de tratamiento, donde se tiene un proceso de pretratamiento que elimina del agua los sólidos de tamaño medio que son aportados al agua antes de su proceso de vertido o en su proceso de conducción, este consta de a) Desbaste grueso y fino, b) Desarenado y desengrase y c) la aplicación de dosificación de productos químicos que actúan de coagulante y floculante.

El tratamiento primario este compuesto de una sedimentación primaria cuyo objetivo principal es remover los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda, logrando de manera simultánea alguna remoción de materia orgánica. Aquí se presenta la floculación de los sólidos, la cual se logra gracias a la inyección de productos químicos. Estos sedimentadores son de forma circular y están dotados de puentes barre lodos para raspar el lodo que cae al fondo y concentrarlo en una tolva.

El tratamiento que se le da a los lodos inicia con un proceso de 1) clarificación: cuyo comportamiento es igual al de un decantador permitiendo sedimentar los sólidos suspendidos, luego le sigue el proceso de 2) espesamiento: el cual corresponde a una sedimentación y a una compresión de las partículas continuando con un 3) digestor de lodos para reducir la materia orgánica presente en ellos (estabilizarlos) y hacerlos de ésta manera menos nocivos al medio ambiente, además de disminuir su volumen. Y finalmente pasan por un proceso de deshidratación, pasando por 5 filtros de banda que extraen el agua a los lodos con el fin de obtener un biosólido fácilmente manejable. Estos lodos son enviados para remediación de suelos.

Ahora bien, se hace la propuesta de un tratamiento secundario encaminado a la eliminación de materia orgánica coloidal, sólidos suspendidos y de compuestos orgánicos biodegradables alguno de estos procesos puede ser aerobios o anaerobios y los tratamientos terciarios son aquellos que logran la eliminación de aquellas sustancias específicas ya bien sean nutrientes, compuestos tóxicos, excesos de materia orgánica o sólidos en suspensión.

Es de resaltar que la propuesta planteada para la regeneración de aguas residuales requiere consideraciones adicionales por la obtención de subproductos obtenidos en el proceso principal.

Como se plantea un tratamiento secundario y terciario también se hace necesario desarrollar una propuesta para el manejo póstumo que se les dará a los lodos que se generan en estas etapas.

En la tabla 7.1 se describe específicamente las características de cada una de las opciones planteadas para los trenes de la línea de aguas.

Alternativas para el sistema de tratamiento de aguas residuales planta "El Salitre"						
Nivel	Objetivo	Unidad de tratamiento	Contaminantes eliminados	Calidad del vertido	Mecanismo predominante	Eficiencia de la remoción
Preliminar	Eliminar contaminantes de gran y pequeño tamaño, al igual que la eliminación de sustancias viscosas.	Desbaste grueso y fino	Gruesos orgánicos, Plásticos, Aceites grasas, Arena, Materiales celulósicos	Muy baja	Físico	DBO (0- 5%), Coliformes totales (0%), Nutrientes (0%)
		Desarenado y desengrase				
Primario	Eliminación de una fracción de contaminantes sólidos suspendidos ya sean flotantes y sedimentables.	Sedimentador o Decantador primario	Materiales flotantes (plástico, celulosa, aceites, grasas), Material sedimentable (heces, restos de alimentos, pelos y arena)	Baja	Físico	SS (60-70%), DBO (30-40%), Coliformes totales (30-40%), Nutrientes (<20%)
Secundario	Eliminación de materia orgánica biodegradable en forma coloidal y disuelta. Eliminación de sólidos suspendidos resistentes al tratamiento primario. Eliminación parcial de nutrientes.	1.Lodos activados -aerobio 2. Sedimentadores secundarios.	Aceites y grasas emulsionadas, hidratos de carbono, jabones	Mediana	Biológicos y químicos	SS (60-99%), DBO (60-99%), Coliformes totales (60-99%), Nutrientes (10-55%)
		1)Tanque de aireación 2) Sedimentadores secundarios.		Mediana		
		Filtros percoladores (con recirculación)		Mediana		
		Biorreactor de membranas.		Muy alta		
Terciario	Eliminación total de nutrientes, eliminación de patógenos, eliminación de materia orgánica refractaria, eliminación de sales y metales.	Cloración (Desinfección con cloro)	Sales y metales, materia orgánica refractaria, patógenos	Muy alta	Biológicos y químicos	SS (>99%), DBO (>99%), Coliformes totales (>99,9%), Nutrientes (>90%)
		1.Filtración 2. Desinfección				
		1.Floculación 2. Filtración 3. Desinfección y luz ultravioleta				

Tabla 7.1 Alternativas para el tratamiento de aguas residuales "El salitre". Elaboración propia.

Para el tratamiento de los lodos resultantes de la línea de agua se plantea un complemento que amplía la visión de uso de los lodos no solo para la regeneración de suelos, si no a su vez como material de compostaje, para insumo para la elaboración de materiales destinados a la construcción o como insumo para la generación de energía para cementeras.

En la tabla 7.2 se proponen un tipo de tratamientos complementario a los existentes ya que los lodos secundarios no requieren tanto tratamiento como los iniciales, pero muchas veces se opta por hacer una unión de ambos subproductos finales para unificar procesos.

En este caso, se parte de que los tratamientos existentes están sobre diseñados lo que indica que tienen mayor capacidad de tratamiento a las cantidades habituales, por tanto, se configura tratamientos que ayuden a mejorar la calidad de los lodos finales aumentando el porcentaje de materia seca y eliminando algunas sustancias volátiles. Estas opción se caracteriza por un alto costos de implementación y manejo, pero ofrece la una alta calidad de lodo final que se puede cotizar muy bien en el mercado

<b>Propuesta para tratamiento de lodos</b>					
<b>Tratamiento</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Resultado final</b>	<b>Calidad del lodo</b>	<b>Mecanismo predominante</b>	<b>Eficiencia</b>
<b>Espesamiento inicial</b>	Eliminación de fracción líquida	Aumento de contenido sólido de lodos	Baja	Físico	0,4 - 6% materia seca
<b>Digestor anaerobio (lodos primarios)</b>	Estabilización de la materia orgánica y reducir su porcentaje de agua	Oxidación de los fangos y reducción del volumen al digerirse la materia orgánica	Baja	Biológico	7 - 28% materia seca
<b>Tratamiento por bandas de deshidratación</b>	Eliminación de gran porcentaje de agua y compactación de los lodos restantes.	Eliminación de gran porcentaje de agua	Media	Físico	25-35% materia seca
<b>Tratamiento por secado térmico (tambor rotativo)</b>	Reducir el contenido de agua por vaporización al adicionar calor externo. También se eliminan sustancias volátiles.	Lodos listos para ser utilizados dependiendo de la ley vigente	Alta	Térmico	95% materia seca

**Tabla 7.2** Alternativa para el tratamiento de lodos en la planta "El salitre". Elaboración propia

## 7.2 Selección de trenes de tratamiento

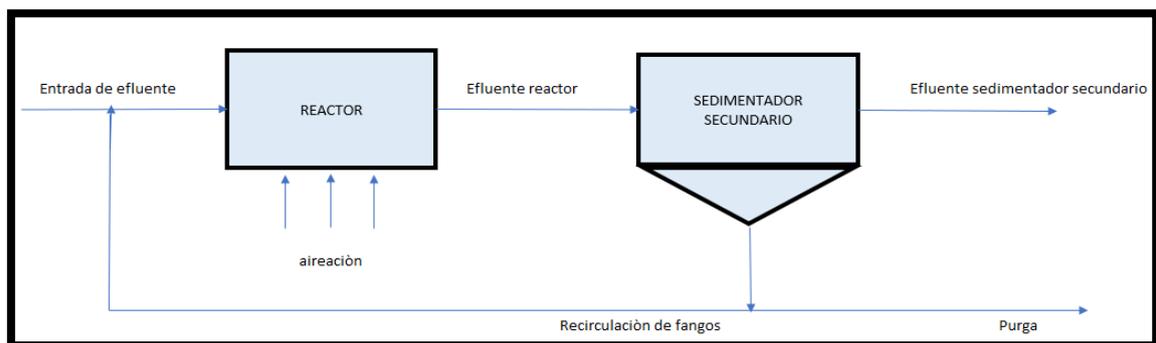
Para seleccionar la mejor alternativa se optó por una metodología multicriterio, adecuándola a las exigencias legales, económicas y sociales, para ello se tomó los siguientes criterios:

1. Características de la tecnología
2. Factibilidad en la posible implementación
3. Costos de inversión - Costos de operación y mantenimiento – Precio mínimo de venta de agua regenerada.

### 7.2.1 Funcionamiento de los tratamientos propuestos

#### 7.2.1.1 Tratamiento por lodos activados seguido por sedimentadores secundarios

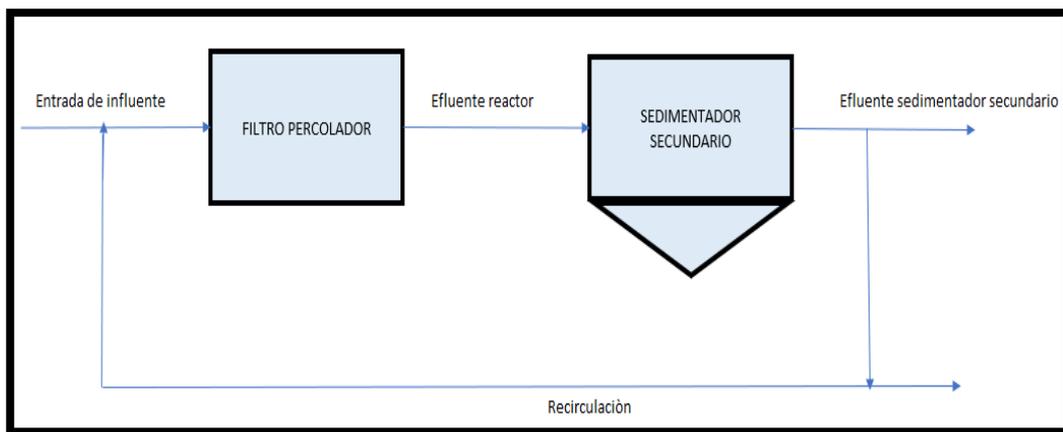
El sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de lodos activados fue desarrollado por Arden y Lockett en Inglaterra en 1914. Su funcionamiento se basa en la existencia de microorganismos que están vivos y sobre existen en este medio ya que consumen la materia orgánica presente en el agua, estos logran estabilizar los desechos orgánicos bajo condiciones aerobias, esto indica que necesitan del oxígeno para poder vivir. El ambiente aerobio se logra mediante la aireación inferior inducida por una bomba; junto con el proceso de degradación y para separar los flóculos del agua se lleva a unos sedimentadores secundarios donde se realiza no solo una recirculación parte de los fangos que ayuda a mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior si no que a su vez se obtienen lodos con un porcentaje más alto de calidad. A continuación, se ilustra el proceso de fangos activados figura 7.1



**Figura 7.1** Procesos de fangos activados tratamiento de aguas residuales. Fuente: elaboración propia.

### 7.2.1.2 Tratamiento por filtros percoladores seguido por sedimentadores secundarios

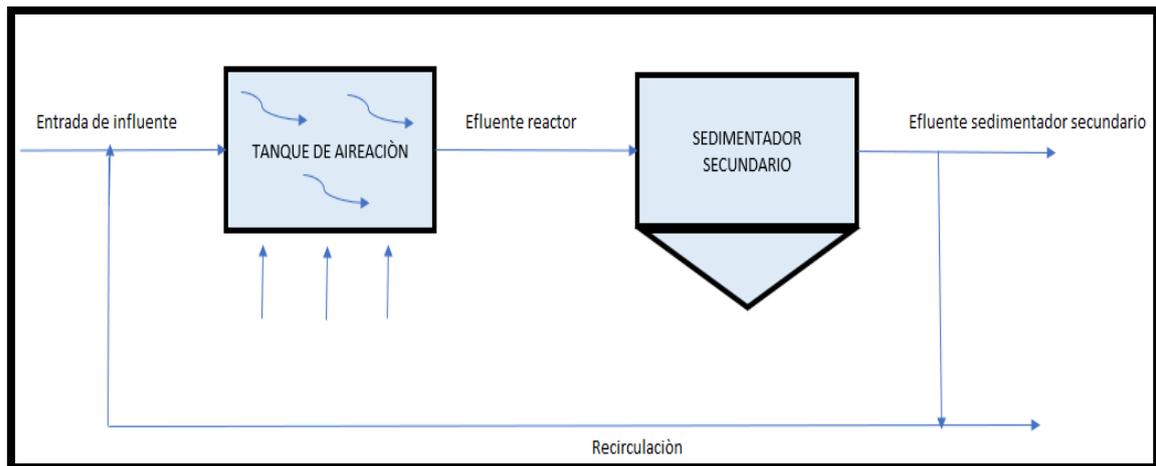
Los filtros percoladores también son llamados filtros biológicos o lechos bacterianos, se caracterizan porque son sistemas aerobios de biomasa inmovilizada, suelen ser lechos fijos de gran diámetro rellenos con roca o con piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie. Sobre esta superficie crece una delgada capa de biomasa sobre la cual se dispersa el agua residual a tratar as mismo se debe contar con espacio para que circule el aire que asciende de forma natural. Este crecimiento de biomasa hace que se desprenda parte de los microorganismos que se encuentran en la superficie y por eso se pasa el efluente a un proceso subsiguiente que son los sedimentadores secundarios que permite que todo aquello que se desprendió se sedimente para luego ser tratado como lodos secundarios. En este tipo de proceso se requiere un aspecto fundamental que es la velocidad con la que pasa la carga orgánica que van de la mano con las dimensiones. Observar la figura 7.2



**Figura 7.2** Procesos de filtros percoladores tratamiento de aguas residuales. Fuente: elaboración propia.

### 7.2.1.3 Tratamiento por tanque de aireación seguido por sedimentadores secundarios

El proceso de tratamiento secundario por medio de un tanque de aireación se basa en reacciones biológicas del agua donde se pone en contacto directo con aire para que se presente el proceso de eliminación de los contaminantes presentes en el agua. Este tratamiento también involucra una mezcla de lodos activados. Antes de que el agua a tratar entre a este tanque, se mezcla con un lodo activo que contiene un número elevado de microorganismos (bacterias), que son capaces de romper los coloides y disolver la materia orgánica disuelta en el agua. Este tratamiento es poco común ya que tiene unos altos costos de funcionamiento y solo es recomendable para plantas pequeñas o medianas. Observar figura 7.3.



**Figura 7.3** Procesos de tanque de aireación tratamiento de aguas residuales. Fuente: elaboración propia.

#### 7.2.1.4 Tratamiento por cloración y UV para tratamiento de aguas

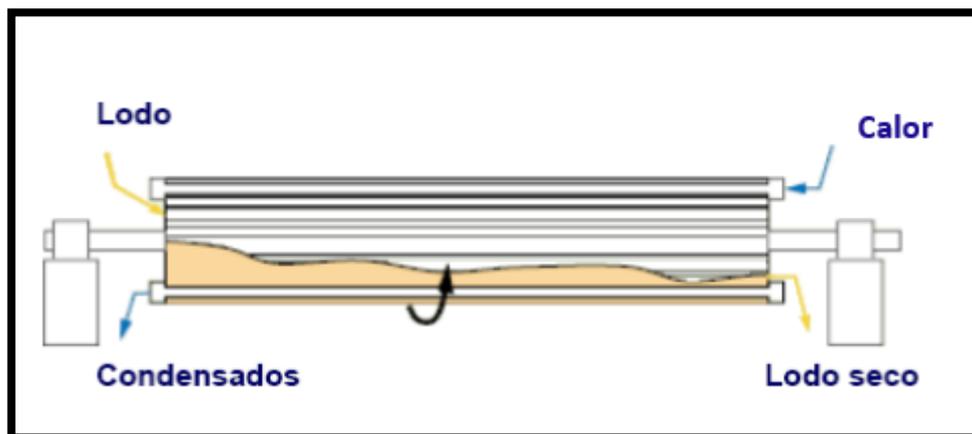
La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que pueda causar enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. En aguas residuales industriales, el objetivo de la desinfección es eliminar o desactivar patógenos, o cualquier otro organismo vivo, para lograr un efluente limpio que permita la reutilización del agua. La desinfección persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica. Este tratamiento es uno de los más utilizados ya que es el oxidante con mejores resultados esto depende de igual forma de la concentración del cloro y del tiempo de contacto con el agua residual. Pero este tratamiento tiene a su vez el actuar de un segundo mecanismo de desinfección que es la luz UV, este consiste principalmente en inactivar al microorganismo por medio la luz UV produciendo un daño fotoquímico a sus ácidos nucleicos la luz UV brinda una desinfección efectiva sin generar subproductos, pero demanda mantenimiento y calibración constante (Sonntag, 2000).

#### 7.2.1.5 Tratamiento por filtración y desinfección para tratamiento de aguas

Este tratamiento terciario se caracteriza por tener una última filtración del agua por medio de un material granular que permite retirar aquellas bacterias o microorganismos sobrantes del efluente, al tener paso por este se direccionan para posteriormente hace una desinfección final por medio de una solución clorada que como anteriormente se explicó elimina cualquier patógeno u organismo vivo restante en el efluente final. Este método es un poco costoso por la construcción del medio filtrante.

#### 7.2.1.6 Tratamiento de lodos finales por medio de secado térmico (tambor rotativo)

En el proceso de secado térmico se hace eliminación del agua que contiene los lodos en su parte capilar que permanece tras la deshidratación mecánica, este secado se caracteriza por sus altas temperaturas que permiten hacer reducción del volumen, para poder concentrarlos los compuestos para su posterior valorización y aumento del poder calorífico y estabilizando que de tal forma no generen daños adversos al momento de ser utilizados como producto sustitutivo que se valoriza como fertilizantes para uso agrícola, como materia prima para la elaboración de productos de la construcción o también para combustible "verde" para industrias como las cementeras (Metcalf, 2013). Generalmente, el tiempo de permanencia de los lodos oscila entre 30- 45 minutos y la temperatura promedio gira en torno a 120 a 150°C. Están constituidos por un cilindro giratorio con un eje inclinado para favorecer el movimiento de los lodos el proceso. En este proceso se genera agua evaporada y otras sustancias que se van purgando en el circuito cerrado. Por otro lado, la energía liberada en este proceso se utiliza como energía de combustión adicional en el intercambiador, para el proceso de secado (Metcalf, 2013).



**Figura 7.4** Procesos de secado térmico de lodos en tambor rotativo. Fuente: Pesa.

A continuación, se inicia con la estructuración de los trenes de tratamiento planteados anteriormente en la tabla 7 línea de agua. Desde un inicio se deja dos opciones descartadas, la primera se encuentra postulada como tratamiento secundario (biorreactores de membranas) la cual posee un alto costo en el mercado e implica importarlas desde ya bien sea desde Estados Unidos o de Europa, así como los costos de aireación y de limpieza, requiere personal calificado y su vida útil oscila entre 4-8 años, por lo tanto si se requiere el cambio de alguna unidad de la membrana que se averíe se incurrirá en más costos.

Ahora bien, en el tratamiento terciario se descarta la opción de cuatro procesos integrados en un solo método de regeneración de aguas residuales (Floculación, Filtración, Desinfección y luz ultravioleta) debido principalmente a los altos costos de construcción de infraestructura, de materias primas y de terreno ya que se pretende que todo quede delimitado en la misma planta de tratamiento ya existente.

Siendo así, se tiene 6 tipos de trenes de tratamiento que tienen como fin la remoción de material suspendido, nutrientes, materia orgánica biodegradable en forma coloidal y disuelta ya bien sea por medio filtrante, sedimentación o sistemas aerobios, eliminación de microorganismos por medio de desinfección de cloro o luz ultravioleta.

Se tiene considerado el uso de procesos para el tratamiento de los subproductos generados en la línea de agua, pretendiendo que sean de bajos costos como espesadores por gravedad, por deshidratación o por secado térmico antes de su posterior disposición como reusó en la agricultura, en recuperación de suelos o como compostaje.

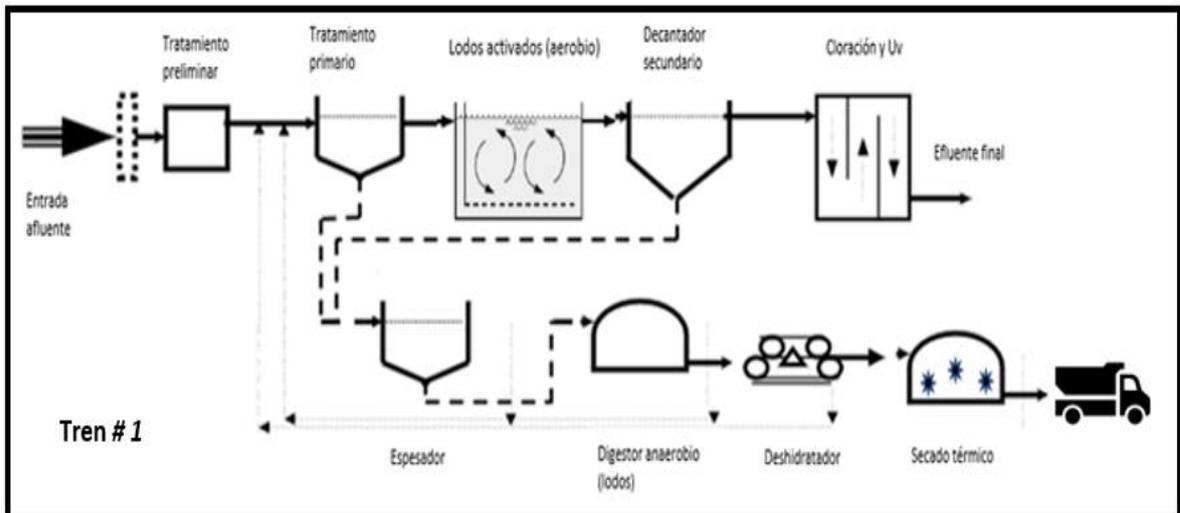
En la tabla 7.3 se establecen las diferentes combinaciones posibles de trenes:

Opción	Tren de tratamiento de aguas residuales y lodos
1	Preliminar + Trat. Primario + Lodos activos aerobio + decantador secundario+ Cloración y UV + Espesamiento + digester anaerobio (lodos) + Deshidratador + Secado térmico
2	Preliminar + Trat. Primario + Lodos activados aerobio + decantador secundario + Filtración Desinfección +Espesamiento+ digester anaerobio (lodos) + Deshidratador+ Secado térmico
3	Preliminar + Trat. Primario +Tanque aireación - Sedimenta secundarios + Cloración y UV + Espesamiento + digester anaerobio (lodos) + Deshidratador+ Secado térmico
4	Preliminar + Trat. Primario +Tanque aireación - Sedimenta secundarios + Filtración Desinfección + Espesamiento + digester anaerobio (lodos) + Deshidratador+ Secado térmico
5	Preliminar + Trat. Primario + Filtros percoladores (con recirculación) + decantador secundario +Cloración y UV + Espesamiento + digester anaerobio (lodos)+ Secado térmico
6	Preliminar + Trat. Primario + Filtros percoladores (con recirculación) + decantador secundario + Filtración desinfección + Espesamiento + digester anaerobio (lodos) +Secado térmico

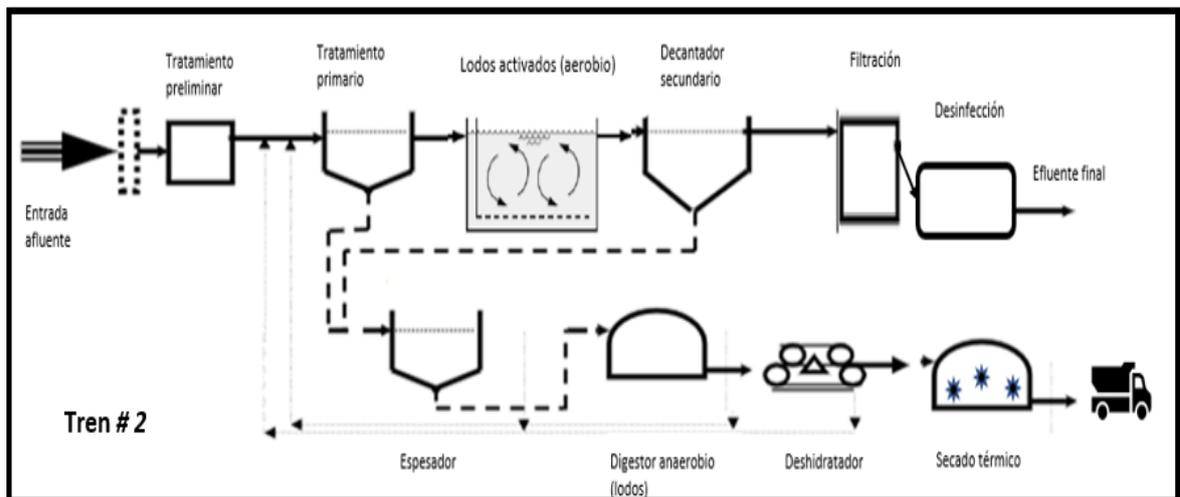
**Tabla 7.3** Trenes propuestos para el tratamiento de la línea de agua y de lodos para la planta de tratamiento “El salitre”. Elaboración propia.

Para concluir, este apartado considera la efectividad para alcanzar la mejor calidad deseada que se adecue con la legislación colombiana y al menor costo, permitiendo volver a reutilizar aquellos residuos que se creían no reutilizables. La conjugación de estos criterios de evaluación permitirá argumentos de peso para determinar el tren de tratamiento óptimo.

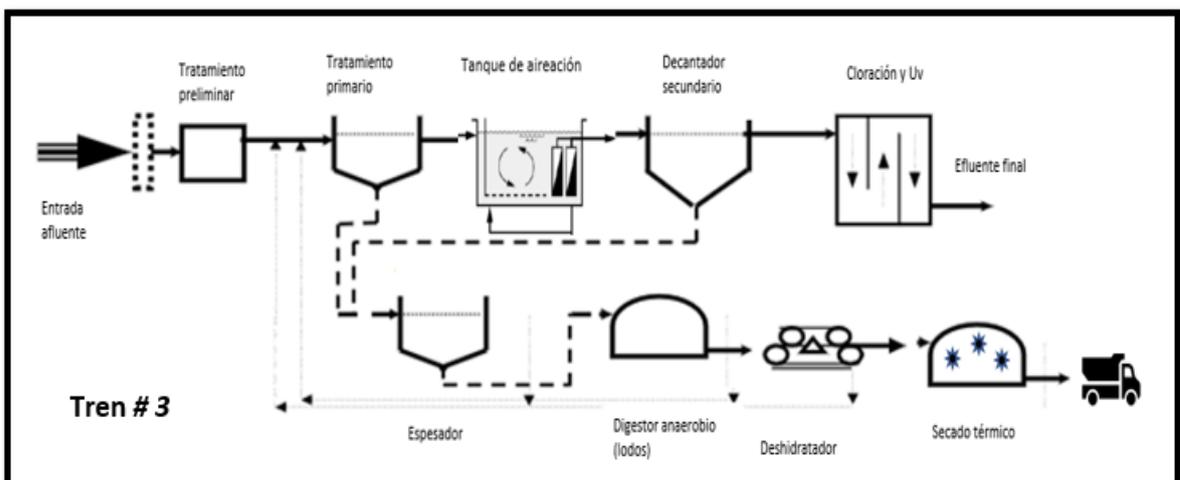
En las figuras subsiguientes se muestran los diagramas de flujo de los trenes de tratamiento de aguas residuales y de lodos que se propusieron para el desarrollo del presente estudio.



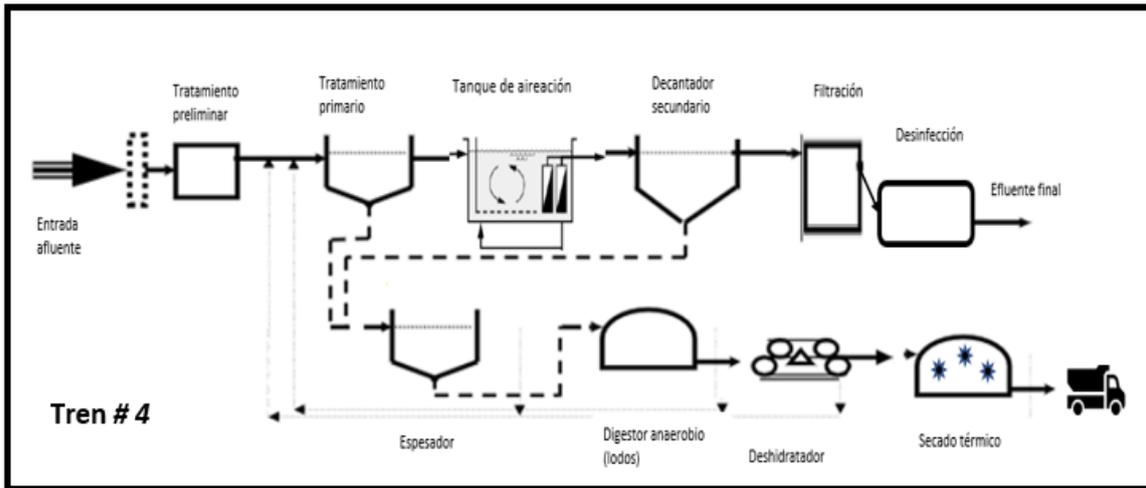
**Figura 7.5** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #1. Elaboración propia.



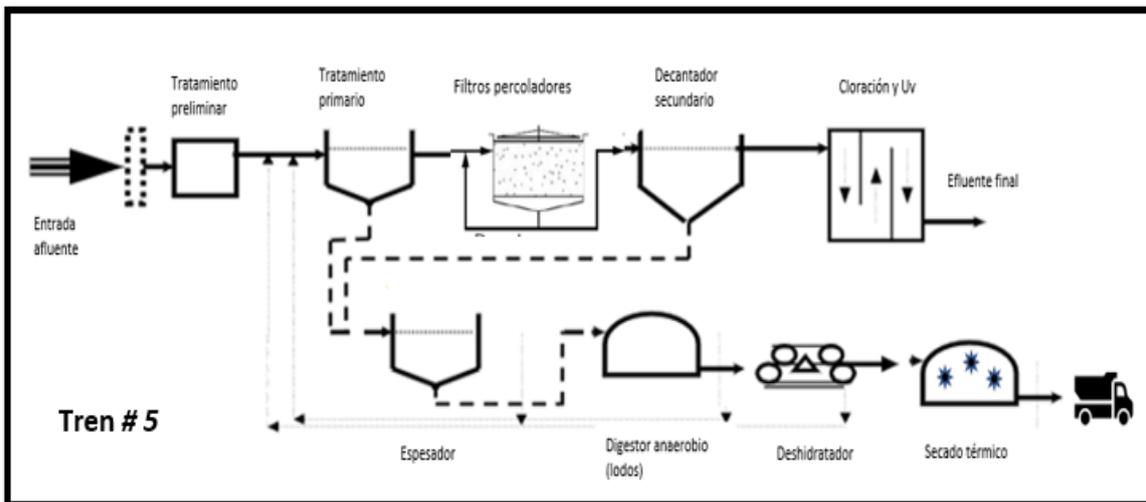
**Figura 7.6** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #2. Elaboración propia.



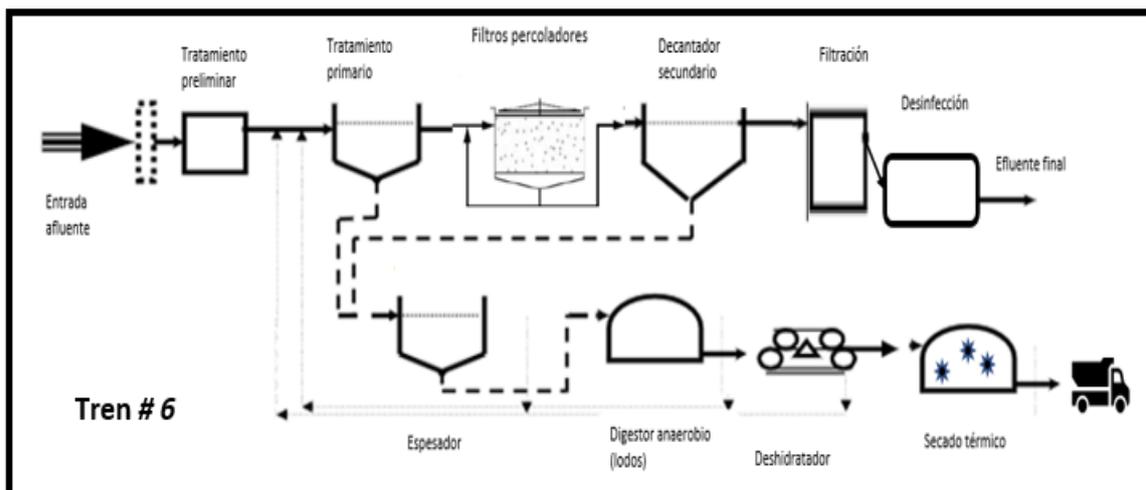
**Figura 7.7** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #3. Elaboración propia.



**Figura 7.8** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #4. Elaboración propia



**Figura 7.9** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #5. Elaboración propia.



**Figura 7.10** Tren de tratamiento de línea de agua y lodo #6. Elaboración propia

### 7.3 Aspectos económicos

Para realizar la valorización económica de los diferentes trenes de tratamientos planteados para el sistema de regeneración de aguas y su posterior reutilización se ha identificado diferentes aspectos que se describen a continuación:

#### 7.3.1 Análisis costo beneficio

Para determinar la viabilidad económica que va asociada a diferentes propuestas de tratamiento de aguas residuales se utiliza el método de análisis costo-beneficio. Este análisis se sustenta en el hecho de comprobar que el costo en el que se está incurriendo es eficaz, es decir, que consiga hacer el tratamiento de las aguas residuales a un costo mínimo.

Dentro de este método de análisis se hace la identificación de aquellos impactos ya existentes y los derivados de la realización del tratamiento basados en las ventajas y costos de inversión, operación y mantenimiento. Esto permite de igual forma comparar costos marginales de producir agua regenerada vs el costo de obtener una cantidad de agua proveniente de otra fuente de suministro.

El principal objetivo de la metodología de valorización se basa en analizar el comportamiento económico de la planta de tratamiento al económica incluye todos los costos y beneficios privados que sean medibles en términos financieros, esto indica que se maximizan los beneficios totales, es decir, que, a partir de los beneficios privados, de las externalidades ya bien sean positivas o negativas y de los costos de oportunidad.

La expresión para calcular la maximización está dada de la siguiente forma:

$$MAX B_T = \sum_{n=0} [(VAR_n * PV_n) - (CI_n + CEM_N + CF_n + IMP_n) + (EP_n - EN_n) - CO_n]$$

Donde

**BT**= Beneficio Total

**VAR**= Volumen anual de Agua Regenerada

**PV**= Precio de Venta de agua regenerada

**CI**= Costo de Inversión

**CEM**= Costo de Explotación y Mantenimiento

**CF**= Costos Financieros

**IMP**= Impuestos

**EP**= Externalidades Positivas

EN= Externalidades Negativas

CO= Costos de Oportunidad

n= año

A continuación, se plantea los pasos necesarios que permitirán realizar el análisis económico para la planta de tratamiento de aguas residuales y su posterior reutilización.

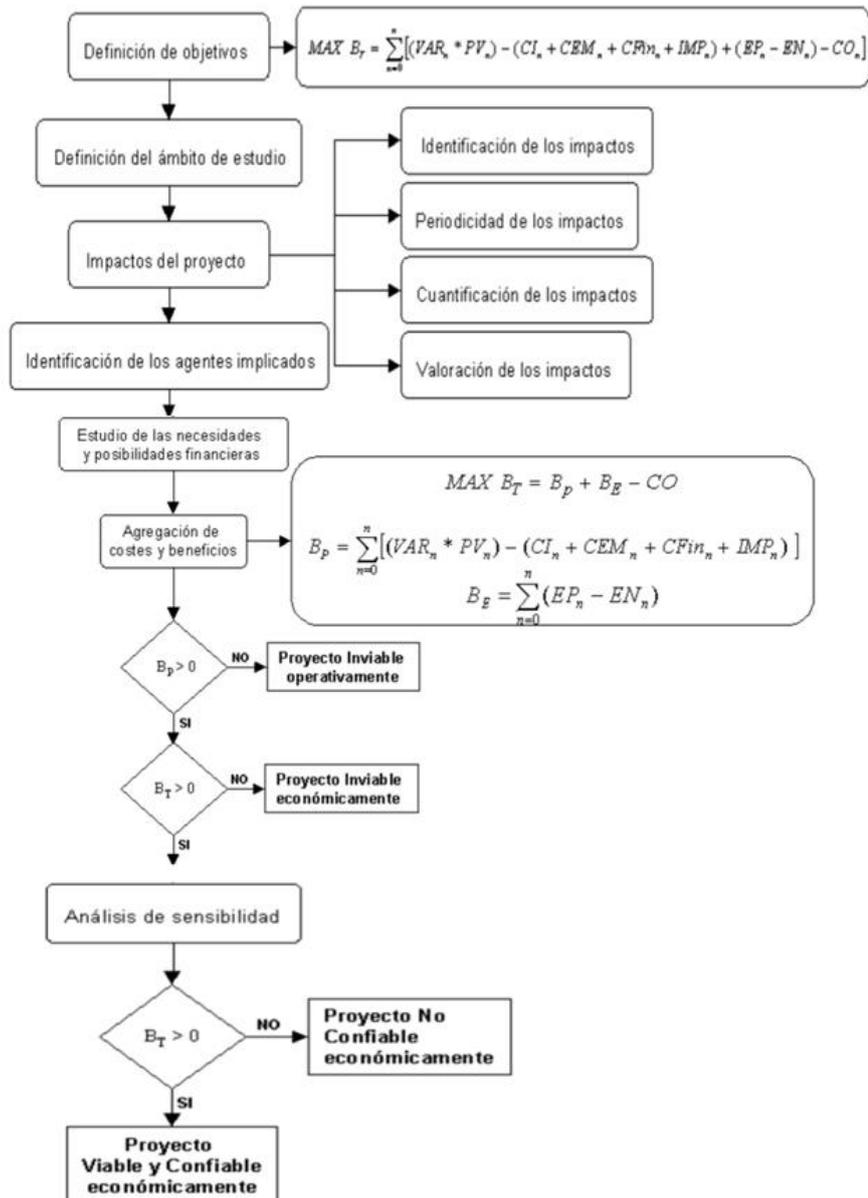


Figura 7.11 Etapas para el análisis económico de los diferentes tipos de trenes seleccionados para la regeneración y reutilización de aguas residuales. Seguí (2015).

#### 7.4 Análisis y valoración de externalidades

Para el proceso de tratamiento de aguas residuales se hace necesario identificar aquellas externalidades que se producen por consecuencia de la implementación o del funcionamiento ya existente por la planta de tratamiento de aguas residuales. Estas externalidades no siempre son planeadas por lo cual es necesario tratar de cuantificarlas. El análisis de las externalidades se enfoca en el agua ya regenerada y en el subproducto generado que son los lodos. Las externalidades se clasifican en dos tipos:

**Externalidades positivas:** se pueden definir como aquellas externalidades que generan un ingreso o un beneficio social que afectan directamente a los implicados y a terceras personas, en este caso la externalidad positiva principal es incrementar la disponibilidad del recurso hídrico la cual logra ser integrada de nuevo al ciclo de reutilización evitando la contaminación de cuerpos de agua, por otra parte, ayuda a garantizar el suministro de agua en épocas de escasez e incentiva en el caso de los agricultores ahorrar en la compra de nutrientes ya que al hacer uso de esta tienen aportación de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo.

**Externalidades negativas:** se definen como aquellas externalidades que generan un gasto o un rechazo social que afectan desfavorablemente a los demás, este va directamente relacionado con la construcción de infraestructura e instalaciones para la regeneración y reutilización, así como las emisiones de CO<sub>2</sub>, la posible agregación de metales pesados por el riego de cultivos con agua regenerada y por el uso de lodos previamente tratados, o simplemente por el rechazo que pueden tener algunos sectores por el hecho de que se reutilicen aguas residuales.

Ahora, se procede a detallar los principales aspectos de cada uno de los grupos de impacto planteados:

**Infraestructura hidráulica:** se refiere a todos los efectos relacionados ya bien sea con la implementación o explotación de la infraestructura relacionada con la producción y distribución del agua regenerada y de los subproductos generados (Sergui,2015). Se parte de considerar todos los costos de inversión que agrupa las obras civiles y equipos, y, por otra parte, los costos de operación y mantenimiento para desarrollar el fin de tratar las aguas residuales con el fin de que puedan ser reutilizadas. Dentro de este impacto se desglosan otros impactos:

- Tratamiento de aguas residuales:
- Regeneración y reutilización de agua residual:
- Adaptación de las redes para el transporte del agua regenerada

**Acondicionamiento y reutilización de subproductos:** en este impacto se presentan los subproductos que se generan por el proceso de tratamiento de aguas residuales por lo cual se considera la reutilización y comercialización para diferentes actividades económicas. A continuación, se describe los siguientes subproductos:

- Lodos (biosólidos)
- Energía y biogás

**Uso de recurso:** este grupo de impacto es de suma importancia ya que está relacionado con los efectos que genera el hecho de aumentar la disponibilidad del recurso hídrico, el cual gira entorno a unas condiciones estrictas de calidad y a un compromiso de garantía. Este se basa en las empresas ya seleccionadas a las cuales les interesaría hacer uso para sus actividades productivas.

**Medio ambiente:** el aspecto principal que aborda este grupo de impacto gira entorno a determinar aquellas fuentes puntuales y difusas de contaminación. Para iniciar, se parte de las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> debido al consumo energético para el funcionamiento diario de la planta, esto desata que se contribuya a concentrar más gases de efecto invernadero provocando un alza en la temperatura global. La existencia de un mercado de emisiones que se valoran económicamente mediante de bonos de carbono determinando el precio por tonelada emitida a la atmosfera. Con respecto a la contaminación de los cuerpos de agua, se logra disminuir un impacto que afecta el verter agua residual que solo ha logrado obtener un tratamiento secundario y aquellas aguas que son subterráneas que son captadas para ser utilizadas para el consumo humano. Por otra parte, se logra mejorar en un 90 % el efluente de salida de la planta de tratamiento ya que con el proceso que actualmente se cuenta no alcanza a una calidad de 40 % y esto genera eutrofización por el alto contenido de nitrógeno y fosforo.

**Habitantes cercanos a la planta de tratamiento "El salitre":** este impacto aborda principalmente a los habitantes aledaños a la planta de tratamiento y al rio de Bogotá ya que al tener tratamiento de las aguas residuales pueden disfrutar de zonas libres de agua contaminada y genera una valorización positiva para los bienes inmuebles.

**Salud pública:** este grupo describe aquellos riesgos químicos y bilógicos que podría afectar ya bien sea la salud de los trabajadores de la planta o a los habitantes que se encuentran ubicados en zonas aledañas. Los efectos sobre la salud publica abarca el contacto que puedan tener con el agua antes de que entre a tratamiento ya que una vez han sido tratadas se parte de un efluente de alta calidad, aunque el riesgo es minimizado.

**Beneficiarios que utilizan el agua regeneradas y los lodos:** el proceso de culturización que se comienza a implementar a no solo a los habitantes que hacen uso del agua potable si no a las empresas que requieren mayor cantidad de suministro para procesos que perfectamente pueden hacer uso de aguas regeneradas o de lodos de alta calidad que reducen los costos de producción de un producto, generando un posicionamiento de empresas amigables con el medio ambiente.

**Aplicación de la legislación en materia de aguas residuales:** el impacto del marco normativo permite establecer de forma inmediata las características y destinos finales que se le puede dar a las aguas regeneradas y a los subproductos (lodos – biosólidos), por otra, parte se hace seguimiento a la empresa acueducto Bogotá para que regresen el agua en la misma calidad o parecida y de no ser así, serán sancionados económicamente por verter agua al río Bogotá y generar impactos ambientales como la eutrofización o la contaminación de fuentes subterráneas.

**Educación:** el análisis de este impacto partido del hecho de la poca cultura y conocimiento que actualmente se evidencia en Colombia en las nuevas formas y procesos en los que se puede regenerar el agua, siendo así, que los habitantes y las empresas son escépticas y rechazan la reutilización. Al generar conciencia motiva a la gente aceptar nuevas fuentes o alternativas de suministro de agua y darle los máximos usos posibles, generando conciencia en la población de que se trata de un recurso escaso y que se puede ahorrar y optimizar su consumo, especialmente en períodos de sequía.

A continuación, se describen la clasificación de los impactos y su respectiva identificación, periodicidad y cuantificación:

Análisis de externalidades considerados en el desarrollo de la propuesta							
Grupo de impacto	Impactos implicados	Identificación		Periodicidad		Cuantificación	
		Positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos	Negativos
Infraestructura hidráulica	Tratamiento del agua residual		Construcción de nuevas instalaciones y adquisición de equipos				118 890 720 m <sup>3</sup> /año (3,77 m <sup>3</sup> /s)
	Regeneración y reutilización de agua residual		Producción y distribución de agua previamente tratada		Inversión inicial que dura toda la vida útil del proyecto		
	Adaptación de las redes para el transporte del agua regenerada		Reconstrucción de redes existentes, Suspensión provisional del servicio de agua potable.				
Acondicionamiento y reutilización de subproductos	Lodos (Biosólidos)	Aporta nutrientes para el selector agrícola		Inversión inicial que dura toda la vida útil del proyecto		150 (gr /m <sup>3</sup> )	
	Energía y Biogás	Generador de energía		Durante toda la vida útil de la planta		Sin cuantificar	
Uso de recurso	Calidad del agua y lodos	Se genera mayor disponibilidad de recurso hídrico y de un subproducto que se puede utilizar para muchas actividades	1.Oportunidad de utilizar el agua regenerada para la recuperación del río Bogotá y de los lodos para tratamiento de zonas altamente afectadas por la minería 2. Se puede destinar para otra actividad que genere más ganancias económicamente.	Durante la existencia de la planta de tratamiento		Cumple con un 90 % de la calidad estipulada por la ley colombiana	Sin cuantificar
	Cantidades para suministrar	Disponibilidad de suministro en cualquier momento				Agua tratada (118 890 720 m <sup>3</sup> /año) y lodos (20 160 toneladas/año)	
	Garantías de suministro	Aumenta la disponibilidad del recurso sobre todo en épocas de sequía.				100% asegurada	

**Tabla 7.4** Análisis de las externalidades consideradas en la propuesta. Elaboración propia. Referencia: Seguí 2015.

Análisis de externalidades considerados en el desarrollo de la propuesta							
Grupo de impacto	Impactos implicados	Identificación		Periodicidad		Cuantificación	
		Positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos	Negativos
<b>Medio ambiente</b>	Contaminación atmosfera emisiones de CO2		1. Emisiones de co2 por el consumo energético 2. Aumenta la concentración de gases de efecto invernadero		Durante toda la vida útil de la planta		0,5 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
	Contaminación cuerpo de agua	Evitar la contaminación que pudiera presentarse al descargar el agua sin tratamiento a vertientes hídricas		Durante toda la vida útil de la planta		Sin cuantificar	
	Contaminación de suelos		Contaminación del suelo por escurrimiento		Durante toda la vida útil de la planta		Sin cuantificar
	Emisión de olores		Emisión de olores que afectarían a los habitantes aledaños		Durante toda la vida útil de la planta		Sin cuantificar
<b>Habitantes cercanos a la planta de tratamiento "El salitre"</b>	Beneficio del tratamiento de aguas residuales	No se contamina el río Bogotá, el cual pasa por zonas y parques que son de uso recreativo.		Durante toda la vida útil de la planta		315 509 personas beneficiadas y 11 especies protegidas	
	Instalación de nuevas construcciones	Los habitantes están de acuerdo con la construcción de nuevas instalaciones, siempre y cuando se les informe de su funcionamiento y riesgos		Durante la etapa de planeación y construcción de la planta		8 000 habitantes aledaños a la planta de tratamiento "El Salitre"	
<b>Salud publica</b>	Riesgos biológicos		Reducción de las enfermedades de origen hídrico				Sin cuantificar
	Riesgo químico		Contacto directo con químicos necesario para el tratamiento de aguas o de los lodos ya bien sea por inhalación, ingesta o contacto directo.		Durante toda la vida útil de la planta		Sin cuantificar

**Tabla 7.4** Análisis de las externalidades consideradas en la propuesta. Elaboración propia.

Referencia: Seguí 2015.

Análisis de externalidades considerados en el desarrollo de la propuesta							
Grupo de impacto	Impactos implicados	Identificación		Periodicidad		Cuantificación	
		Positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos	Negativos
Beneficiarios que utilizan el agua regeneradas y los lodos	Cultura de reutilización	Aprovechamiento de aguas regeneradas para procesos que no requieren el uso de agua potable.		Durante toda la vida útil de la planta		12 empresas analizadas. Seleccionadas para el estudio 4	
Ampliación de la legislación en materia de aguas residuales	Sanciones e incentivos	Control y seguimiento al momento de verter las aguas residuales		Durante la aplicación ley (con carácter retroactivo)		Industrial (2,2 €/m <sup>3</sup> )	
Educación	Rechazo social		Oposición a la reutilización del agua regenerada y lodos		Durante el inicio de proyecto		Sin cuantificar
	Cultura de reutilización del agua y lodos	Inducción y proceso de educación de economía circular y la cultura de reutilización		Durante toda la vida útil de la planta			Depende de las empresas interesadas en hacer uso de estos

**Tabla 7.4** Análisis de las externalidades consideradas en la propuesta. Elaboración propia.

Referencia: Seguí 2015.

## 7.5 Costos de la planta de tratamiento “El Salitre” ya existentes.

En primer lugar, se van a desglosar los costos en los que se incurrieron para la construcción del tratamiento preliminar y primario de aguas residuales, así como la línea de tratamiento de lodos. Los costos reflejados también hacen referencia al mantenimiento y operación mensual tanto en pesos como en euros.

Para iniciar, se tiene los costos en los que se incurrió en el año 1989 los cuales fueron amortizados a 20 años por préstamo que realizó el Banco de la República Colombiana y en colaboración con préstamos hechos por Estados Unidos. Por otra parte, la construcción solo fue hecha a miras de corto plazo y se evidencia que los costos son bastante altos para solo prestar un tratamiento primario.

Los costos de operación y mantenimiento son bastante altos ya que se parte del hecho del uso de la totalidad de las unidades, ya que muchas veces no alcanza a tratar los 4,03 m<sup>3</sup> /s y aun así se pone en funcionamiento todas las unidades.

<b>Costos de construcción, operación y mantenimiento de fase ya existente "El salitre"</b>				
<b>Diseño para caudal medio (4 m<sup>3</sup>/s) y caudal pico (9,9 m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>Costo Inversión</b>	<b>Costos de operación y mantenimiento</b>	
		<b>Obra civil y equipos</b>		
		<b>Costo (€)</b>	<b>Costo (€/mes)</b>	
<b>Preliminar</b>	Desbaste grueso y fino	69 019 243	311 685	
	Desarenado y desengrase			
<b>Primario</b>	Sedimentador o Decantador primario			
<b>Espesamiento inicial</b>				511 222
<b>Digestor anaerobio (lodos primarios)</b>				4 451 777
<b>Tratamiento por bandas de deshidratación</b>		264 055		

\*Tasa de cambio \$3645 pesos colombianos a euros (14 de octubre 2018).

**Tabla 7.5** Costo de la fase existente "El salitre"

En la tabla 7.6 se describe específicamente los costos de ejecución que comprende la operación y mantenimiento de cada una de las líneas tanto del agua como de lodos.

<b>Costos de ejecución presupuestal línea de agua y lodos (2018)</b>	
	<b>Costo (€/mes)</b>
Energía	71 550
Insumos químicos	89 862
Servicios de personal	77 713
Transporte y manejo de biosólidos	32 175
Mantenimiento y reparaciones	932
Suministros	12 602
Otros costos directos	12 602
Otros costos indirectos	748
<b>TOTAL</b>	<b>311 685</b>

\*Tasa de cambio \$3645 pesos colombianos a euros (14 de octubre 2018).

**Tabla 7.6** Costos de ejecución, operación y mantenimiento tanto del agua como de lodos.

#### 7.5.1 Costos de trenes para línea de agua y lodos

El análisis de costo que se desarrolló en los diferentes trenes de tratamiento tanto para agua como para lodos se basó en las opciones que mejor rendimiento y eficacia tiene respecto a la calidad del efluente final. Al hacer la evaluación de costos se determinó que la mejor opción es aquella en la que se incurre en menos costos pero que a su vez cumple con los estándares de calidad exigidos por el gobierno colombiano, en la tabla 7.7 se consolidada los costos actuales

de la construcción referida como obras civiles, estos precios son unitarios y se discriminan los costos de operación y mantenimiento de carácter mensual y anual. Estos costos se basaron en precios de cotizaciones de empresas y universidades de Colombia, Estados Unidos y de Europa (en cuanto tecnologías y equipos necesarios), en cambio, que para la mano de obra se utilizaron las bases de datos de “CONSTRUDATA” de la ciudad de Bogotá y la base de las tarifas actualizadas por la empresa acueducto de Bogotá.

1. Se descarta la posibilidad de tratamiento secundario con uso de biorreactor de membranas por sus altos costos de adquisición, operación y mantenimiento.
2. Los costos públicos- privados en los que se incurrieron para la planta de tratamiento “El Salitre” corresponden a todo lo que se requería para dar inicio a estas obras, hasta su desempeño posterior para el tratamiento primario de aguas residuales. En la tabla que se ilustra a continuación, se establece como costos de inversión las obras civiles y equipos sin tener en cuenta el terreno ya que este estaba destinado al uso público. Gran parte del pago se amortizo por el cobro directo en la facturación del suministro de agua a los habitantes de Bogotá, los cuales dependiendo de la clasificación de inmueble y de su actividad económica. Como nuevo plan estratégico se recurrió hacerlos responsables económicamente por su generación de agua residual y por tal, la ley implanto un decreto donde estipula que se deben responsabilizarse de su carga contaminante o pagar a entidades externas para que se encargaran de ello. Si se realiza un análisis exhaustivo se determina que los costos en los que se incurren mensualmente no representan un cambio sustancial de la calidad del agua que se está tratando, por lo cual se realiza un empalme con la infraestructura existente y cuya viabilidad económica se sostenga en relación de costo- beneficio. La viabilidad no solo se sostiene en el menor costo de inversión inicial, operación y mantenimiento, si no en incentivar aquellas empresas que hacen uso de agua dulce de primera calidad para procesos que no la requieren pasen hacer uso de esta, otorgando incentivos de reducción de precios por aguas tratadas que tienen las mismas calidades y que la pueden adquirir a un costo más bajo.

Ahora bien, según los costos estimados se determina que la mejor opción para el tratamiento secundario es el tanque de lodos activados seguidos de sedimentadores secundarios donde los costos de inversión son de € 4 134 972 debido al caudal que debe tratar, también se destaca que a pesar de que los costos de inversión, operación y mantenimiento son más elevados en el tratamiento de tanques de aireación y filtros percoladores; una de las consecuencias se debe al consumo energético por las bombas

que suministran aire y el cambio de filtros. Por otra parte, se obtiene un costo de regeneración por 0,0044 (€/m<sup>3</sup>), aunque el costo de agua regenerada es económico podrán compensar los costos de inversión, operación y mantenimiento.

En cuanto el tratamiento terciario la opción que resalta a simple vista es la desinfección con cloro ya que es un insumo poco costoso y cuenta con alta eficacia, permitiendo dar cumplimiento a lo estipulado por la ley. Mas, sin embargo, se puede afirmar que como tratamiento terciario también es viable económicamente la desinfección acompañada con luz ultravioleta cuyo costo es de 0,0046 (€/m<sup>3</sup>).

El costo de regeneración de cada una de las opciones fue calculado con un caudal de 4,03 m<sup>3</sup>/s con los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento anuales, una vida útil de 20 años e impuesto de un 19 %.

Costos de inversión, operación, mantenimiento y regeneración de opciones seleccionadas para línea agua.						
<i>Diseño para caudal medio (4 m<sup>3</sup>/s) y caudal pico (9,9 m<sup>3</sup>/s)</i>		Costo Inversión	Costos de operación y mantenimiento	Costo (€/año)	Referencia de obtención de costos	Costo de regeneración (€/m <sup>3</sup> )
		Obra civil y equipos				
		Costo (€)	Costo (€/mes)			
<b>Preliminar</b>	Desbaste grueso y fino	69 019 243	147 108	1 765 296	Agua, alcantarillado y aseo de Bogotá (2018). Informe mensual de funcionamiento	0,0912
	Desarenado y desengrase					
<b>Primario</b>	Sedimentador o Decantador primario					
<b>Secundario</b>	1.Lodos activados -aerobio + Sedimentadores secundarios.	4 134 972	7 251	87 012	Base de datos "CONSTRUDATA" ciudad de Bogotá, Escuela Colombiana de ingenieros Julio Garavito	0,0044
	1)Tanque de aireación + Sedimentadores secundarios.	4 234 684	7 632	91 584	ECOPLANET. (2018) cotización Ptar Medellín, Endress+Hauser Management (2018)	0,0052
	Filtros percoladores (con recirculación) + sedimentadores secundarios	4 659 320	7 986	95 832	EDOSPINA (2018), cotización. Base de datos "CONSTRUDATA" ciudad de Bogotá	0,0054
<b>Terciario</b>	Cloración (Desinfección con cloro)	121 796	5 021	60 252	Lexington, Massachusetts (2018), Wastewater treatment performance and cost data.	0,0006
	1.Filtración 2. Desinfección	4 119 311	6 251	75 012		0,0052
	1.Desinfección y luz ultravioleta	1 664 840	29 261	351 132		0,0046

\*Los costos descritos en esta tabla son resultado de un proceso de investigación y de cotizaciones realizadas para el 2018.

**Tabla 7.7** Costos de inversión, operación, mantenimiento y de regeneración de agua por m<sup>3</sup>, opciones seleccionadas línea agua.

La evaluación de los costos de la línea de trenes de los lodos parte de una opción que complementaria el tratamiento ya existente, realmente el lodo resultante (Biosólido) es de muy buena calidad, por lo cual, el secado térmico aumentara la calidad y ampliaría la visión de uso, El tratamiento por secado termino es una tecnología relativamente nueva, llega a eliminar hasta un 95% del agua contenida en los lodos y que a su vez logra eliminar sustancias volátiles, lo cual es positivo si se destina para compostaje, como materia prima sustitutiva para materiales de construcción entre otros usos alternos.

Costo de inversión, mantenimiento, operación y tratamiento final de lodos					
Tratamiento	Costo Inversión	Costos de operación y mantenimiento	Costo (€/año)	Referencia de obtención de costos	Costo de tratamiento (€/m3)
	Obra civil y equipos				
	Costo (€)	Costo (€/mes)			
Espesamiento inicial	26 064 973	6 404	76 848	Agua, alcantarillado y aseo de Bogotá (2018). Informe mensual de funcionamiento	0,0298
Digestor anaerobio (lodos primarios)	4 174 100	9 230	110 760		0,0055
Tratamiento por bandas de deshidratación	23 409 670	13 880	166 560		0,0275
Tratamiento por secado térmico (tambor rotativo)	69 954 000	4 046	48 552		Cotización empresa PESA (2018)
<b>Costo total de tratamiento de lodos</b>					0,1416

**Tabla 7.8** Costo final de tratamiento de lodos.

#### 7.5.2 Oferta y demanda del agua regenerada y lodos

Actualmente, en Colombia se evidencia un cambio de mentalidad en cuanto al tratamiento y uso de aguas regeneradas, como ejemplo se pueden nombrar grandes países como Australia, Estados Unidos, Europa, Singapur entre otros, donde ya no solo se utiliza para uso industrial, recreativo o ambiental, sino que también se consume. Cada vez, es más común la reutilización indirecta de las aguas residuales tratadas, en donde se reintegran a fuentes subterráneas o superficiales como es el caso que apaña este estudio, ya que reintegran las aguas tratadas al río Bogotá.

Colombia, ha estipulado recientemente en el Decreto 1207 /2014 y en la Resolución 1096/2000 las posibles disposiciones finales que pueden tener el agua residual, convirtiéndolo en una estrategia de viabilidad económica. Su sustento parte del hecho de que muchas empresas e

industrial estarían dispuestas a pagar un suministro de agua a menor costo del que actualmente están pagando siempre y cuando esta cumple con los estándares de calidad. Esto indica que la oferta por el recurso hídrico sigue mantenida la relación entre calidad, cantidad y disponibilidad en donde se beneficia aquellos que la quieran adquirir con técnicas de financiamiento, reducción en los precios preestablecidos anualmente o con financiamiento en el momento de pago. Esta oferta y demanda también lleva a generar una perspectiva ambientalista donde se posicionan aquellos que la compran como empresas sostenibles agregando un factor de capacidad competitiva frente a otras del mercado.

Bogotá no cuenta hasta el momento con sistema de reutilización de aguas residuales otorgadas por la planta de tratamiento “El salitre” y se debe a la existencia de gran cantidad de agua que se hacía innecesario tratar las residuales. El ministerio del medio ambiente planteo 3 aspectos que podrían limitar la opción de implementar tratamientos adicionales para regenerar el agua, el primero es la limitación presupuestaria para la recuperación y reusó con los costó asociado con métodos avanzados que implican grandes inversiones en una red alterna de distribución para aquellas empresas identificadas como posibles compradoras. En segundo lugar, la incertidumbre que se genera alrededor de la oferta de agua residual tratada genera inseguridad a los posibles usuarios ya que piensan que son aguas que podrían afectar a sus cultivos, que pueden traer consigo enfermedades al simple contacto o hecho de creer que son aguas contaminadas las que van a recibir debiéndose al poco conocimiento de regeneración de aguas.

Ahora bien, partiendo del estudio que se realizó con posibles empresas que estarían interesadas en la compra de esta agua regenerada afirman que los dos aspectos fundamentales parten de que se tenga disponibilidad a las cantidades necesarias para sus procesos garantizándoles el suministro diario. Por lo tanto, la demanda está definida por los clientes potenciales que necesiten y acepten consumir este tipo de agua.

El incentivo para los potenciales clientes radica en tres aspectos:

- Existencia de las cantidades demandadas
- Certificación de la calidad de las aguas tratadas
- Precio de adquisición por el agua regenerada

Según proyecciones de la demanda total de agua en Colombia se pronostica que para el año 2022 los sectores con mayor uso será el agrícola con 39526 millones de metros cúbicos año representando un 135,8 %, el sector de hidrocarburos que dobla el uso del sector agrícola, el sector piscicultura con 78,9 % , el sector minero con un 48% , el sector de generación energética con 42,7% y los sectores con el consumo más bajo serian la industria y la construcción con 0,7%,

servicios 7,3%, doméstico 11,2% ; estas proyecciones se basan en estudios realizados por el IDEAM (2017). Partiendo de estos datos, se puede entender mejor la dinámica de la estructura del mercado de la interacción entre ofertante y demandante, así como la necesidad de la reutilización del agua residual.

Se han venido presentando tres tipos de situaciones la primera se desarrolla en tiempos de sequía donde la disponibilidad de las cuencas que suministran agua esta escasa y la demanda por el recurso es bastante alta y es donde el mercado entraría a estar insatisfecho ya que no cuentan con el suministro el sector más afectado sería el agrícola por tal, ese sería el principal nicho de mercado para ofrecerles las aguas regeneradas seguido por el sector minero, por tanto se puede prestar se les puede sostener un precio por m<sup>3</sup> de agua regenerada que sea inferior al que pagan actualmente y que el excedente lo asuma el estado (demanda insatisfecha o potencial).

El segundo caso que se presenta es el exceso de recurso hídrico y es acá donde los potenciales compradores se les incentiva con precios inferiores a los que pagan haciéndose cargo del excedente el estado.

Y el tercer caso, es aquel donde debido a la escasez inminente de las fuentes directas de agua se procede a generar un mercado cautivo donde solo pueden acceder al agua regenerada para la realización de cualquier actividad que no incluye el uso para alimentación, procesamiento de alimentos y en hospitales.

### 7.5.3 Precios del agua regenerada y lodos

Para poder establecer los precios de agua que previamente ha sido tratada, es necesario determinar la oferta que va directamente relacionada con la capacidad de producción que tiene la planta de tratamiento “El Salitre”. Siendo así, se parte de un punto clave el cual se supone que la oferta de agua regenera una vez alcanza su capacidad máxima podría considerarse un suministro constante y garantizada, pero esto depende del hecho que la población que se sirve de agua potable y quien genera el agua residual siempre van a tener suministro.

El hecho de establecer un precio al agua que ha sido tratada parte de la inclusión de diferentes aspectos tales como el sistema operativo de la planta y las diferentes estrategias de reutilización de estas. Generalmente, el precio de las aguas regeneradas tiende a ser un poco más costosas que el suministro de agua potable, porque se establece el costo con relación a la inversión y su sistema de explotación y mantenimiento. Esto indica que el agua regenerada que se obtiene de las plantas de tratamiento de agua tiene un costo igual o mayor al de agua potable de

abastecimiento. Debido a esto, se plantean diferentes estrategias que permiten evaluar quien podría hacerse cargo una parte del precio, una puede ser hacer un incremento del precio que pagan los habitantes por agua potable servida para subsidiar parte del precio de agua regenerada o que el estado se haga cargo de ese valor faltante. Es necesario determinar quién se hace cargo de ese parte del precio ya que si la planta de tratamiento hace facturación del precio real del costo los posibles usuarios identificados que podrían hacer uso no tendrían ningún incentivo suficiente para poder utilizarla y por tanto optaran por seguir haciendo uso del suministro de agua potable.

Según análisis realizado a varias empresas sustentan que recuperan un 75% del costo del agua regenerada, recuperando generalmente en todas las plantas de tratamiento los costos de explotación.

El pago del cargo por los costos del agua regenerada es justificado por diferentes aspectos, en si se basa en los beneficios que los clientes tienen por el simple hecho de recibir el agua regenerada, donde también se destacan características de un agua con mejor calidad, reduciendo los vertidos de agua residual y una mayor disponibilidad de abastecimiento con agua potable y menores restricciones de riego durante periodos de sequía (Nuñez,2013). Por tal, se asume que el coste por metro cúbico debe ser igual al precio máximo de venta, garantizando así la cobertura de los costes (Melgarejo, 2009).

Por tal, la fijación del precio debe ir direccionado a establecer reglas tarifarias que se adecuen a una recuperación de costos y que a su vez se puede subsidiar parte de este precio que se le da a los posibles consumidores fomentando comportamientos ambientales, sostenibles y reintegrando de nuevo el agua regenerada como suministro esencial (Del Valle,2013). En conclusión, desde un punto de vista económico es necesario que los costos sean por lo menos la base del agua regenerada, esto indica que debido al cambio climático el bien puede resultar escaso en términos económicos lo que indica que las personas y empresas demandarían más por este bien y que su precio fuese mayor se entraría a valorar más el bien sobre la base de su valor de escasez. Siendo así, el sistema de precios del agua regenerada no debería tener en cuenta solo los costes, sino también el valor intrínseco del recurso agua, sus efectos ambientales y el coste de oportunidad que conlleva su utilización (Melgarejo, 2009).

Ahora bien, Bogotá cuenta con un sistema tarifario por suministro de agua potable bimensual, en el cual se incluye un cargo fijo que hace referencia a la disponibilidad de agua en cualquier momento y un precio que varía de acuerdo con la actividad económica que realice y la los m<sup>3</sup> que van consumiendo diariamente.

Precio por consumo de m <sup>3</sup> (2018)	
	€/m <sup>3</sup>
Comercial	6,45
Industrial	5,64
Especial	4,31

**Tabla 7.9** Precio por consumo de m<sup>3</sup> sectorizado

El mismo escenario se aplica para los lodos tratados, donde el factor primordial para la venta de esta gira entorno a la calidad y al precio que generalmente es inferior a los fertilizantes o materias primas que se utiliza para la construcción.

Precio por lodos tratados (kg)	
	€
50 kg	13,88

**Tabla 7.10** Precio por compra de lodos tratados

#### 7.3.4 Incentivos económicos

Los incentivos económicos que se están desarrollando en Colombia para incentivar y estimular a los ciudadanos a optar por una cultura de reutilización van encaminados a la protección del medio ambiente.

Los beneficios que se otorgan son los siguientes:

- **Descuentos en la base de impuesto a la renta:** aquellas empresas que se acojan a la reutilización de agua regenerada, se les realizara un descuento del 2,5% sobre los impuestos que se realiza a las utilidades que generaron durante el periodo de tiempo del 1 de enero hasta el 31 de diciembre (Estatuto Tributario Artículo 158-2).
- **Equipos y elementos sin IVA:** está en su etapa inicial donde se pretende fomentar que la adquisición de equipos y elementos necesarios para el desarrollo de su actividad económica este exenta del gravamen del IVA. El IVA es del 19 % (Estatuto Tributario Artículo 428).

Hasta el momento se encuentran estos dos tipos de beneficios ya que la implementación de reutilización de agua regenerada está iniciando hasta el momento.

## 7.6 Proyección de posibles áreas para la reutilización del agua y lodos

Una vez se desarrollado la contextualización legal y los requisitos de calidad del agua regenerada para ser reutilizada, ya bien sea, para la agricultura, industria o especial, se hizo selección de alternativas que cumplan con una regeneración y una evaluación económica que permitió determinar cuál era la alternativa más factible. Siendo así, se parte de la ubicación de aquellas industrias, campos agrícolas, estaciones de bomberos o sitios de recreación que puedan hacer uso de este efluente. Cabe anotar que por la implementación de cada proceso, secundario y terciario se va perdiendo aproximadamente  $0,13 \text{ m}^3/\text{s}$  por lo cual, como efluente final se obtiene  $118\ 890\ 720 \text{ m}^3/\text{año} - (3,77 \text{ m}^3/\text{s})$ . En la tabla 7.11 se describen los caudales demandados por las empresas.

Alternativas para reutilización de aguas tratadas						
Planta de tratamiento de agua residual	Caudal de salida	Alternativas	Reutilización	Usuario final	Consumo estimado	Datos complementarios
Planta de tratamiento de agua residual "El Salitre"	118 890 720 m <sup>3</sup> /año (3,77 m <sup>3</sup> /s)	1	Agricultura	Vivero la florida	5 110 (m <sup>3</sup> /año) - (14 m <sup>3</sup> /día)	Consumo por hectárea de plantación de flores
		2	Ganadería	Granjas agrícolas	2 190 (m <sup>3</sup> /año)- (6 m <sup>3</sup> /día)	No se tiene información
		3	Ganadería	Granja agrícola la esperanza	21 900 (m <sup>3</sup> /año)- (60 m <sup>3</sup> /día)	No se tiene información
		4	Industrial	Centro empresarial Bavaria	4 209 929 (m <sup>3</sup> /año)- (11 534 m <sup>3</sup> /día)	Por desarrollo diario de actividad productiva
		5	Agricultura	Floricultivo de Villamery	2 300(m <sup>3</sup> /año) -(7m <sup>3</sup> /día)	Consumo por hectárea de plantación de flores
		6	Recreativo	Club de golf y parque La florida	18 023 (m <sup>3</sup> /año)- (43 m <sup>3</sup> /día)	Dimensiones aproximadas (4 500 m - 0,45 hectáreas)
		7	Industrial	Estación de bomberos Bicentenario	Requieren de suministro continuo	Los bomberos pagan es por tener el suministro de agua
		8	Industrial	Scribe Colombia (Empresa papeleras y de útiles escolares)	8 250 000 (m <sup>3</sup> /año) - (22 603 m <sup>3</sup> /día)	15 m <sup>3</sup> por tonelada producida (producción de 550 000 toneladas de papel al año)
		9	Industrial	Papeles primavera (Empresa papeleras y de útiles escolares)	21 250 000(m <sup>3</sup> /año) - (58 219 m <sup>3</sup> /día)	17 m <sup>3</sup> por tonelada producida (produce 1 250 000 toneladas de papel al año)
		10	Industrial	Sellopack (empresa de producción de plásticos)	10 489 600 (m <sup>3</sup> /año) - (28 740 m <sup>3</sup> /día)	Se requiere de 22 m <sup>3</sup> por tonelada de plástico producido, Sellopack produce 476 800 toneladas anuales
		11	Comercial	Lavafante (lavadero de carros)	1 440 (m <sup>3</sup> /año)- (4 m <sup>3</sup> /día)	Aproximado de carros lavados (20)
		12	Industrial	Licorera Cundinamarca	3 488 040 (m <sup>3</sup> /año) - (9 689 m <sup>3</sup> /día)	Por desarrollo diario de actividad productiva

**Tabla 7.11** Alternativas de empresas para reutilización de aguas tratadas. Fuente elaboración propia. Datos obtenidos por empresas seleccionadas y de la dirección de Gestión Integral de Recursos Hídricos.

Se puede observar que la selección de las 12 empresas alcanza a cubrir un total de uso de agua regenerada de 47 738 532 m<sup>3</sup>/año esto indica que quedan disponibles aproximadamente 71 152 188 m<sup>3</sup>/año por tal, sería necesario evaluar en futuros análisis el impacto en costos de suministrar agua regenerada a zonas distantes de Bogotá. Así mismo, se aclara que en el caso de los bomberos solo se les asegura la disponibilidad del recurso en cualquier momento que lo llegasen a utilizar. Para analizar, más a fondo se eligen 4 empresas.

Ahora, en el caso de los lodos tratados se obtiene un total de 4 200 toneladas mes después de un proceso de deshidratación el cual tiene un porcentaje de materia seca aproximado al 35 % y al someterlo a un secado térmico aumenta un 60 % de lodo seco, lo cual indica que el subproducto final de lodos es alrededor de 20 160 toneladas/año y 1 680 toneladas/mes. Siendo así, se tienen 6 posibles compradores, en primer lugar, se encuentra la alcaldía de Bogotá con el programa de recuperación de suelos impactados por la actividad minera, estas zonas se encuentran delimitadas en los cerros orientales tanto de la parte norte como sur. Tal como se muestra en la tabla 7.12 la demanda por este subproducto es bastante alta ya que tiene una alta efectividad para la remediación de suelos y debido a sus nutrientes se hace mucho más atractivo para el campo de la agricultura.

Alternativas para reutilización de lodos tratados					
Planta de tratamiento de agua residual	Lodos obtenidos	Alternativas	Reutilización	Usuario final	Consumo estimado
Planta de tratamiento de agua residual "El Salitre"	20 160 toneladas/año - (1 680 Toneladas/mes)	1	Restauración de suelos impactados con la minería (cerros orientales)	Alcandía de Bogotá	18 000 toneladas/año
		2	Restauración de suelos impactados con la minería (cerros orientales)	Minería puerto Texas (extracción de esmeraldas)	1 760 toneladas/año
		3	Abono fertilizante	Vivero la florida	110 toneladas/año
		4	Abono fertilizante	Floricultivo de Villamery	60 toneladas/año
		5	Mezcla para fertilizantes	Agrocampo	230 toneladas/año

**Tabla 7.12** Alternativas de empresas para reutilización de lodos. Fuente: elaboración propia. Datos obtenidos por empresas seleccionadas y ministerio de minas de Colombia.

## 7.7 Cálculos del precio mínimo de venta de la propuesta seleccionada

Con la información previamente expuesta se procede a determinar el costo por metro cubico que viene a ser igual al precio mínimo de venta (PMV) de agua regenerada, con este se puede determinar si se alcanza a recuperar los costos totales de inversión, operación y mantenimiento durante toda su vida útil.

<b>Datos necesarios para cálculo de Precio Mínimo de Venta (PMV)</b>		
Características propias del proyecto	unidad	cantidad
Capacidad media	m3/s	4,03
Costo de inversión	€	74 210 768
Costo de explotación y mantenimiento	€/año	2 315 280
Vida útil del proyecto	año	20
<b>Impuestos</b>		
Impuesto (*)	%	19
Depreciación fiscal (**)	%	5,5
<b>Financiera</b>		
Deuda	%	0
Capital	%	100
Total	%	100
*Estatuto Tributario articulo 428		
** Ley 1819 /2016 depreciación contable y fiscal		

**Tabla 7.13** Datos para cálculo de precio mínimo de venta

El PMV es el precio mínimo de venta de agua regenerada al cual se le puede vender al usuario final, esto garantiza una recuperación de costos y de beneficio esperados de tal forma que la inversión realizada sea rentable bajo el criterio del Valor Actual Neto (VAN). En un proceso de optimización y cuando el mercado presenta condiciones de competencia perfecta, se puede considerar a este coste por metro cúbico como una aproximación del Coste Marginal (CMg). (Seguí, 2015).

Con este concepto claro, se determinó de acuerdo con la tabla 7.7 y 7.8 que la mejor opción que se adecua a la factibilidad de aplicación y de costos, siendo los lodos activados seguido de sedimentadores el tratamiento secundario y desinfección con cloro el tratamiento terciario.

Ahora bien, el valor arrojado por el algoritmo figura 7.11 determino que el precio es de 0,2378 €/m<sup>3</sup>. Por lo cual, nos permite afirmar que este valor retribuye a la inversión que se realizó y permite que el comportamiento sea rentable según el criterio del valor actual neto, esto genera a los posibles usuarios del agua regenerada tener un mercado donde la oferta parte de características de buena calidad y a menor precio.

### 7.7.1 Infraestructura hidráulica para suministro de agua regenerada

Actualmente no se cuenta con la infraestructura necesaria para poder conducir el agua regenerada a los posibles usuarios, siendo así, en el apartado 7.6 se propusieron diferentes potenciales clientes para la compra de agua regenerada y de lodos ya tratados. Esto indica que es necesario realizar una aproximación de los costos de construcciones de redes locales que permita la conducción del agua desde la planta de tratamiento el salitre hasta su destino final que es el usuario.

Se realizó la selección de 4 usuarios finales, cuyo criterio de selección fue su alto consumo.

Las seleccionadas fueron:

- Sellopack 10 489 600 (m<sup>3</sup>/año) - (28 740 m<sup>3</sup>/día).
- Papeles primavera - empresa papelera y de útiles escolares 21 250 000(m<sup>3</sup>/año) - (58219 m<sup>3</sup>/día).
- Licorera Cundinamarca 3 488 040 (m<sup>3</sup>/año) - (9 689 m<sup>3</sup>/día)
- Club de golf y parque La florida 18 023 (m<sup>3</sup>/año)- (43 m<sup>3</sup>/día)

Ahora bien, en la tabla 7.14 se estipula los costos presupuestados para el 2018 por construcción e instalación de redes de suministro de agua.

Costos de construcción de redes locales para el servicio de suministro de agua regenerada en la planta de tratamiento "El Salitre".		
		€
Excavación	Fases de 4 km	136 992
Acometida en cemento		
Instalación de canales de conducción		
Instalación de tubería		
Pavimentación		
Caja de medidor		

\*Costos asignados por para la construcción de redes de suministro de agua potable para el 2018, licitaciones realizadas por el acueducto de Bogotá.

**Tabla 7.14** Costos para la construcción de redes de suministro de agua por fase de 4 km

A continuación, en las tablas 7.15 a la 7.18 se desglosan las características independientes de cada empresa, que permiten obtener los costos por distribución, regeneración, su precio final de venta y los beneficios económicos que representa la compra de agua regenerada.

Empresa	Suministro (m <sup>3</sup> /año)	Distancia de conducción (km)	Inversión Total en distribución (€)	Distribución (€/m <sup>3</sup> )
Sellopack	10 490 100	7,78	€ 266.449	0,0036
Papeles primavera	21 249 935	9,68	€ 331.521	0,0022
Licorera Cundinamarca	3 536 485	3,06	€ 104.799	0,0042
Campo de Golf La Florida	15 695	3,42	€ 117.128	1,0577
<b>Total</b>			€ 819.897	1,0677

**Tabla 7.15** Costo de inversión total en redes de distribución y costo de distribución.

Empresa	Distribución (€/m <sup>3</sup> )	Producción (€/m <sup>3</sup> )	Costo total de Agua (€/m <sup>3</sup> )
Sellopack	0,0036	0,2378	0,2414
Papeles primavera	0,0022	0,2378	0,2400
Licorera Cundinamarca	0,0042	0,2378	0,2420
Campo de Golf La Florida	1,0577	0,2378	1,2955

**Tabla 7.16** Costo total de producir y distribuir agua regenerada.

Empresa	Precio del agua Fuente Convencional (€/m <sup>3</sup> )	Precio de Venta de Agua Regenerada (€/m <sup>3</sup> )
Sellopack	€ 5,64	4,79
Papeles primavera	€ 5,64	4,79
Licorera Cundinamarca	€ 5,64	4,79
Campo de Golf La Florida	€ 4,31	3,66

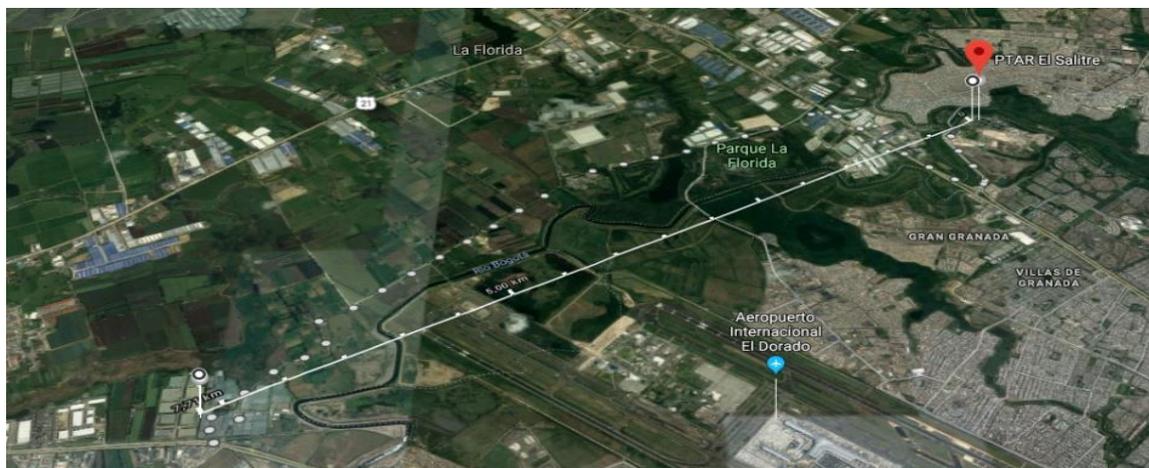
**Tabla 7.17** Precio de venta de agua regenerada con descuento del 15 %.

Empresas que compran agua regenerada				Acueducto de Bogotá	
Empresa	Suministro (m <sup>3</sup> /año)	Beneficio (€/m <sup>3</sup> )	Beneficio (€/Año)	Beneficio (€/m <sup>3</sup> )	Beneficio (€/Año)
Sellopack	10490100	€ 0,85	€ 8.874.625	€ 4,55	€ 47.757.229
Papeles primavera	21249935	€ 0,85	€ 17.977.445	€ 4,55	€ 96.772.204
Licorera Cundinamarca	3536485	€ 0,85	€ 2.991.866	€ 4,55	€ 16.098.080
Campo de Golf La Florida	15695	€ 1,98	€ 31.021	€ 2,37	€ 37.166

**Tabla 7.18** Beneficios privados.

Sellopack, es una empresa que cuyo fin económico es la producción de todo tipo de empaques de plástico. Se encuentra ubicada a 7,78 km de la planta de tratamiento y actualmente tiene un consumo anual de 10 490 100 m<sup>3</sup>/año. La cotización que presenta al día de hoy, por construcción de red de suministro de agua por kilómetro es de 34 248 €, por lo cual la inversión total para generar la distribución del agua regenerada a esta empresa es de 266 449 €. De tal manera, que para esta empresa el costo de distribución es de 0,0036 €/m<sup>3</sup> sumando a su vez el precio mínimo de venta de 0,2378 €/m<sup>3</sup>, esto quiere decir que el tratamiento y la distribución de agua regenerada para esta empresa está en 0,2414 €/m<sup>3</sup>, actualmente pagan 5,64 €/m<sup>3</sup>. Con acuerdos bilaterales se logra establecer un descuento equivalente al 15 % sobre el precio que actualmente pagan, esto indican que tiene que pagar 4,79€/m<sup>3</sup> generando un ahorro anualmente para la empresa de 8 874 625 € y la empresa acueducto de Bogotá que es la que

administra la planta de tratamiento estaría generando un beneficio de  $4,55\text{€}/\text{m}^3$ . El compromiso que se plantea a las empresas, parte del hecho de un porcentaje de descuento sobre lo que actualmente pagan y se les asegura la garantía de suministro en las épocas de sequía y de recortes de agua.



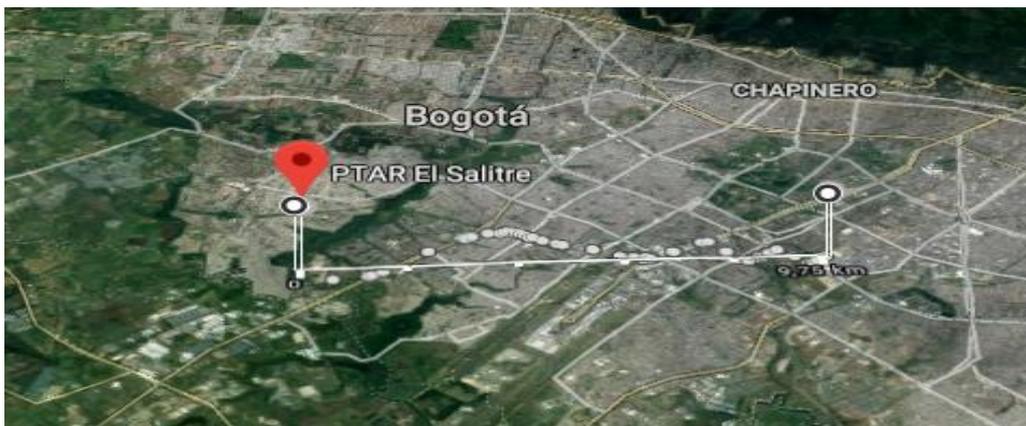
**Figura 7.12** Distancia y ubicación geográfica de la empresa Sellopack a la planta de tratamiento “El Salitre”.

La industria de licores de Cundinamarca (observar figura 7.13) es una de las empresas más grandes que tiene Bogotá, se encuentra ubicada en el occidente de Bogotá, a una distancia 3,06 km de la planta de tratamiento. Tiene un consumo aproximado de  $3\,536\,485\text{ m}^3/\text{año}$  y debido a su cercanía se calculó un costo de inversión de las redes de distribución de  $104\,799\text{ €}$ . Esta empresa al ser catalogada como industrial, al igual que Sellopack y Papeles primavera manejarán el mismo precio de venta de  $4,79\text{ €}/\text{m}^3$ . Esta empresa tendría un beneficio privado de un ahorro anual de  $2\,991\,866\text{ €}\cdot\text{año}$  y el beneficio del acueducto sería de  $16\,098\,080\text{ €}\cdot\text{año}$ .



**Figura 7.13** Distancia y ubicación geográfica de la empresa licores de Cundinamarca a la planta de tratamiento “El Salitre”.

Al igual que las empresas anteriores, la empresa papelera primavera catalogada como industrial, se dedica a la producción de papales y de todo tipo de artículos de escritura, cuadernos, fóliders, papel regalo entre otros y el campo de golf la florida (sector especial) es un centro recreativo que cuenta con instalaciones de campo de golf, lagos para practicar canotaje y servicio de hotel. Se encuentran a una distancia de 9,68 km y de 3,42 km respectivamente. La inversión total para la empresa papeles primavera en redes de distribución es de 331 521 € y al tener el mismo precio de venta de 4,79 €/m<sup>3</sup> por ser industrial, obtiene un ahorro de 17 977 445 €·año, consumiendo el mismo caudal, pero ya no de la fuente convencional.



**Figura 7.14** Distancia y ubicación geográfica de la empresa Papeles primavera a la planta de tratamiento “El Salitre”.

Para concluir, el campo de golf tiene un consumo anual de 15 695 m<sup>3</sup>/año, su precio actual de consumo es de 4,31 €/m<sup>3</sup> por ser considerado como sector especial. Siendo así, se debe realizar una inversión total en redes de distribución de 117 128 € y el precio a pagar por agua regenerada es 3,66 €/m<sup>3</sup>. Con este precio se genera un beneficio anual de ahorro cuantificado en 31 021 € y de 37 166 €·año para la empresa acueducto de Bogotá.



**Figura 7.15** Distancia y ubicación geográfica del Campo de Golf La Florida a la planta de tratamiento “El Salitre”.

### 7.7.2 Mayor disponibilidad de recurso y de subproducto

La reutilización de las aguas residuales permite aumentar la existencia de un recurso que durante mucho tiempo se ha visto mal gestionado, esto da paso para que los destinatarios finales puedan acceder a un recurso que siempre tendrá disponibilidad y cuyos costos son menores a los que actualmente pagan, al implementar una gestión adecuada de tratamiento de aguas residuales se contribuye a la aminorar el impacto que se genera sobre los ecosistemas hídricos.

En este caso, la regeneración de aguas residuales permite un aumento de disponibilidad para los sectores industriales, comerciales y de uso especial de  $3,77 \text{ m}^3/\text{s} - 118\,890\,720 \text{ m}^3/\text{año}$ . De este volumen final que se obtendría a la salida de la planta de tratamiento “El Salitre” se destinarían un aproximado de  $35\,292\,215 \text{ m}^3/\text{año}$  para las 4 empresas interesadas y el volumen restante se vertería para la mejora ambiental del río Bogotá generando un impacto en el saneamiento logrando una maximización de los beneficios técnicos, económicos y ambientales que se obtengan a partir de la propuesta descrita.

Ahora bien, debido a las clasificaciones de las actividades económicas se establece una tarifa de uso por estas aguas regeneradas, las cuales no suponen un incremento en los precios que pagan por el suministro actual. Para los tres sectores, comercial, industrial y especial se establece un punto medio de reducción del precio que actualmente pagan, este es equivalente al 15 %, la razón principal es motivarlos no solo por un descuento sobre el recurso sino por la promesa de suministro constante aun en época de sequía y de calidad. Por lo cual, el ingreso por la venta para cada sector queda planteado así:

- **Sector comercial:**  
Pagan actualmente  $6,45 \text{ €/m}^3$  Con la reducción del 15% pagarían  $5,48 \text{ €/m}^3$   
Por tal, el ingreso por aumento de la disponibilidad del recurso es de  **$5,48 \text{ €/m}^3$**
- **Sector industrial:**  
Pagan actualmente  $5,64 \text{ €/m}^3$  Con la reducción del 15% pagarían  $4,79 \text{ €/m}^3$   
Por tal, el ingreso por aumento de la disponibilidad del recurso es de  **$4,79 \text{ €/m}^3$**
- **Sector especial:**  
Pagan actualmente  $4,31 \text{ €/m}^3$  Con la reducción del 15% pagarían  $3,66 \text{ €/m}^3$   
Por tal, el ingreso por aumento de la disponibilidad del recurso es de  **$3,66 \text{ €/m}^3$** .

### 7.7.3 Emisiones de CO<sub>2</sub>

Para la valoración de la externalidad negativa generada por la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera asociadas al consumo energético por el tratamiento de aguas residuales, se estima que aproximadamente el factor de emisión es de 0,5 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, ahora el valor que actualmente se tiene en el mercado para el 2018 es de 32 € por tonelada de CO<sub>2</sub>.

Con estos datos se puede calcular el costo anual que se obtendría, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$0,5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3 * ((118890720 \text{ m}^3/\text{año}) / 1000) * ((32 \text{ €/Tonelada}) / 1000)) \\ = 1902251,5 \text{ €/año}$$

$$0,5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3 * 0,032 \text{ €} = \mathbf{0,016 \text{ €/m}^3}$$

Por lo tanto, el costo por emitir CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de agua regenerada es de **0,016 €/m<sup>3</sup>**.

### 7.7.4 Precio de venta de lodos

Con el proceso seleccionado para el tratamiento de las aguas residuales en la planta de tratamiento el salitre se calcula una producción aproximada de 150 gr de lodos por m<sup>3</sup> de agua tratada. Actualmente se vende un bulto de biosólido de 50 kg a un valor de 13,88 €. Este biosólido se caracteriza por su alta calidad y por tener amplios campos de aplicación ya bien sea en la agricultura, como materia prima para el sector construcción.

$$(13,88 \text{ €}) / (50 \text{ kg}) = 0,277 \text{ €/kg}$$

$$0,277 \text{ €/kg} * 0,150 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{0,0415 \text{ €/m}^3}$$

Esto indica que por cada m<sup>3</sup> de agua tratada se obtiene 0,150 kg /m<sup>3</sup> de lodos y que se puede obtener **0,0415 €/m<sup>3</sup>** por su venta en el mercado.

### 7.7.5 Costos de oportunidad

Estos costos hacen referencia a la existencia de diferentes alternativas para la reutilización del agua regenerada o para la inversión del dinero en otro escenario, el costo de oportunidad está dado por el uso que proporciona el mayor rendimiento económico, siempre y cuando estos rendimientos sean más altos que los de un instrumento financiero (Seguí, 2015).

Para calcular los costos de oportunidad se parte del escenario netamente económico donde se dispone a realizar la inversión total de los costos de en los cuales se incurren al momento de

implementar la propuesta planteada. La adquisición de bonos del estado se basa principalmente en un título de renta fija emitido por el estado colombiano que permite obtener fondos que son manejados en mercados financieros y de los cuales se compromete a devolver el capital más unos intereses.

Actualmente, Colombia cuenta con bonos de estado que en primer lugar pagan una tasa de interés anual de 6,72 % a 10 años, este porcentaje hace referencia al 29 de diciembre de 2018. Siendo así, el valor total de la inversión del proyecto planteado es de 75 030 665 € incluyendo así mismo la inversión que se ha de realizar para las redes de distribución de agua regenerada para las 4 empresas. Por lo tanto, el costo de oportunidad en la inversión del capital en bonos del estado tendría un valor de **0,00424 € /m<sup>3</sup>**.

#### 7.7.6 Beneficio total

La razón principal que se pretende con realizar un análisis económico de la propuesta planteada para la planta de tratamiento “El Salitre”, es generar una maximización del beneficio total, esto quiere decir que la maximización parte de los beneficios privados, los beneficios generados por las externalidades (negativas y positivas) y los costos de oportunidad. Este análisis gira entorno a las decisiones económicas que debe tomar la empresa prestadora del servicio, que en este caso es el acueducto de Bogotá con participación del gobierno por ser una entidad pública privada. Siendo así, la función está determinada de la siguiente forma:

$$MAX B_T = B_P + B_E - CO$$

De donde:

$B_T$  = Beneficio Total (Ingresos totales – Costes totales)

$B_P$  = Beneficio Privado (Ingresos privados – Costes privados)

$B_E$  = Beneficio de las Externalidades (Ingresos externalidades – Costes externalidades)

$CO$  = Costos de Oportunidad

Grupo de impacto	Impactos implicados	Sellopack		Papeles primavera		Licorera Cundinamarca		Campo de Golf La Florida	
		Cuantificación		Cuantificación		Cuantificación		Cuantificación	
		Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
		€/m3	€/m3	€/m3	€/m3	€/m3	€/m3	€/m3	€/m3
Infraestructura hidráulica	Tratamiento del agua residual (€/año)		0,2378		0,2378		0,2378		0,2378
	Regeneración y reutilización de agua residual								
	Adaptación de las redes para el transporte del agua regenerada		0,0036		0,0022		0,0042		1,0577
	Coste de oportunidad de la inversión		0,00424		0,00424		0,00424		0,00424
Acondicionamiento y reutilización de subproductos	Lodos (Biosólidos)	0,04		0,04		0,04		0,04	
	Energía y Biogás	No cuantificado		No cuantificado		No cuantificado		No cuantificado	
Uso de recurso	Cantidades para suministrar	4,79		4,79		4,79		3,66	
	Garantías de suministro	No cuantificado		No cuantificado		No cuantificado		No cuantificado	
Medio ambiente	Mejora ambiental del río	2,2		2,2		2,2		2,2	
	Contaminación atmosfera emisiones de CO2		0,016		0,016		0,016		0,016
<b>TOTAL €</b>		7,03	0,26164	7,03	0,26024	7,03	0,26224	5,9	1,31574
<b>Beneficio Total</b>		6,76836		6,76976		6,76776		4,58426	

**Tabla 7.19** Cuantificación económica de las externalidades del proyecto.

Como se observa en la tabla 7.19 la cuantificación y valoración de los impactos que genera la implementación de la propuesta permite determinar que el beneficio total que se obtiene por cada una de las empresas varía en favor de factores de distancia y de costos por venta de  $m^3$  de agua regenerada para cada uno de los sectores establecidos.

Por tanto, el beneficio total es de:

Sellopack: Beneficios privados más las externalidades positivas =  $7,03 \text{ €/m}^3$  y los costos privados más las externalidades negativas  $0,2616 \text{ €/m}^3$ . Lo cual representa un beneficio total de  **$6,7683 \text{ €/m}^3$** .

Papeles primavera: Beneficios privados más las externalidades positivas =  $7,03 \text{ €/m}^3$  y los costos privados más las externalidades negativas  $0,2602 \text{ €/m}^3$ . Lo cual representa un beneficio total de  **$6,7697 \text{ €/m}^3$** .

Licores Cundinamarca: Beneficios privados más las externalidades positivas =  $7,03 \text{ €/m}^3$  y los costos privados más las externalidades negativas  $0,2622 \text{ €/m}^3$ . Lo cual representa un beneficio total de  **$6,7677 \text{ €/m}^3$** .

Campo de golf la florida: Beneficios privados más las externalidades positivas =  $5,90 \text{ €/m}^3$  y los costos privados más las externalidades negativas  $1,3157 \text{ €/m}^3$ . Lo cual representa un beneficio total de  **$4,5842 \text{ €/m}^3$** .

A pesar de que algunos impactos no fueron cuantificados y valorados económicamente, esto no afecta la toma de decisiones sobre la investigación ya que al no ser valorados incrementa la viabilidad y rentabilidad de los tratamientos seleccionados para el agua residual generada por Bogotá.

Como las empresas seleccionadas no consumen toda la aportación de agua regenerada, se verterá el excedente al río Bogotá, generando un mejoramiento ambiental y evitando así mismo las sanciones que le impondría el estado a la empresa acueducto por verter agua residual de baja calidad. Esto indica que la realización de esta propuesta ayuda a que se eviten costos y que a su vez se genere una ganancia económica reflejada en el precio de venta de agua regenerada y de los lodos y el pago de sanciones. De igual forma, se recomienda que se haga un estudio más profundo para determinar su valoración económica (método de valoración contingente).

## Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones

La propuesta para la implementación de un sistema complementario para la planta de tratamiento “El Salitre” permite regenerar un recurso tan escaso como lo es el agua. El sistema actual de tratamiento carece de visión, ya que está fundamentado en un modelo de economía lineal, donde el recurso es captado, utilizado y vertido sin volver hacer uso del mismo, y a su vez, genera un impacto ambiental sobre las fuentes hídricas naturales. El planteamiento que se desarrolla para esta planta se basa en un sistema de regeneración y posterior reutilización de todas las aguas residuales que son captadas, esto genera una serie de impactos que fueron identificados, cuantificados y valorados permitiendo basar la decisión en las ventajas y desventajas económicas y técnicas para su posible implementación.

La metodología que se aplicó parte de un análisis técnico económico, donde se relaciona costo – beneficio. Para esto, se partió de la previa identificación de los impactos positivos y negativos que se genera por los procesos de tratamiento y por las instalaciones. Así mismo, se seleccionaron empresas del sector industrial y especial que tienen un alto consumo de agua y a su vez, estarían dispuestas hacer uso de agua regenerada que tiene una calidad muy similar a la que actualmente usan. Con todos estos aspectos desarrollados se obtiene el precio mínimo de venta del agua regenerada, el cual lleva la integración de todos los costos asociados, esto permitió alcanzar una maximización de el beneficio por reutilizar el agua.

Los datos de partida se clasificaron como costos privados, que hacen relación a los costos de inversión, operación y mantenimiento; pago de impuestos que deben realizar las empresas públicas- privadas correspondiente a un 19 % y depreciación fiscal de 5,5%. La inversión total de la implementación del tratamiento secundario, terciario y tratamiento complementario de lodos tiene un valor de 75 042 635 € y para los costos de operación y mantenimiento se incluyen los de los procesos ya existentes, alcanzando un valor de 2 315 280 €·año.

Ahora bien, para la valoración económica de las externalidades positivas y negativas que implica la implementación, parte fundamentalmente de criterios entrelazados entre la cantidad disponible y la calidad que llega a tener el efluente final.

Siendo así, las conclusiones del estudio son las siguientes:

1. Las alternativas más rentables para realizar el tratamiento secundario son los lodos activados seguido de sedimentadores, ya que tiene un alto nivel de rendimiento en el proceso de eliminación de sólidos suspendidos y los microorganismos se alimentan de la materia orgánica generando una depuración y elimina la cantidad de DBO que quedo

del tratamiento primario. Así mismo, económicamente es viable ya que su costo de tratamiento es de 0,0044 €/m<sup>3</sup>. De tratamiento terciario, se seleccionó la cloración, el cual se basa en desinfectar el efluente con cloro logrando eliminar patógenos o de microorganismos, este proceso tiene un costo de 0,0006 €/m<sup>3</sup>. Finalmente, se complementa el tratamiento del subproducto de lodos con un secado térmico el cual logra reducir el contenido de agua que poseen y a su vez eliminan las sustancias volátiles, este proceso tiene un costo de 0,0788 €/m<sup>3</sup>.

2. El precio mínimo de venta de agua regenerada que permite recuperar los costos de tratar 128 351 520 m<sup>3</sup>/ año, es de 0,2378 €/m<sup>3</sup>. Por lo cual, este valor permite que los costos de inversión sean rentables según el comportamiento del valor actual neto. Sin embargo, este precio solo contempla el proceso interno, mas no la distribución.
3. Los precios calculados para cada empresa parten de un descuento de 15 % lo cual permite incentivar la reutilización sumado a reducciones económicas por m<sup>3</sup> utilizado, y les garantiza suministro sin importar épocas de sequía o recortes en el suministro.
4. Con la finalidad de poder recuperar todos los costos privados para el desarrollo de la propuesta se establece un precio mínimo de venta de agua regenerada para Sellopack, Papelera primavera, Licores de Cundinamarca de 4,79 €/m<sup>3</sup> y para el Campo de Golf la Florida de 3,661 €/m<sup>3</sup>.
5. Se genera un beneficio económico a las empresas con un ahorro de 0,85 €/m<sup>3</sup> para las empresas del sector industrial y de 1,98 €/m<sup>3</sup> para la del sector especial.
6. En la cuantificación monetaria de las externalidades negativas y positivas se valoraron las siguientes:
  - Acondicionamiento y reutilización de subproductos: el costo por venta de lodos como resultado del proceso regeneración de aguas es de 0,04 €/m<sup>3</sup>, este es clasificado como impacto positivo.
  - Medio ambiente: debido al proceso de tratamiento se generan emisiones de CO<sub>2</sub> las cuales se asocian al consumo energético, este se clasifica como un impacto negativo ya que ayuda a aumentar las concentraciones de gases de efecto invernadero. Este impacto está valorado en 0,016 € · m<sup>3</sup> de agua regenerada. Al igual que se evitan costos por verter agua que sale de la planta al río Bogotá.
7. Aunque no se pudo valorar económicamente algunas externalidades esto permite que se aumente la rentabilidad del sistema seleccionado.
8. El balance de la valoración de las externalidades del proyecto indica que el beneficio total representa una valoración económica para Sellopack de 6,7683 €/m<sup>3</sup>, Papeles

primavera 6,7697 €/m<sup>3</sup>, Licores Cundinamarca 7,7677 €/m<sup>3</sup> y Campo de golf la florida 4,5842 €/m<sup>3</sup>.

Se recomienda para futuras investigaciones, realizar una valoración económica por medio del método de valoración contingente para determinar el impacto que generaría la recuperación del Rio Bogotá.

## Referencias

- Acueducto y alcantarillado de Bogotá (2017). *Plan maestro de acueducto y alcantarillado, documento técnico de soporte*. Empresas público – privadas.
- Agua, alcantarillado y aseo de Bogotá (2018). *Informe mensual de la planta de tratamiento El Salitre*. Empresas público- privada.
- Alcaldía mayor de Bogotá, (2016). *Reportes de estado actual del alcantarillado*.
- Análisis sectorial del agua (2016). *Dinámica del manejo y disposición de agua en Colombia*.
- Asano, T. et al. (2007). *Water reuse: issues, technologies and applications*. Metcalf & Eddy AECOM. Editorial Mc Graw Hill, 1<sup>st</sup> edition pp. 256-524, 599-724.
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2017). *Norma RAS 2000*.
- Chen Z, (2013). *A critical review on the end uses of recycled water*. Crit Rev Environ Sci Technol
- Cooper, M. (2013). *The circular economy*. Massachusetts Institute of Technology
- Daniel, R. (2015). *The Environmental Impacts of Reuse*. Massachusetts Institute of Technology.
- Decreto 3930 de 2010. *Presidencia de la Republica de Colombia*.
- Decreto 2811 de 1974. *Presidencia de la Republica de Colombia*.
- Diana, Z. (2010). *Minimización y prevención como estrategia para el control de la contaminación por aguas residuales municipales en la zona de expansión de Cali*. Universidad del Valle.
- ECOPLANET, (2018). *Cotización planta de tratamiento MBBR*. Cartagena.
- EDOSPINA, (2018). *Cotización PTAR Cartagena*. Obtenido de EDOSPINA.
- ENDRESS+HAUSER MANAGEMENT AG (2018). *Optimice la aireación en el tratamiento de aguas residuales*. <https://www.es.endress.com/es/industrias/water-&-wastewater/aireacion-aguas-residuales>
- Ellen Mac Arthur. (2016). *The economy rethinking the future of the reuse*.
- Evans, C. (1996). *The environmental impacts of reuse*.
- Gullón, M. (2010). *La Gestión del Agua Regenerada en la AMB. I Conferencia Internacional de la Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua (ASERSA)*.

Hoonweg, V. (2012). *Water Reuse from a Circular Economy Perspective and Potential Risks from an Unregulated Approach*. London college.

Ideam. (2014- 2016). *Estudio nacional de agua*. Ministerio del medio ambiente.

Instituto mexicano de la tecnología del agua (2015). *Análisis de costo beneficio para la presa de santa rosa, en la región de Chapala*. Departamento de desarrollo y medio ambiente.

Katz, R. (2003). *Water Recycling 2030. Recycled Water Task Force. California Department of Water Resources*.

Ley 632 del 2000. *Congreso de la Republica de Colombia*.

Ley 142 de 1994. *Congreso de la Republica de Colombia*.

Ley 9 de 1979. *Congreso de la Republica de Colombia*.

Coll, M. (2001). *Los fallos del mercado en La Economía de Mercado, virtudes e inconvenientes. Edición del 22 de marzo de 2007*.

Melgarejo, J. (2015). *La reutilización de agua en el marco de la economía circular*

Metcalf-Eddy. (2010). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Cuarta edición PP. 235-267.

Ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial (2004). *Plan nacional de manejo de aguas residual en Colombia*. Departamento nacional de planeación mexicano.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial <http://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio del medio ambiente y desarrollo sostenible (2016). *Reusó de aguas residuales tratadas*. Dirección de gestión integral de recurso hídrico.

*Ministerio de vivienda, ciudad y territorio república de Colombia, (2012). Componente de costo de tratamiento de aguas residuales en el costo medio de operación particular*. Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá

Mujeriego, R. (2015). *El agua en economía circular*. Fundación Cotec.

Newcombe, R. (2009). *Economic evaluation for water recycling in urban areas of California*. University Of California.

Nikolaos, V (2018). *Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach*.

Organización panamericana de la salud OPS (2005). *Informe de evaluación regional de manejo de aguas regeneradas para agricultura.*

FAO, (2017). *Reutilización de aguas para la agricultura en América latina y el caribe.* Organización de aguas para agricultura en América latina y el caribe.

Resolución 1207 (2014). *Uso Eficiente y la Disminución de la Contaminación Del Recurso Hídrico.* Gobierno de la republica Colombiana.

Resolución 1096 de 2000. *República de Colombia. Ministerio de desarrollo económico.*

Romero, A, (2004). *Tratamiento de aguas residuales Tercera Edición., Colombia:* Escuela Colombiana de ingenieros.

Rodriguez, C. (2015). *El ciclo urbano del agua en Bogotá, Colombia, estado actual y desafíos para su sostenibilidad.* Universidad de alicante.

Russell, D. (2012). *Tratamiento de aguas residuales, enfoque practico,* 1° edición. Madrid, España

Sandoval, C. (2008). *Problema global, incremento urbano, aguas residuales.* Universidad nacional de Colombia y Universidad de los Andes.

Seguí, L. (2015). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico-económico y casos.* Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia.

Ponencia de la unión europea (2016). *Water in the circular economy and innovations for urban water treatment.*